Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Казанский национальный исследовательский
технологический университет

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЯ

VI Всероссийская студенческая научно-техническая конференция

24–26 мая 2022 г.
г. Казань

Материалы конференции



ISBN 978-5-7882-3178-5

© Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2022

УДК 66.021.3/.4+66.013.8+628.5
ББК Ч481.268+Ч488.77+Ч214(2)70:66+Д89:Ч48
И73

Издается по приказу № 508-О от 08.06.2022
Казанского национального исследовательского технологического университета

Редакционная коллегия:
д-р техн. наук А. В. Бурмистров
д-р техн. наук С. И. Поникаров
канд. техн. наук А. А. Хоменко
канд. техн. наук А. А. Назаров
техник кафедры МАХП И. Г. Кузьмин

И73 Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология: VI Всероссийская студенческая научно-практическая конференция, г. Казань (24–26 мая 2022 г.) : материалы конференции; под ред. А. В. Бурмистрова [и др.]; Минобрнауки России; Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2022.

ISBN 978-5-7882-3178-5

В сборнике представлены материалы VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология», проведённой 24–26 мая 2022 года в Казанском национальном исследовательском технологическом университете.

Предназначены для студентов и аспирантов технических специальностей при проведении практических занятий в качестве вспомогательного материала.

Все материалы представлены в авторской редакции.

УДК 66.021.3/.4+66.013.8+628.5
ББК Ч481.268+Ч488.77+Ч214(2)70:66+Д89:Ч48

Текстовое электронное издание

Минимальные системные требования:
- Windows: процессор Intel 1,3 Гц или аналогичный;
  Microsoft Windows XP Service Pack 2
  128 МБ оперативной памяти
- MacOS: процессор PowerPC G4 или Intel
  MacOS X 10.5
  128 МБ оперативной памяти
- Linux: 32-разрядный процессор Intel Pentium или аналогичный
  SUSE Linux Enterprise Desktop 10 или Ubuntu 7.10; GNOME или KDE Desktop Enviroment

Ответственный за выпуск И. Г. Кузьмин

Подписано к использованию 27.07.2022

Объем издания 37,5 Мб Заказ 113/22

Издательство Казанского национального исследовательского
технологического университета

420015, Казань, К. Маркса, 68

СОДЕРЖАНИЕ

Пленарные доклады 13

Поникаров С. И. ВКЛАД УЧЕНЫХ КНИТУ В ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ 1939 г. 14

Абиев Р. Ш. МИНИ И МИКРОМАСШТАБНЫЕ РЕАКТОРЫ: ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛИРУЕМОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ 17

Бурмистров А. В., Капустин Е. Н. НОВЫЕ СОВМЕСТНЫЕ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ПОЛУЧЕНИЯ «СУХОГО» ВАКУУМА АО «ВАКУУММАШ» И КНИТУ 28

Лапонов С. В. ПРИМЕНЕНИЕ МАЛООБЪЁМНЫХ РОТОРНО-ДИСКОВЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ 33

Секция 1 40

Абдрахманов Г. А., Максудов Р. Н., Аляев В. А. МАССОПЕРЕНОС ИЗ ПОРИСТОГО МАТРИКСА В ПОТОКЕ СУБ И СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА 41

Айметдинов Н. Ф., Петров В. И., Трусов А. О. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЕ ВИХРЕВЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ 43

Аллахвердиева Э. Ф., Хамидуллина Д. А., Лашков В. А. ОСАДИТЕЛЬНАЯ ЦЕНТРИФУГА С ФИЛЬТРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ 47

Андреева Д. В., Попов А. Д, Борисов А. И. АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИИ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ АММИАКОМ 51

Ахметханова Е. Н., Сафин Р. Г. ПИТАТЕЛЬНЫЕ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В СУШЕННОМ ОБЛЕПИХОВОМ ЖОМЕ 57

Ахметханова Е. Н., Сафин Р. Г. ПОЛУНЕПЕРЫВНЫЙ ПРОЦЕСС ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОЛИФЕНОЛОВ ИЗ ЛИСТЬЕВ ОБЛЕПИХИ. 61

Бабушкин И. С., Петров В. И., Хамидуллина А. Р. ИССЛЕДОВАНИЕ БРЫЗГОУНОСА ВИХРЕВЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ 65

Водениктов А. Д., Чичирова Н. Д. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ВАКУУМНОЙ ДЕАЭРАЦИИ В КОНДЕНСАТОРАХ ПОВЕРХНОСТНОГО ТИПА 69

Вторушина В. А., Дружинина Д. Н., Таранова Л. В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТУРБОДЕТАНДЕРА В ПРОЦЕССАХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ 71

Гайнутдинов А. Р., Алексеев В .В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ НЕФТИ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ФИЛЬТРЕ-ГРЯЗЕУЛОВИТЕЛЕ 76

Горшунова А. Н., Салин А. А. ВЛИЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ НА ПРОЦЕССЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ МЕТОДАМИ ЭКСТРАКЦИИ 80

Еремеев Е. В., Поникаров А. С. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ РЕАКТОРОВ 84

Журавлев М. В., Степаненко И. Ю., Суходоева Я. А., Чурсина Е. С. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ОШПАРИВАТЕЛЯ СВЕКЛОВИЧНОЙ СТРУЖКИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ САХАРОЗЫ 98

Загидуллин К. И., Старовойтова Е. В. МОДЕЛЬ КАПЛЕОТБОЙНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ В ДВУХФАЗНОМ СЕПАРАТОРЕ 103

Загиров А. Н., Сафин Р. Г. СЕПАРИРОВАНИЕ ПИРОЛИЗНЫХ ГАЗОВ МЕТОДОМ ДИСТИЛЯЦИИ 107

Загиров А. Н., Сафин Р. Г. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС БЫСТРОГО ПИРОЛИЗА С ПОЛУЧЕНИЕМ ПИРОЛИЗНОГО ТОПЛИВА 110

Закиров И. Р., Ахметсафина Ф. Ф., Голубева И. Л. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО СГУСТИТЕЛЯ 114

Зялалов А. А., Новиков А. Е., Валеев С. И. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТАНОВОК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА 117

Игнатьев Н. В., Гаврилов А. В., Максудов Р. Н., Аляев В. А. СВЕРХКРИТИЧЕСКАЯ И ВАКУУМНАЯ ИМПРЕГНАЦИЯ ПОРИСТОГО МАТРИКСА ЛЕКАРСТВЕННЫМ ПРЕПАРАТОМ 121

Алтунин К. В., Идир Н. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ НА МЕДИЦИНСКОЙ МАСКЕ 124

Ильина А. Э., Просин М. В., Бородулин Д. М., Головачева Я. С. ЭКСТРАГИРОВАНИЕ РОСТКОВ ПШЕНИЦЫ В ЭКСТРАКТОРЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С РЕЦИКЛ-КАНАЛАМИ 128

Исмагилова Г. И., Медяков А. А. ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДА НАГРЕТОЙ ПРОВОЛОКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ С ЕГО ПОМОЩЬЮ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА 131

Камашев Н. Ю., Осипов Э. В. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РЕЦИКЛИНГА ПЕНОПОЛИУРЕТАНА 136

Каримов Т. М., Загреев И. Р., Захаров А. С., Гильмутдинов И.И., Сабирзянов А. Н. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИПРОПИЛЕНА В СРЕДЕ СУБ И СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ 140

Каримуллин И. Ф., Закиров И. Р., Мухаметзянова А. Г. БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ 144

Католиченко В. С., Нуждин А. В. ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ПСВ-125 ЗА СЧЕТ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА 148

Клементьева А. Ю., Лашков В. А. МОДУЛЬ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ЦЕНТРИФУГИ ДЛЯ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВ 153

Клочков И. А., Смирнова Л. А. ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ 157

Коновальчук М. А., Долгов С. С. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ СНЕГООБРАЗНОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА 162

Косов В. А., Печенегов Ю. Я. ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ В ТРУБАХ 165

Латыпов Д. Р., Фазлыев А. Р., Клинов А. В., Малыгин А. В. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВАПОРАЦИОННОГО МЕМБРАННОГО МОДУЛЯ 169

Латыпов Д. Р., Фазлыев А. Р., Клинов А. В., Давлетбаева И. М., Сазонов О. О. ОБЕЗВОЖИВАНИЕ ИЗОПРОПАНОЛА С ПОМОЩЬЮ ПОЛИМЕРНЫХ ПЕРВАПОРАЦИОННЫХ МЕМБРАН 174

Маясова А. О., Харьков В. В., Мадышев И. Н. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ В ГИБРИДНОЙ ГРАДИРНЕ 179

Мельников А. В., Назаров А. А. СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ БАЗОВЫХ МАСЕЛ ПОВЫШЕННОГО КАЧЕСТВА 182

Мельников А. В., Назаров А. А. СРАВНЕНИЕ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БАЗОВЫХ МАСЕЛ 185

Мельников А. В., Назаров А. А. УМЕНЬШЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА УСТАНОВКЕ ГИДРООЧИСТКИ МАСЕЛ ЗА СЧЕТ ЗАМЕНЫ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ 188

Миронова А. Д., Медяков А. А. ОБЗОР ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ТИПА ТТАИ 191

Мугтасимов И. Р., Растегаев Е. К., Кузнецова И. В., Сабирзянов А. Н. СОЗДАНИЕ ПОРИСТЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТРИКСОВПОЛИМОЛОЧНОЙКИСЛОТЫ (PLA) 194

Мунин А. П., Озеров Н. А, Кульбякина А. В. ОЦЕНКА ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ 198

Назаренко Д. С., Савинова А. В., Тюрин А. В., Путиловский Ф. Д., Капустин Е. Н. СТЕНД ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКАЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФУЗИОННОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА 202

Павлова Е. А., Васильев П. С. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ СТАДИИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА 206

Плахов В. В., Михайлова С. Н. АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОШПАРИВАНИЯ СВЕКЛОВИЧНОЙ СТРУЖКИ 210

Половков А. М., Сагитдинов Ю. И., Поникаров А. С., Поникаров С. И. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРУБЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ 211

Ракова П. А., Меркулов А. А. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЫЛЕОЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА В ПОЛОМ ФОРСУНОЧНОМ СКРУББЕРЕ 218

Ратушин И. В., Гаврилов А. В., Аляев В. А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ ВАКУУМНОЙ ИМПРЕГНАЦИИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ 221

Савинова А. В., Назаренко Д. С., Фахретдинов М. Ф., Тюрин А. В. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПИРАЛЬНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА 224

Сайфетдинов А. Г., Куликов А. С. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В РАБОЧЕЙ ПОЛОСТИ РОТОРНОГО КОМПРЕССОРА ВНУТРЕННЕГО СЖАТИЯ 228

Санников И. В., Мадышев И. Н. УПРАВЛЕНИЕ РАСХОДАМИ ПАРОЖИДКОСТНЫХ ФАЗ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕКТИФИКАЦИИ 232

Семанина Н. Д., Бадретдинова Г. Р., Дмитриев А. В. РЕЖИМ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКА В УСЛОВИЯХ ЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ 237

Ситдиков Т. А., Райков А. А. РАЗРАБОТКА БЕЗМАСЛЯНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА С ДВУХСТОРОННИМ СПИРАЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ 241

Смородин К. А., Крючков С. С., Степакова А. Н., Атласкин А. А. ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ ГАЗОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ МЕМБРАН С ПРИМЕНЕНИЕМ «IN-SITU» МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ 243

Соколов А. Е., Косырев В. М., Сидягин А. А. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ 245

Попова Н. С., Христиченко К. В., Таранова Л. В. МОДИФИКАЦИИ КОНТАКТНЫХ СИТЧАТЫХ УСТРОЙСТВ 250

Хайруллин И. Ф., Сафин Р. Г. УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОИЗОДСТВА АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ 255

Халилов А. И., Кондрашева С. Г., Лашков В. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОВОРОТНЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЛОПАТОК В ЦЕНТРИФУГАХ..... 257

Харитонова О. С., Зиннурова О. В., Фирсин А. А. ВОЗМОЖНОСТЬ ОПТИМИЗАЦИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ КОЛОННЫ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ УСТАНОВКИ ЗАМЕДЛЕННОГО КОКСОВАНИЯ 261

Царева А. А., Гришин Н. С. РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ВЫПАРИВАТЕЛЯ ЭКСТРАКТОВ С БЛОКОМ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАТОРА..... 263

Щукина С. А., Альтапов А. Р. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ АППАРАТОВ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ 266

Юрченко Я. А., Мухаметзянова А. Г. ВНЕАУДИТОРНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА 270

Родионов А. С., Сафин Р. Г. ПИРОЛИЗНЫЙ РЕАКТОР С ЛОТКАМИ..... 275

Родионов А. С., Сафин Р. Г. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПИРОГЕНЕТИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ..... 277

Хайруллин И. Ф., Сафин Р. Г. УСТАНОВКА ПИРОЛИЗА С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ..... 280

Секция 2 282

Аласгарли С. У., Лаптев А. Г. ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПЕННОМ СЛОЕ 283

Алексеев К. А., Латыпов Д. Р. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ РАСТВОРИТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ АЗЕОТРОПНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ 287

Алимов А. Р., Мадякин В. Ф., Петров В. А., Лившиц А. Б. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВАКУУМ-ИМПУЛЬСНОМ НИТРОВАНИИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ..... 291

Анашкина А. В., Анашкин И. П., Клинов А. В. МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА ИДЕАЛЬНОЙ ЛЕННАРД-ДЖОНСОВСКОЙ СМЕСИ В МЕМБРАНАХ 295

Анашкина А. В., Анашкин И. П., Дьяконов С. Г. СВЯЗИ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ НЕИДЕАЛЬНОЙ ЛЕННАРД-ДЖОНСОВСКОЙ СМЕСИ С ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНТРОПИЕЙ..... 297

Апакова В. И., Хусаинов Р. Н. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ 300

Ахметова К. И., Исаев А. А., Бурмистров А. В. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ОТКАЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСОВ ТИПА РУТС 303

Бадретдинова Г. Р., Харьков В. В., Якимов Н. Д. К РАСЧЕТУ ФОРМИРОВАНИЯ ОСАДКА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НА ОРЕБРЕННЫХ ТРУБАХ ТЕПЛООБМЕННИКА 307

Бауэр Д. Ю., Ахметов Ш. М., Косенков Д. В., Сагадеев В. В. СПЕКТРАЛЬНАЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ В ОБЛАСТИ ПЛАВЛЕНИЯ РЯДА МЕТАЛЛОВ И ПОЛУМЕТАЛЛОВ 311

Бахтиаров Л. И., Мадякин В. Ф., Петров В. А., Лившиц А. Б. CFD - МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМО-ВАКУУМ-ИМПУЛЬСНОЙ СУШКИ ПОРОХА..... 314

Бахтиев М. А., Дубкова Н. З., Николаев А. Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ХЕМОСОРБЦИИ ПРИ ПРЯМОТОЧНОМ ТЕЧЕНИИ ГАЗА И ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛАХ..... 319

Бударин Н. Л., Хромченков В. Г. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГУБТ ПРИ СУХОМ СПОСОБЕ ОЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА 322

Винокурова Д. М., Рачковский С. В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ЭТАНА В ПАКЕТЕ UNISIM 325

Винокурова Д. М., Рачковский С. В. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПЕЧИ ПИРОЛИЗА ЭТАНА В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ..... 330

Власенков А. И., Исаев А. А., Бурмистров А. В. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ОТКАЧКИ ДВУХРОТОРНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА С ВНЕШНИМ СЖАТИЕМ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ОБРАТНЫХ ПЕРЕТЕКАНИЙ ЧЕРЕЗ КАНАЛЫ РОТОРНОГО МЕХАНИЗМА 334

Глотов А. А., Горячев Ю. В., Лаврентьев Д. Д. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЕ ПОРИСТОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ 339

Колмаков С. О., Осипов Э. В. СОПРЯЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ПАРОЭЖЕКЦИОННОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА 343

Крыгина А. С., Большаков Д. Д., Емельянычева Е. А. МОДЕРНИЗАЦИЯ БЛОКА СТАБИЛИЗАЦИИ РИФОРМАТА УСТАНОВКИ ЛФ 35/21-1000 «ЛУКОЙЛ НИЖЕГОРОДНЕФТЕОРГСИНТЕЗ»..... 348

Лаптева Е. А., Окружнов В. А. ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА НА МАКЕТЕ МИНИ-ГРАДИРНИ 352

Мадаминов Н. В., Клинов А. В., Малыгин А. В., Хайруллина А. Р., Давлетбаева И. М., Сазонов О. О., Анашкин И. П. АМИНОЭФИРЫ ОРТОФОСФОРНОЙ И БОРНОЙ КИСЛОТЫ КАК ЭКСТРАГЕНТ ДЛЯ ДЕГИДРАТАЦИИ ЭТАНОЛА..... 355

Мадаминов Н. В., Клинов А. В., Малыгин А. В., Хайруллина А. Р., Давлетбаева И. М., Сазонов О. О., Анашкин И. П. ЭКСТРАКТИВНАЯ РЕКТИФИКАЦИЯ ВОДНОГО РАСТВОРА ЭТАНОЛА С ПОМОЩЬЮ АМИНОЭФИРОВ ОРТОФОСФОРНОЙ И БОРНОЙ КИСЛОТЫ 359

Маряхин Н. Н., Кузнецов В. А., Карпеев С. В., Харитонова О. С. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ НЕРЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКИ С ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ 363

Миннуразиев Р. И., Хоменко А. А. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ БЛОКА РЕКТИФИКАЦИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ 366

Музипов Н. А., Габитова А. Р. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ ASPEN HYSYS 372

Набиев Д. С., Сидоров А. А., Салин А. А. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ 374

Назаров Д. С., Осипов Э. В. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАЛОТОННАЖНОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ПО РАЗДЕЛЕНИЮ МОНО- И ДИЭТЕЛИНГЛИКОЛЯ 379

Новоженин Е. А., Хусаинов Р. Н. ПИТАТЕЛИ-ДОЗАТОРЫ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ 384

Осипов Э. В., Бугембе Д., Харитонова А. И. СОПРЯЖЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ФЕНОЛА-АЦЕТОНА И ВСС. 387

Осипов Э. В., Умышев Д. Р. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ASPEN HYSYS 392

Сабиров Б. А., Мурзин В. М. УСТАНОВКА ГИДРООЧИСТКИ НАФТЫ АО «ТАНЕКО». МОДЕРНИЗАЦИЯ КАТАЛИЗАТОРА И ЦИФРОВОЙ ПРОТОТИП УСТАНОВКИ 394

Смирнов Н. А., Ахатова Л. И., Косенков Д. В., Аляев В. А. ЭМИССИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ТИТАНА В ОБЛАСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ТВЕРДОЕ ТЕЛО-ЖИДКОСТЬ 399

Мустеева Э. И., Султанов Р. И., Бронская В. В., Харитонова О. С. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ В ТРУБЕ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ 402

Султанова Л. Р., Харитонова О. С., Костромин Р. Н., Бронская В. В. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫХОДА СВЕТЛЫХ ФРАКЦИЙ НЕФТИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ 405

Фомин С. Л., Сабанаев И. А. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА 408

Фролагин М. Ю., Хоменко А. А., Фахретдинов М. Ф. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОРАЗБРЫЗГИВАЮЩЕЙ КАСКАДНОЙ ФОРСУНКИ УДАРНОГО ТИПА. 412

Теляков Э. Ш., Харитонова А. И., Хоменко А. А. МИКРОРЕАКТОРЫ ПРОТОЧНОГО ТИПА 417

Осипов Э. В., Харитонова А. И., Хоменко А. А. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА РАВНОВЕСНЫХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ: ЭТАНОЛАМИНОГО РАСТВОРА - H2S – CO2 422

Хусаинов И. Д., Карибуллина Ф. Р. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ТРУБОПРОВОДОВ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА 427

Шарафутдинова Д. Р., Валиев А. Р., Сагдеев Д. И., Абдулагатов И. М. РАСЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ВАКУУМНОГО МАСЛА ВМ-1С 431

Шатунов Д. Н., Малыгин А. В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ 435

Яруллин И. Р., Алексеев В. А. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТА И КАЧЕСТВА СЫРОЙ НЕФТИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ 439

Тюрин А. В., Рябчиков К. Е., Бурмистров А. В., Саликеев С. И. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУР В РАБОЧЕМ МЕХАНИЗМЕ БЕСМАСЛЯНОГО СПИРАЛЬНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА 444

Секция 3 449

Базуев М. А., Валеев С. И. ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ 450

Барышев Д. А., Вилохин С. А., Прусова И. А., Поникаров С. И. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЛВЖ НА ОТКРЫТОЙ ПЛОЩАДКЕ 455

Биккулов Р. Я., Иванов А. П., Ибатуллина А. И., Дмитриева О. С. ПРИМЕНЕНИЕ СЕПАРАТОРА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ 460

Борисов А. А. ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ СТАЛИ ЦЕРИЯ В БЕСКРЕМИНИСТЫХ МОДИФИКАТОРАХ 462

Брянцева Е. А., Пикулин Ю. Г. ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ НА БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ 465

Гадельшина Д. Н., Исянова Г. Р., Хайруллина Л. И., Тучкова О. А. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ И ОХРАНОЙ ТРУДА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ 470

Дусчанов М. Э., Буланкин М. В., Шильникова Н. В., Гимранов Ф. М. МОДЕРНИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЛЕЕВЫХ СМЕСЕЙ 474

Каюмов Т. И., Галеев А. Д. ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА РИСКА АВАРИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКИ 478

Звончевский А. Г., Шелгинский А. Я. АНАЛИЗ ЭНЕРГОИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ СЛОЖНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ 483

Звончевский А. Г., Шелгинский А. Я. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПЫЛЕГАЗООЧИСТКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ ВЭР ТЕХНОЛОГИЙ В ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ 486

Зинуров В. Э., Дмитриев А. В. ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ЧАСТИЦ СИЛИКАГЕЛЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ КЛАССИФИКАТОРЕ 488

Краевой К. А., Озерова Н. В. РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ В ЯМАЛО-НЕНЕЦКОМ АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ 491

Курасов О. А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ И ОПТИМИЗАЦИИ УСЛОВИЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ 495

Мингазутдинов И. Н., Поникарова И. Н. КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЩИМ ГАЗОМ 497

Моисеева К. С. ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДЕЭМУЛЬСАЦИИ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ СЕПАРАТОРЕ 501

Москалев Л. Н., Поникаров С. И. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ НА НАПРЯЖЕНИЯ В ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧКАХ 503

Мотыгуллина З. Ш., Шильникова Н. В. ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ЦЕХА 507

Исхакова Р. Я., Нургалиев А. И. ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ВОДО-МАСЛЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ НА НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ 512

Приточкин В. С., Поникаров С. И. ПРОГИБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ 514

Сабитов М. Х., Хисматуллин И. И., Фахретдинов М. Ф. РАСЧЕТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОРПУСОВ АППАРАТОВ С НЕКРУГЛОСТЬЮ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ 520

Салахов Р. М., Шильникова Н. В., Хайруллин Р. З. ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРУБЧАТЫХ И АВТОКЛАВНЫХ РЕАКТОРОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ БУТЕНА-1 524

Сафина Р. Р., Старовойтова Е. В. СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ТОКСИ-2.2 И ТОКСИ-3+ 529

Соловьёва А. О., Усманов Р. А., Аетов А. У., Мазанов С. В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ С СОДЕРЖАНИЕМ ЖЕЛЕЗА В РАМКАХ ПРОЦЕССА СКВО 534

Старовойтова Е. В., Галеев А. Д., Сафина Р. Р., Киляков Е. Л. АНАЛИЗ ЗОН ПОРАЖЕНИЯ АММИАКОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CFD И ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ 539

Тургунбоев Н. Р., Алексеев В. В. ПРОИЗВОДСТВО ОРГАНИЧЕСКОГО УДОБРЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШНЕКОВОГО СЕПАРАТОРА..... 544

Фахретдинов М. Ф., Сабитов М. Х., Фролагин М. Ю. ПРОЧНОСТЬ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ 548

Харламов И. Е., Валеев С. И. ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ДЕФЕКТОМ ТИПА РАССЛОЕНИЕ..... 552

Хаустов Д. А., Алтунин К. В. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ НА НАГРЕТЫХ СТЕНКАХ ТОПЛИВНЫХ КАНАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТАНОВОК НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ 556

Хисматуллин И. И., Сабитов М. Х. ЗАДАЧИ РАСЧЕТА РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ..... 560

Холоденина Д. С., Назаров А. А. ВЛИЯНИЕ ИНИЦИАТОРА НА ПРОЦЕСС ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЭТИЛЕНА ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ..... 565

Цыганкова М. Н., Лукашевич О. Д. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ..... 569

Шакиров Н. И., Чистов Ю. С. ВЛИЯНИЕ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСТВОРОВ НА ИХ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ИДЕАЛЬНОСТИ 574

Шелгинский Е. А., Яворовский Ю. В. ПОЛЕЗНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЭР В ПРОИЗВОДСТВЕ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ 578

Ядыкова М.Ю., Нефедьева Е.Э. РАЗРАБОТКА ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО ФУНГИЦИДНОГО ПРЕПАРАТА НА ОСНОВЕ ТЕБУКОНАЗОЛА И ТИАБЕНДАЗОЛА..... 581

Яппарова О. Р., Соколова Э. И. ОБРАЩЕНИЕ С РЕЗИНО-ТЕХНИЧЕСКИМИ ОТХОДАМИ: ПРОБЛЕМЫ, СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ 585

Пленарные доклады

УДК 62-05

ВКЛАД УЧЕНЫХ КНИТУ В ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ 1939 г.

Поникаров Сергей Иванович
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: ponikarov1956@mail.ru

Со дня образования механического факультета преподаватели приняли активное участие в исследованиях тепло-массообменных процессов и оборудования для химической промышленности.

Одним из выдающихся ученых был первый декан механического факультета Хамит Музафарович Муштари. Его работы по устойчивости оболочек существенно упростили инженерные расчеты жесткости оболочечных конструкций при сжимающих усилиях. Им создана Казанская научная школа по нелинейной теории оболочек. Его вклад отмечен орденом Ленина, орденом Трудового Красного Знамени, орденом "Знак Почета", а имя увековечено в названии улицы г. Казани рядом с КНИТУ.

При проектировании оборудования большое значение имеет правильный расчет гидромеханических и тепло- массообменных процессов, протекающих в нем. Применение теории подобия в настоящее время вошло в общую культуру научных и инженерных разработок. Одним из основоположников внедрения подобия был Герман Константинович Дьяконов. Им получены новые критерии подобия и доказана целесообразность использования теории подобия для моделирования процессов в оборудовании химических производств. К сожалению, его жизнь оказалась короткой. Он скончался в 46 лет.

Развитие работ Германа Константиновича продолжилось на кафедре Теоретических основ теплотехники Айтуганом Гарифовичем Усмановым. Его высочайшая эрудиция позволила развиваться в университете многим направлениям. Это и кинетика физических и химико-технологических процессов разработки метода прогнозирования коэффициентов переноса для неисследованных веществ, и энтропийный метод обобщения результатов. Его труд отмечен орденом Почета и тремя орденами Трудового Красного Знамени.

Развитие вычислительной техники создало возможность более полно использовать математическое моделирование при проектировании массообменных аппаратов. Большой вклад в это направление внес Сергей Германович Дьяконов. Им создано научное направление "Оптимальное проектирование промышленных аппаратов разделения веществ на базе сопряженного физического и математического моделирования", которое позволяет сократить количество экспериментов конкретного оборудования, заменяя его менее затратным математическим моделированием.

Экономические трудности в стране в конце 20 века создали необходимость в разработке методов и способов продления ресурса работы оборудования химических производств. Однако при этом должна быть обеспечена безопасная эксплуатация его.

При диагностике конструкции обнаруживались локальные дефекты: вмятины, выпучины, язвенной коррозии и др. При этом возникал вопрос: возможна ли дальнейшая эксплуатация . Работы по оценке состояния оборудования возглавил в университете Олег Андреевич Перелыгин. Им были получены критерии, обеспечивающие дальнейшую безопасную эксплуатацию, метод оценки остаточных напряжений и деформаций при образовании дефектов типа "вмятина".

Особую группу ученых составляют профессора, посвятившие себя созданию новых или модернизации существующих типов оборудования. Одним из первопроходцев (1940 г.) этого направления деятельности в нашем вузе был Николаев Алексей Михайлович. Одним из первых в СССР начал заниматься внедрением эффектов закрученных потоков для интенсификации массообменных процессов. Под его руководством исследовались роторно-дисковые экстракторы, массообменные аппараты вихревого типа, прямоточные контактные устройства. Николаев А.М. был награжден орденами Трудового Красного Знамени, "Знак Почета".

В первом выпуске кафедры химического машиностроения было много участников Великой отечественной войны. Среди них был известный ученый Олег Владимирович Маминов. Его разработки центробежных экстракторов, центробежных распылителей, нефтегазосепараторов отмечены на выставках в Брюсселе и на ВДНХ СССР.

Еще одним участников ВОВ, пришедшим в науку, был Иван Ильич Поникаров. Он продолжил работы на кафедре по изучению вихревых аппаратов. Под его руководством изобретен оригинальный сепаратор газожидкостного потока в виде "терки", существенно улучшивший процесс мокрой очистки газов. Проводились большие работы по исследованию и внедрению центробежных экстракторов в нефтехимической промышленности и контактных элементов с соударением потоков.

"Дети войны" - это целая плеяда ученых в нашем университете. Это Николаев Н.А., Максимов В.А., Елизаров В.И., Махоткин А.Ф., Булкин В.А., Гришин Н.С., Теляков Э.Ш.

Николаев Николай Алексеевич внес большой вклад в исследование и создание новых образцов вихревых аппаратов, вибрационных сушилок-мельниц, гидродинамических измельчителей.

Максимов Валерий Архипович - специалист по центробежным компрессорам. Его разработки подшипниковых узлов уплотнений нашли широкую реализацию в компрессоростроении.

Елизаров Виктор Иванович реализовал свои разработки на установках разделения бутанов и бутилен-изобутиленовой фракции, переработки БНФ, ББФ.

Махоткин Алексей Феофилактович - под его непосредственным руководством разработано, исследовано и внедрено более 100 установок с использованием вихревых аппаратов и новых катализаторов.

Булкин Вадим Александрович внес большой вклад в развитие гидроциклонной техники и смесителей на основе циркуляционного насоса.

Гришин Николай Степанович - генеральный конструктор изделий для оборонной промышленности и оборудования для комплексного анализа проб.

Хисамеев Ибрагим Габдулхакович - ведущий специалист в разработке и создании компрессорной техники для нефтяной и газовой промышленности. При этом совмещая работу ученого и генерального директора АО "Компрессормаш".

Теляков Эдуард Шархиевич - впервые в университете широко использовал ЭВМ и созданные базы данных для оптимизации режимов работы установок переработки нефти. Разработал основы создания вакуумсоздающих систем на основе ЖКВН для нефтепереработки. Внедрены установки на НКНХ и ПАО "Казаньоргсинтез".

Следующее поколение ученых такжзе внесло существенный вклад в развитие химического машиностроения. Это и Сафин Рушан Гареевич с разработками комплексной переработки органических отходов, и Гумеров Фарид Мухамедович с внедрением сверхкритической технологии в экстракцию из твердой фазы и получении биотоплива, и Фарахов Мансур Инсафович в сотрудничестве с Лаптевым Анатолием Григорьевичем, создавшие целую плеяду новых и модернизированных установок и широко внедряющих их через ими же открытое ИВЦ "Инжехим", а также Николаев Андрей Николаевич, развивающий вихревые аппараты для пылеочистки и концентрирования растворов. Бурмистров Алексей Васильевич, разрабатывающий безмаслянные вакуумсоздающие машины, Клинов Александр Вячеславович с разработкой молекулярно-статистических методов для описания свойств, а также оборудование для первопарации.

УДК 66.08+544.22

МИНИ И МИКРОМАСШТАБНЫЕ РЕАКТОРЫ: ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛИРУЕМОГО СИНТЕЗА НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ

Абиев Руфат Шовкетович
Санкт-Петербургский государственный технологический институт,
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова Российской академии наук,
E-mail: abiev.rufat@gmail.com

Аннотация: Рассмотрены недостатки традиционных макромасштабных методов растворного синтеза наноразмерных частиц. Обозначены пространственные и временные масштабы процесса гетерогенной нуклеации. Продемонстрированы преимущества милли- и микромасштабного подходов к поточному синтезу наноразмерных частиц, как в однофазных, так и в двухфазных потоках. Приведены примеры микрореакторного синтеза оксидных и фторидных наноразмерных материалов.

Ключевые слова: растворный синтез; наноразмерные частицы; микрореакторы; поточный синтез; однофазные потоки; двухфазные потоки.

Формирование наноразмерных частиц в потоке – одно из интенсивно развиваемых направлений химических технологий, о чем свидетельствует растущее число статей и обзоров [1].

Разработка проточных реакторов для реактивной кристаллизации опирается на фазовые диаграммы, которые позволяют определить границы между равновесными фазами, а для случая кристаллов – между метастабильными фазами, такие как полиморфные, сольватные, аморфные и жидкие фазы, в зависимости от концентраций, температуры и давления. Вместе с тем, хорошо известно, что неравновесные ограничения (обусловленные динамикой процесса) определяют пути кристаллизации, а значит, и конечные свойства кристаллов [2].

При этом, однако, часто упускаются из виду два важных фактора, влияющих на возможные пути кристаллизации: 1) необходимо учитывать особенности процесса смешения, его пространственно-временные характеристики; 2) необходимо учитывать влияние добавок или загрязнений, которые могут локально или динамически модифицировать взаимодействие на уровне «реагент-реагент» и «растворитель-реагент» [1]. Следует также иметь в виду два возможных механизма нуклеации – гомогенный и гетерогенный. В частности, в работе [3] показано существование механизмов формирования зародышей критического размера путем послойного агрегирования кластеров правильной и неправильной формы (агрегативная нуклеация).

В связи с этими представлениями, а также продиктованной потребностью в получении наноразмерных частиц при растворном синтезе оксидных и других неорганических соединений возникает идея в формировании ***управляемых гидродинамических, термодинамических и физико-химических условий***, позволяющих получать наноразмерные частицы с предсказуемыми химическим составом, строением, свойствами, включая размеры.

Целью данной работы является формулирование на основе теории агрегативной нуклеации концепции управляемого растворного синтеза, позволяющего контролировать характеристики получаемого продукта – состава, структуры и средних размеров частиц, а также численная оценка и экспериментальная проверка некоторых теоретических положений.

На рис. 1 показана брутто-схема влияния условий синтеза на состав, строение и свойства наноразмерных материалов. При этом условия синтеза – гидродинамические, тепловые, массообменные должны быть адекватны требованиям к составу, строению и свойствам получаемых наноразмерных частиц.

В данной работе под управляемым синтезом подразумевается управление входными параметрами процесса по известным функциям связи с ними выходных переменных – характеристик частиц (состава, строения, свойств). При этом такие функциональные связи должны устанавливаться заранее, в ходе исследований.

В качестве входных (управляющих) параметров здесь понимаются: геометрия аппарата, включая точки ввода растворов, расходы каждого из растворов, модуляция расходов (при необходимости), рабочее давление процесса, время пребывания в каждой из зон (длительность стадий процесса), а также «стандартный» набор варьируемых параметров: состав и концентрации растворов, их температура, pH, используемый растворитель и т.п.

В качестве выходных переменных подразумеваются общие (средний размер кристаллитов, размеры агрегатов, удельная поверхность, структура материала, элементный состав и т.п.), и специфические (в зависимости от вида материала – (фото)каталитическая активность, магнитные, оптические, фотоэлектрические и др.) свойства.

В идеале для получения исключительно чистого продукта необходим некий метод, который позволял бы отбирать индивидуально ионы вещества А и соединять их с соответствующим числом ионов вещества Б (назовем его условно «нанопинцет»). Очевидно, такой тонкий инструмент достаточно сложно разработать и изготовить; кроме того, и производительность его будет, по-видимому, типично низкой для прецизионных приборов.

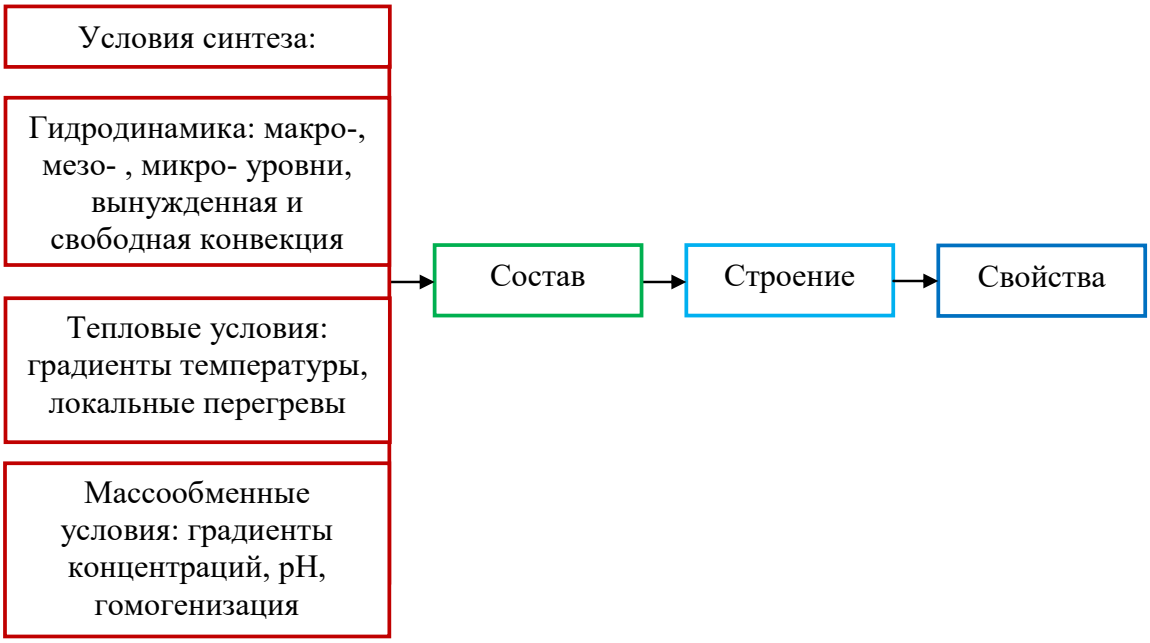


Рис. 1. Структурная схема влияния условий синтеза на состав, строение и свойства наноразмерных материалов.

На рис. 2 показано два случая (на примере синтеза $BiFeO_3$): первый – когда ионы исходных реагентов на макроскопическом объеме распределены равномерно, а на микроскопическом – крайне неравномерно (рис. 2а); второй – когда и на макро, и на микроуровне распределение ионов достаточно равномерное (рис. 2б). В первом случае на каждый ион висмута приходится различное число ионов железа, а во втором – соотношение ионов висмута и железа примерно равно 1:1, что и требуется по стехиометрии реакции. Очевидно, что в первом случае такое распределение ионов приведет к образованию примесных фаз с избытком Bi или Fe – со структурой силленита ($Bi_{25}FeO_{39}$) или муллита ($Bi_2Fe_4O_9$), а во втором можно ожидать гарантированного получения ортоферрита висмута $BiFeO_3$. По нашим данным [4] атомное отношение Bi : Fe в образцах, полученных при интенсивном смешении, до и после термообработки, по данным элементного анализа, остается на уровне Bi : Fe = (51 ± 2) : (49 ± 2) ат. %, что в пределах погрешности метода отвечает заданному при синтезе отношению, соответствующему стехиометрии $BiFeO_3$.

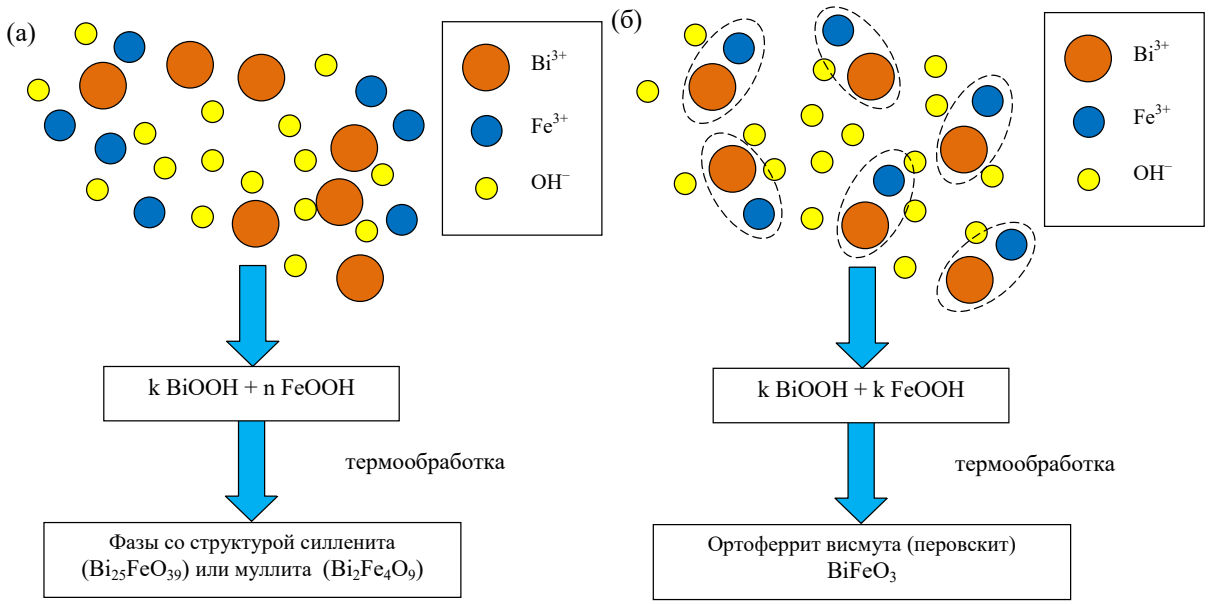


Рис. 2. Примеры влияния равномерности распределения ионов в растворе на состав и строение формируемых частиц: а) неравномерное распределение; б) равномерное распределение

В данной работе предлагается выделить следующие стадии процессов гетерогенной нуклеации на наноуровне, а также характеристические времена процессов и размеры частиц на различных стадиях гетерогенной нуклеаци:

1) Равномерное распределение ионов (атомов, молекул) в объеме раствора; 2) Образование кластеров докритического размера; 3) Образование зародышей из кластеров (агрегирование); 4) Рост зародышей (в состоянии обособления); 5) Ограничение роста частиц (предотвращение дальнейшей агрегации и агломерации).

Параллельно этим процессам следует организовать следующие процессы на микро- и макроуровнях (первый из них включает стадии 1 и 2 на наноуровне, остальные соответствуют стадиям 3-5):

I. Предварительное смешение; II. Сближение кластеров (интенсивное смешение в тонком слое/канале); III. Обособление зародышей; IV. Разделение частиц.

Гипотетическое прямое и непосредственное управление наноразмерными агрегатами потребовало бы высокоточного инструментария размером порядка 10^{-8}–10^{-7} м или менее, что, с одной стороны, технически труднодостижимо, с другой стороны – обладает низкой производительностью («обработка» единичных зародышей в течение 1-3 минут).

Следующим по пространственному масштабу является милли- и микроуровень (порядка 10^{-3}–10^{-4} м), который уже позволяет организовать массовое формирование наночастиц в потоке, при этом обладающих достаточно узким распределением размеров и одинаковым составом и свойствами. На данном (милли-

и микромасштабном уровне) управление процессом конвективного переноса кластеров с потоками жидкости (растворителя) является максимально допустимым из доступных способов приближения к масштабу самих агрегатов.

Еще более высокий макромасштабный уровень (порядка 10^0–10^{-2} м), характерный как для промышленных проточных кристаллизаторов размером 0.4–1.0 м, так и для вкладышей автоклавов для гидротермального синтеза (диаметром порядка 30-35 мм и высотой около 100 мм), лабораторных стаканов с магнитными и другими типами механических перемешивающих устройств (диаметром порядка 60-100 мм и высотой 100-150 мм) и других традиционных устройств подобного рода (в том числе ультразвуковых ванн), является, по нашему мнению, чрезмерно крупномасштабным, для тонкой регулировки микропотоков при проточной кристаллизации с целью формирования наноразмерных частиц.

Это связано с тем, что при перечисленных в этом абзаце традиционных способах и условиях формирования наночастиц в растворах размер вихрей несоизмеримо больше размеров наночастиц (так, для лабораторного реактора в виде конической колбы с внутренним диаметром нижней части 82 мм диаметр первичных вихрей порядка 82 мм, которые постепенно распадаются на более мелкие, до масштаба турбулентности Колмогорова), а уровень смешения (макроуровень) не обеспечивает должный уровень равномерности распределения веществ в объеме раствора. Наше специальное исследование, проведенное с помощью йодид-иодатной методики показало, что при частоте вращения якоря от 200 до 1000 об/мин индекс сегрегации составляет X_s = 0.5-0.55. Отметим для сравнения, что в микрореакторе со сталкивающими струями (МРСС) [5] получены следующие данные при дифференцированном отборе проб: на периферии Min(X_s) = 0.016, Max (X_s) = 0.021, в центре Min (X_s) = 0.0014, Max (X_s) = 0.010, средневзвешенное Min (X_s) = **0.011**, Max (X_s) = **0.018**. Таким образом, в МРСС индекс сегрегации в среднем **ниже в 28-45 раз**, чем в лабораторном реакторе с магнитной мешалкой. Это свидетельствует о крайне низком уровне микросмешения в последнем случае. Еще один эксперимент был проведен нами в том же лабораторном реакторе с магнитной мешалкой – нейтрализация 0.05 н NaOH, подкрашенного фенолфталеином, соляной кислотой HCl (35% масс.) при впрыске из шприца (see Supplementary materials – видео мешалки при 200 об/мин). Он продемонстрировал, что длительность процесса перехода от щелочной среды к нейтральной в процессе растворения HCl, сопровождающийся изменением окраски с малиновой на бесцветную, длится 3-5 секунд, при этом распределение окрашенных и бесцветных зон в объеме реактора с магнитной мешалкой крайне неравномерное.

Очевидно, что при таком распределении концентраций реагентов по объему реактора трудно ожидать получения высококачественных продуктов, обладающих высокой чистотой, заданным составом и свойствами.

Вместе с тем, при корректной организации процесса, когда происходит перенос энергии с милли- или микромасштаба – ближайшего к наноуровню, возможно достижение высоких показателей качества формируемых наночастиц. При этом микроуровень максимально приближен к наномасштабу, что исключает ненужные трансформации энергии при переходе от более крупного масштаба к меньшему (см. рис. 3).

При первичном образовании кластеров благодаря управляемым внешним воздействиям (т.е. позволяющим контролировать качество мезо- и микросмешения), например, в микрореакторах, обеспечивается формирование предзародышевых кластеров с размером меньше критического диаметра. При этом высокий уровень гомогенизации растворов позволяет добиться формирования частиц с требуемым составом, а в перспективе (в большинстве случаев – после термической обработки) – с необходимым строением и свойствами. Отметим, что эта стадия длится очень быстро (ее длительность оценивается в единицы миллисекунд).

На следующей стадии движение кластеров организовано так, что они с достаточно высокими скоростями сходятся в пространстве, т.е. концентрация кластеров на единицу объема возрастает, а значит, увеличивается вероятность их столкновения (рис. 4с), и выдерживаются некоторое время в таком состоянии. Отметим, что поле скоростей может быть не только сходящимся, но и центростремительным.

За этим следует процесс обособления зародышей, когда сформированные частицы расходятся в потоке за счет векторов скорости жидкости направленных от оси аппарата. Здесь поле скоростей может быть расширяющимся и/или центробежным.

Очевидно, что последующее обособление должно служить для стабилизации полученных наноразмерных частиц или их агрегатов. Для этих целей могут быть применены различные способы – заморозка полученной суспензии, разбавление полученного продукта.

В таблице 1 показано несколько примеров аппаратурной реализации перечисленных выше процессов.

В микрореакторе со сталкивающимися струями [6] (слева вверху в табл. 1) смешение растворов и сближение кластеров совмещено и происходит в зоне столкновения струй; там же происходит и агрегирование. Далее смесь растворов переходит в жидкостную пелену, скорость движения в которой преимущественно радиальная u_r, благодаря чему происходит первичное обособление зародышей. Следует отметить, что если в дальнейшем полученную суспензию поместить в емкость небольшого объема, где частицы могут оседать, то возникает риск агломерации.

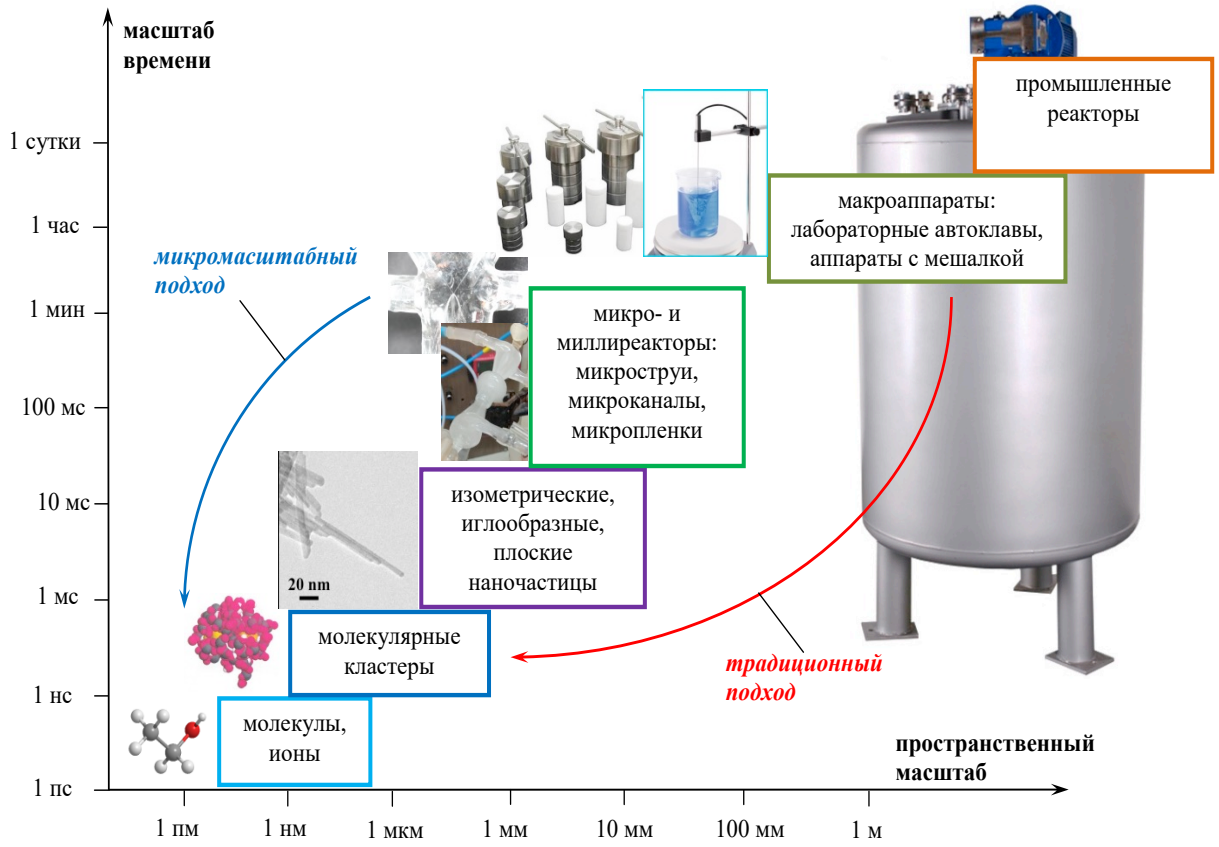
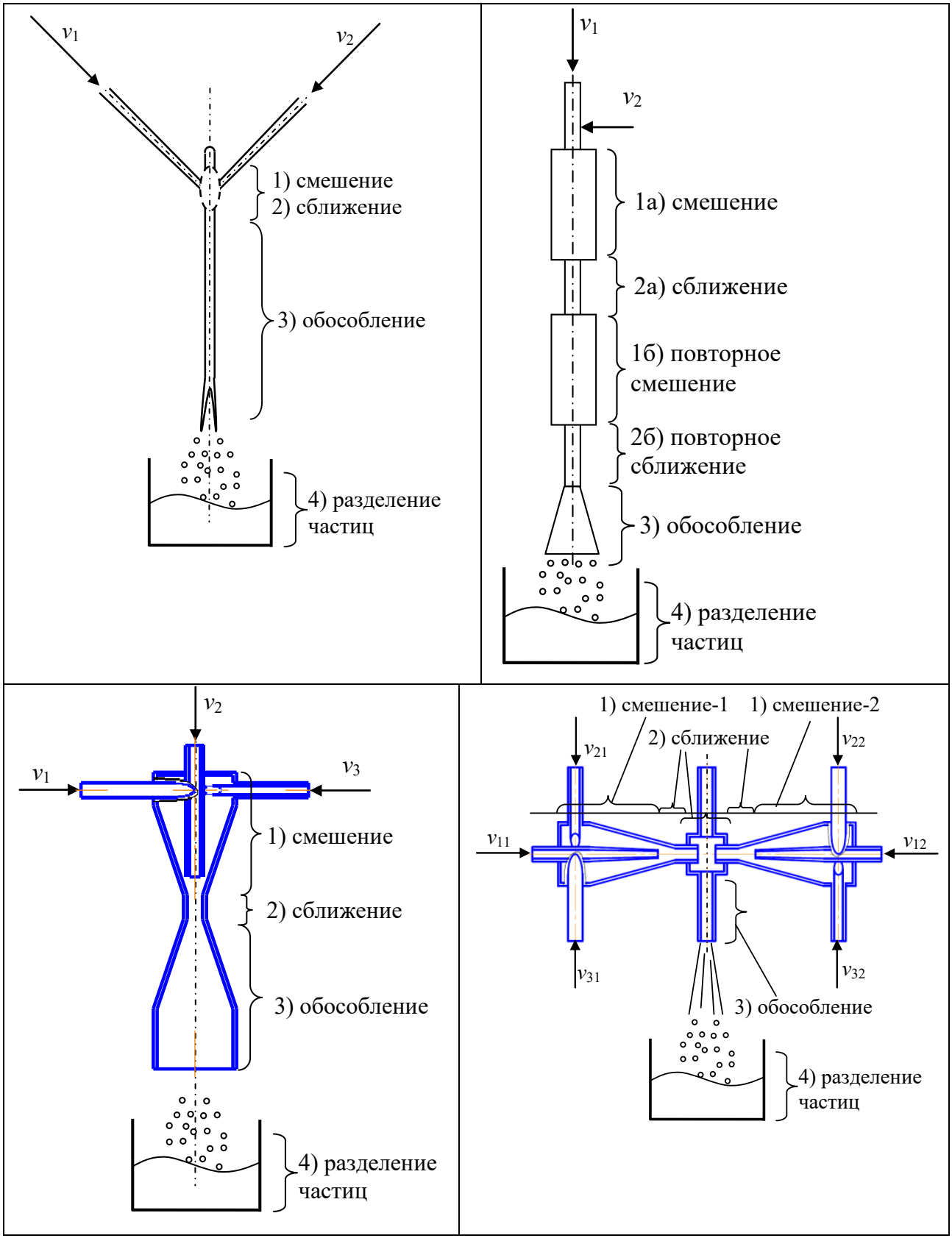


Рис. 3. Пространственные и временные уровни формирования наноразмерных частиц

В микрореакторе с периодически изменяющимся поперечным сечением (сокращенно – микро-ПАПТ) [7] (справа вверху в табл. 1) смешение происходит в зоне сопряжения входных патрубков и за ним, агрегирование – в горловинах аппарата, обособление – в зонах расширений. Особенностью данного аппарата является многократно повторяющиеся процессы агрегирования и обособления, что позволяет тонко контролировать скорость этих двух противоположных по направлению процессов.

В микрореакторе с закрученными потоками (другое название – микровихревой струйный аппарат, микро-ВСА) [8] (слева внизу в табл. 1) смешение растворов и сближение кластеров совмещено в конфузоре (сближение – у входа в горловину), где потоки растворов закручиваются и перемещаются к горловине. Агрегирование кластеров происходит преимущественно в горловине аппарата, а обособление – при раскрутке и расширении потока в диффузоре. В этом аппарате можно смешивать два и более растворов, причем один из них можно подавать в зону непосредственно перед горловиной, где микросмешение наиболее интенсивное.

Таблица 1. Примеры осуществления процессов синтеза в микрореакторах различных типов.



В микрореакторе со встречными закрученными потоками (сокращенно – микро-ВСА-ВЗП) [9] (справа внизу в табл. 1) могут смешиваться растворы сначала в «мягком» режиме (в каждом из конфузоров). Здесь смешение и сближение кластеров осуществляется за счет сужения и интенсивной двусторонней (встречной – при подаче в противоположные конфузоры или сонаправленной – при подаче в один и тот же конфузор) закрутки потоков растворов. Агрегирование кластеров происходит в двух горловинах, а также в центральной смесительной камере, где вторичное смешение подаваемых встречно растворов происходит преимущественно в осевом зазоре между соплами и вокруг них. На периферии этой камеры и на выходе из нее происходит обособление кластеров.

В двухфазных микрореакторах микросмешение существенно интенсифицируется благодаря тейлоровским вихрям, возникающим как в сплошной, так и в дисперсной фазе. Интенсификация межфазного переноса вещества описана в работе [10], а в [11] показано, что основным фактором, определяющим качество микросмешение, является частота вращения тейлоровского вихря. В работе [12] представлена математическая модель процесса конвективно-диффузионного переноса, подтвержденная масштабными исследованиями французских [13] и немецких [14] коллег. В обзорной статье [15] продемонстрированы возможности синтеза в двухфазных микрореакторах при сегментированном (тейлоровском) течении – квантовых точек, суперпарамагнитных оксидов железа, серебро, цеолитов, $CaCO_3$, $BaSO_4$, TiO_2, γ-AlOOH, β-FeOOH и др., а также материалов со структурой ядро/оболочка, например, SiO_2/Au и Au/Ag/Au.

Выводы

Использованный системный подход к процессу гетерогенной нуклеации, как показано в данной работе, позволяет синтезировать новые аппараты на основе элементарных процессов гетерогенной нуклеации. Уже на данном этапе исследований можно утверждать, что полученные результаты по многим параметрам подтверждают главный результат: интенсификация микросмешения позволяет управлять процессом синтеза наноразмерных частиц. В настоящее время при участии автора (совместно с коллегами из СПбГТИ, ФТИ, ЛЭТИ, ИХС, ИОФ) с использованием микрореакторных методов синтезированы наноразмерные частицы следующих материалов: $CoFe_2O_4$, $BiFeO_3$, $GdFeO_3$, TiO_2, иттрий-алюминиевый гранат $Y_3Al_5O_{12}$, $LaPO_4$, t-ZrO_2 + Y_2O_3, магнетит (γ-Fe_2O_3+ Fe_3O_4), CaF_2, SrF_2, Bi_2O_3-Fe_2O_3-WO_3 и ряд других соединений (из-за ограничений на объем статьи здесь не могут быть приведены ссылки на все работы; публикации по некоторым из перечисленных наноматериалов готовятся к печати).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 20-63-47016.

Литература:

1. Teychené S., Rodríguez-Ruiz I., Ramamoorthy R.K., Reactive crystallization: From mixing to control of kinetics by additives. Curr. Opin. Coll. & Interface Sci. 2020, 46:1–19.

2. Besselink R., Rodriguez-Blanco J.D., Stawski T.M., Benning L.G., Tobler D.J.: How short-lived Ikaite affects calcite crystallization. Cryst Growth Des. 2017, 17:6224–6230.

3. O. V. Almjasheva, V. V. Gusarov, Metastable clusters and aggregative nucleation mechanism. Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, 2014, 5 (3), P. 405-416.

4. R. Sh. Abiev, O. V. Proskurina, M. O. Enikeeva, V. V. Gusarov, Effect of Hydrodynamic Conditions in an Impinging-Jet Microreactor on the Formation of Nanoparticles Based on Complex Oxides. Theor. Found. Chem. Eng., 2021, V. 55, No. 1, pp. 12–29.

5. R.Sh. Abiev, A.A. Sirotkin, Influence of Hydrodynamic Conditions on Micromixing in Microreactors with Free Impinging Jets. Fluids, 2020, V. 5, Iss. 4, 179.

6. Абиев Р.Ш., Альмяшева О.В., Гусаров В.В., Изотова С.Г. Способ получения нанопорошков феррита кобальта и микрореактор для его реализации. Патент РФ № 2625981, Б.И. 20, 2017, Заявка №2016137231 от 16.09.2016.

7. Абиев Р.Ш. Способ проведения массообменных и реакционных процессов в системах жидкость-жидкость, жидкость-газ и аппарат для его реализации (варианты). Патент РФ № 2342990, Б.И. 1, 2009.

8. Абиев Р.Ш. Микрореактор с закрученными потоками растворов реагентов. Патент РФ № 2736287, Б.И. 32, 2020. Заявка № 2019135251, 01.11.2019.

9. Абиев Р.Ш. Микрореактор-смеситель со встречными закрученными потоками. Патент РФ № 2744173, Б.И. 7, 2021. Заявка № 2020130896, 18.09.2020.

10. R.Sh. Abiev, Y.N. Pavlyukova, O.M. Nesterova, S.D. Svetlov, V.A. Ostrovskii, Mass Transfer Intensification of 2-Methyl-5-Nitrotetrazole synthesis in Two-phase Liquid-Liquid Taylor Flow in Microreactor. Chemical Engineering Research and Design, 144, (2019), pp 444-458.

11. R.Sh. Abiev, C. Butler, E. Cid, B. Lalanne, A.-M. Billet, Mass transfer characteristics and concentration field evolution for gas-liquid Taylor flow in milli channels. Chem. Eng. Sci. 207 (2019) 1331–1340.

12. R.Sh. Abiev, Gas-liquid and gas-liquid-solid mass transfer model for Taylor flow in micro (milli) channels: A theoretical approach and experimental proof. Chemical Engineering Journal Advances 4 (2020) 100065

13. Mei Mei, Hydrodynamique et transfert de matière gaz-liquide autour des bulles de Taylor: études locales utilisant une technique colorimétrique pendant la phase d'écoulement dans un milliréacteur plan en forme de spirale et pendant le processus de

formation de bulles dans une géométrie en croix. Thèse en vue de l'obtention du Doctorat de l'Université de Toulouse. Le 14 avril 2021.

14. Woo, M., Tischer, S., Deutschmann, O., Wörner, M. A step toward the numerical simulation of catalytic hydrogenation of nitrobenzene in Taylor flow at practical conditions. Chem. Eng. Sci. 230 (2021) 116132.

15. A.M. Nightingale, J.C. deMello, Segmented Flow Reactors for Nanocrystal Synthesis. Adv. Mater. 2013, 25, 1813–1821.

УДК 621.521

НОВЫЕ СОВМЕСТНЫЕ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ ПОЛУЧЕНИЯ «СУХОГО» ВАКУУМА АО «ВАКУУММАШ» И КНИТУ

Бурмистров Алексей Васильевич,
Капустин Евгения Николаевича
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
АО «Вакуумаш»,
E-mail: burm@kstu.ru

Вакуум нашел широкое применение в самых различных процессах химической технологии, связанных, в первую очередь с переработкой высококипящих и высокомолекулярных соединений с малой термической стабильностью. Классикой вакуумных технологий уже давно стали ректификация, дистилляция, выпарка, сушка продуктов от влаги и органических соединений и т.д. Вакуум позволяет снижать требуемые температуры нагрева продуктов в системах разделения и за счет этого исключить или резко снизить нежелательные процессы термодеструкции и осмаливания. Причем в настоящее время проявляется тенденция применения вакуума даже в производствах, традиционно использовавших и другие приемы для снижения парциального давления разделяемых компонентов и температуры их кипения, например ввод в систему инертных компонентов или водяного пара. Так ввод водяного пара сопровождается превнесением в систему загрязняющих компонентов, что приводит к снижению качества целевых продуктов.

Вакуум в системах разделения создается и поддерживается с помощью самых различных вакуумсоздающих систем (ВСС). К настоящему времени разработано и используется в промышленных условиях довольно большое количество типов ВСС. Долгие годы основными средствами откачки являлись пароэжекторные насосы [1] или агрегаты на базе жидкостно-кольцевых насосов, в том числе с предвключенным воздухо-воздушным эжектором для снижения остаточного давления [2]. В ряде случаев применялись вакуумные насосы с масляным уплотнением, например плунжерные, работающие с газобалластным устройством, что частично предотвращало конденсацию паров в насосах. При этом на вход насосов устанавливались различные ловушки [3]. Однако в ряде случаев даже незначительное загрязнение продукта парами рабочей жидкости насоса является недопустимым. Не стоит забывать и о том, что само вакуумное масло может загрязняться и разлагаться под воздействием паров, попадающих из технологического процесса.

Поэтому в последнее время в химических технологиях отмечается устойчивая тенденция перехода на «сухой» вакуум, без использования насосов,

содержащих какую-либо рабочую жидкость, будь то вода, водяной пар или вакуумное масло. В вакуумной технике к таким машинам, обеспечивающим получение низкого и среднего вакуума, относятся спиральные, винтовые, кулачково-зубчатые и двухроторные насосы [4. 5]

Основным производителем вакуумных насосов в России был и остается АО «Вакууммаш» (г. Казань), который исторически производил хорошие и надежные вакуумные насосы, но работающие с использованием вакуумного масла.

До начала XXI века из названных выше «сухих» машин в России на АО «Вакууммаш» серийно выпускались лишь насосы вакуумные двухроторные (НВД), да и то две машины с быстротой действия 200 и 600 $м^3$/ч. Такие быстроты действия хороши для лабораторных условий, но никак не закрывают потребности химических производств.

В целях реализации программы импортозамещения 2013 году АО «Вакуумммаш» совместно с КНИТУ при поддержке Министерства образования и науки РФ начали проект по разработке и созданию производства первого в России безмасляного спирального вакуумного насоса. В результате реализации данного проекта был создан типоразмерный ряд вакуумных спиральных насосов (НВСп) производительностью 4, 12, 35 и 60 $м^3$/час и организовано высокотехнологичное серийное производство безмасляных спиральных вакуумных насосов (рис. 1). Данные машины позволяют получить безмасляный вакуум до 1Па.

В процессе реализации проекта [6] удалось снизить стоимость спиральных насосов по сравнению с зарубежными аналогами благодаря оптимизации конструкции насоса, выбору оптимальных соотношений основных размеров роторного механизма (включая использование запатентованного профиля спирали) и замещению дорогостоящих комплектующих иностранного производства на отечественные, в том числе собственного производства.

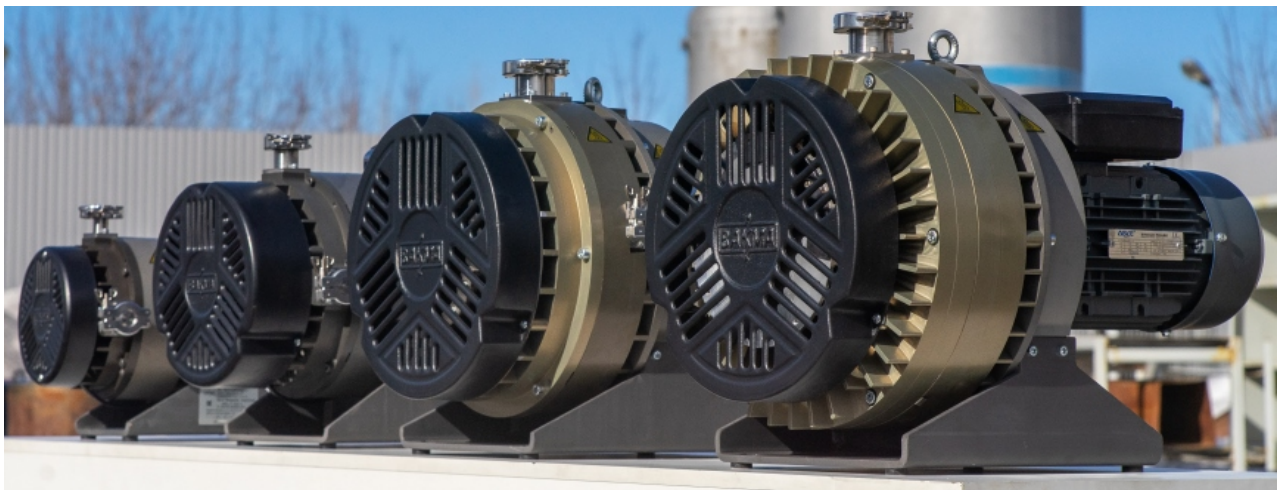


Рис. 1. Типоразмерный ряд спиральных вакуумных насосов НВСп

Продолжением работы по «сухим» вакуумным насосам стал проект по разработке и созданию новой линейки «больших» двухроторных насосов типа Рутс, которая будет включать в себя машины с быстротой действия от 1000 до 4000 м^3/час. Насосы уже прошли первые испытания и подтвердили заявленные характеристики. Стоит отметить, что в насосах НВД используется запатентованный эллиптический профиль [7, 8]. Данные насосы будут выпускаться для различных применений и с различными вариантами защиты от перегрузки при повышении входного давления – и с байпасной перепускной линией или с частотным приводом, снижающем частоту вращения электродвигателя.

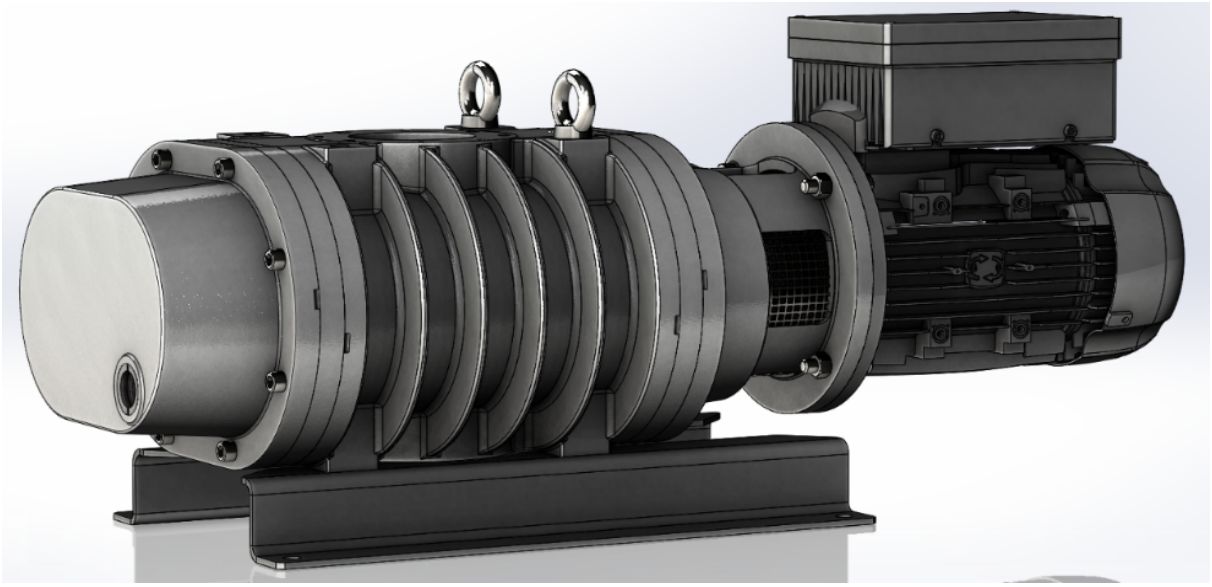


Рис. 2. Двухроторный вакуумный насос НВД-1000 с частотным приводом

Возможно самый важный проект для нефтехимии и нефтепереработки -разработка и освоение производства принципиально новых России «сухих» машин, наиболее подходящих для откачки запыленных, агрессивных, газовых и парогазовых сред. Речь идет о винтовых вакуумных насосах НВВ 250 и 600 м^3/ч.

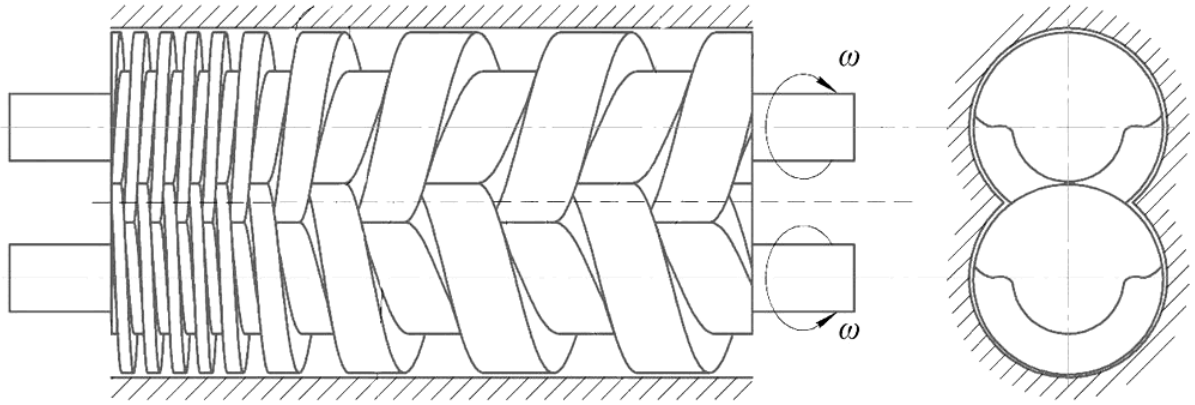
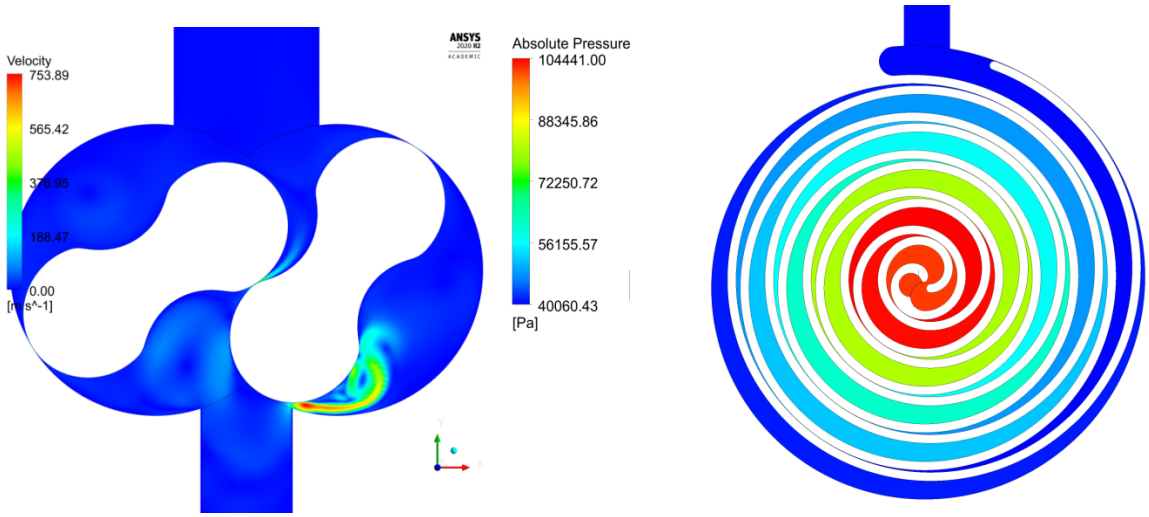


Рис. 3. Схема винтового вакуумного насоса

Этот тип насосов сочетает в себе все преимущества, присущие в отдельности остальным типам безмасляных насосов: высокая удельная быстрота действия

на единицу массы, низкое предельное остаточное давление (до 0,5 Па) благодаря полному внутреннему сжатию, практически отсутствуют ограничения по быстроте действия. Особенности конструкции роторного механизма делает этот тип насосов достаточно невосприимчивым к загрязнениям (пыли, капельной влаге) и позволяет его использовать в очень «грязных» промышленных технологических процессах. Внутреннее сжатие в данных машинах достигается за счет изменения шага винтовых роторов от входа к выходу (рис.3).

Естественно, что разработке рабочей конструкторской документации предшествовала глубокая научная проработка, включающая создание математических моделей насосов [9, 10], учитывающих тепловые деформации рабочих механизмов [11], обратные перетекания через зазоры с учетом подвижности стенок [12], другие факторы. Стоит отметить, что последнее время активно используются методы вычислительной гидрогазодинамики (CFD) (рис.4.).



а б

Рис 4. Поля скоростей в насосе Рутса (а) и давлений в спиральном насосе (б)

В результате совместной работы специалистов КНИТУ и АО «Вакууммаш» отечественная химическая технология получила целый ряд новых высокоэффективных «сухих» машин.

Литература:

1. Хайрутдинова С.С., Брондз Б.И., Ибрагимов И.Г. Совершенствование вакуумсоздающих систем на установках первичной переработки нефти. //Актуальные проблемы нефтехимии. – Уфа, 1982. – с.71-72.

2. Райзман И.А. Повышение вакуума, создаваемого жидкостнокольцевым вакуум-насосом с помощью воздушной эжекторной приставки: Информац. листок / И.А. Райзман, А.И. Рудаков // ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, N0037-73.

3. Механические вакуумные насосы / Е. С. Фролов, И. В. Автономова, В. И. Васильев и др. – М. : Машиностроение, 1989. – 288 с.

4. Бурмистров, А.В. Некоторые аспекты выбора безмасляных насосов среднего вакуума / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев, А.А. Райков // Вестник Казанского технологического университета. - 2013, Т.16. – № 10. - С. 220-223.

5. Бурмистров А.В. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: дис…докт.техн.наук / А. В. Бурмистров; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2006. - 363с.

6. Капустин, Е.Н. Создание высокотехнологичного производства безмасляных спиральных вакуумных насосов в России / Е.Н. Капустин, А.Е. Капустин, А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014, Т.17. - № 19 - С. 280 -283.

7. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Влияние геометрических параметров эллиптического профиля на характеристики двухроторных вакуумных насосов типа Рутс // Компрессорная техника и пневматика. – 2004. - № 6. - С. 38-40.

8. Патент № 2730769 Российская федерация, МПК F04C 25/02 (2020.02); F04C 18/126 (2020.02). Двухроторная машина: №2020107745: заявл. 19.02.2020: опубл. 25.08.2020 / Исаев А.А., Саликеев С.И., Бурмистров А.В., Райков А.А., Бронштейн М.Д., Капустин Е.Н.; заявитель и патентообладатель АО «Вакууммаш» Бюл. № 24 – 10 с. : ил. - Текст: непосредственный.

9. Саликеев, С.И. Единый подход к расчету откачных характеристик бесконтактных безмасляных вакуумных насосов / С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров, А.А. Райков// Компрессорная техника и пневматика. - 2013, – № 4. - С.37-42.

10. Salikeev S. Non-contact vacuum pumps. A general-purpose method for conductance calculation of profile slot channels / S. Salikeev, A. Burmistrov, M. Bronshtein, M. Fomina // Vakuum in Forschung und Praxis. - 2014. - Vol. 26. - Is. 1. – P. 40-44.

11. Паранин, Ю.А. Математическая модель рабочего процесса спиральных машин сухого сжатия в условиях сплошной среды (часть 1) / Ю.А. Паранин, Р.Р. Якупов, А.В. Бурмистров // Вестник Казанского технологического университета. – 2013 , Т.16. - № 19- С. 267-271.

12. Прямые и обратные потоки в бесконтактных вакуумных насосах: монография / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев, М.Д. Бронштейн. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2009. -232 с.

УДК 66.023.2

ПРИМЕНЕНИЕ МАЛООБЪЁМНЫХ РОТОРНО-ДИСКОВЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ

Лапонов Сергей Владимирович
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(филиал в г. Стерлитамаке),
E-mail: str@rusoil.net

Одними из распространённых процессов, используемых в промышленности, являются процессы смешения. Для проведения этого процесса используются смесительные аппараты различных типов и конструкций. Одним из них является малообъемный роторно-дисковый смеситель (РДС). К преимуществам этих аппаратов можно отнести малые габаритные размеры, высокое качество смеси, низкое энергопотребление, высокий ресурс [1,2].

Известно большое количество типов РДС (таблица 1).

Таблица 1 - Классификация малообъемных роторно-дисковых смесителей.

Признак классификации	**Тип аппарата**
По расположению рабочих органов в корпусе	- погружные; - проточные; - встроенные.
По способу подвода компонентов	- с подачей в общий патрубок; - с раздельной подачей.
По расположению приводного вала	- с вертикальным валом; - с горизонтальным валом.
По количеству камер	- однокамерные; - многокамерные.
По способу соединения камер	- последовательное; - параллельное; - смешанное.
По числу ступеней	- одноступенчатые; - многоступенчатые.
По наличию дополнительных рабочих органов	- без дополнительных рабочих органов; - с дополнительными рабочими органами.
По наличию перемещения дополнительных рабочих органов	- без дополнительных перемещений; - с осевым перемещением; - с колебательным движением.
По состоянию поверхности рабочих органов	- гладкая поверхность; - рифленая поверхность

Наибольшее распространение получили РДС с гладкими дисками, имеющими жесткозакрепленные дополнительные рабочие органы. Они отличаются хорошей производительностью, более высоким качеством смеси, и относительно низким удельным энергопотреблением. Кроме того, они хорошо зарекомендовали себя в качестве реактора для проведения различных химических реакций в системах жидкость-жидкость, газ-жидкость, благодаря созданию мелкодисперсных смесей [3]. Более эффективными являются ДРС с дополнительными рабочими элементами, жёстко закреплёнными на поверхностях дисков. Дополнительные рабочие элементы (зубья), приваренные к поверхностям дисков, создают высокотурбулентные потоки жидкости в рабочей зоне аппарата (рис. 1).

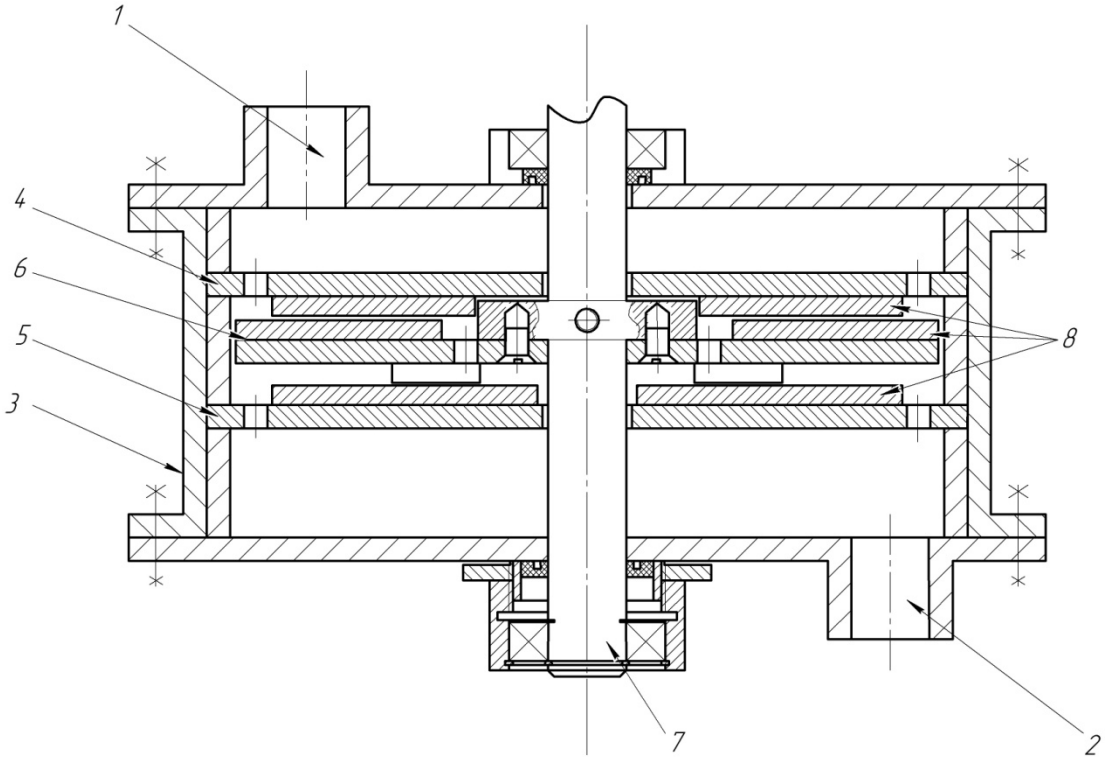


Рисунок 1 - Малообъемный роторно-дисковый смеситель:
1 - загрузочный патрубок, 2 - разгрузочный патрубок, 3 - цилиндрический корпус, 4 и 5 - верхний и нижний неподвижные диски соответственно, 6 - подвижный диск, 7 - вал, 8 - дополнительные рабочие органы

Малообъемный роторно-дисковый смеситель работает следующим образом: обрабатываемая среда поступает через входной патрубок, под действием массовых сил или искусственно создаваемого перепада давления продвигается к выходному патрубку. Проходя через рабочую зону аппарата, обрабатываемая среда подвергается интенсивному механическому и гидродинамическому воздействию со стороны рабочих органов. Зубья на вращающемся диске, при вращении последнего, способствуют созданию высокотурбулентных потоков, а также придают потокам вращательное движение. Тем самым при совпадении

частоты перекрытия перфораций и частоты вихреобразования генерируются пульсации давлений, положительно влияющих на процесс дробления капель дисперсной фазы. Частота пульсаций пропорциональна скорости вращения вала и количеству зубьев на дисках.

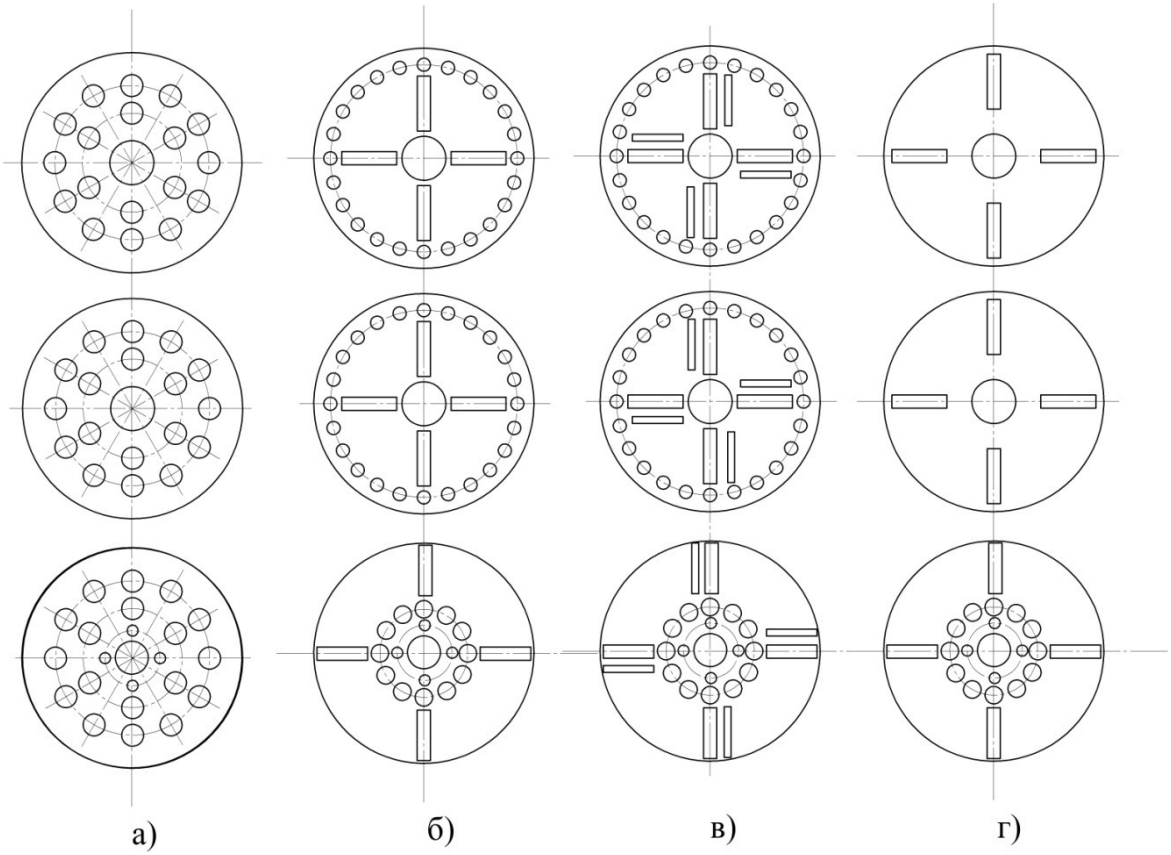


Рисунок 2 - Некоторые конструкции рабочих органов

Конструкция малообъемного роторно-дискового смесителя позволяет проводить установку в корпус подвижных и неподвижных дисков различных конструкций. На рисунке 2 представлены четыре комплекта дисков, имеющих различные конструктивные особенности. Первый комплект (рисунок 2, а) состоит из гладких перфорированных дисков. Отверстия расположены таким образом, что при вращении ротора они поочередно совпадают и перекрываются с отверстиями подвижного диска. Обрабатываемая среда, проходя через рабочий объем аппарата, подвергается интенсивному механическому и гидродинамическому воздействию со стороны рабочих органов. Второй комплект (рисунок 2, б) состоит из двух неподвижных дисков с расположенными по периферии отверстиями и одного подвижного диска с отверстиями расположенными по центру диска. На нижней стороне верхнего неподвижного, на верхней стороне нижнего неподвижного и на обеих сторонах подвижного диска имеются дополнительные рабочие органы в виде зубьев (лопаток) прямоугольного сечения, приваренных к дискам радиально. Третий комплект (рисунок 2, в) отличается от второго

наличием прорезей по длине зуба на расстоянии от его основания, равной высоте. Четвертый комплект (рисунок 2 г) состоит из гладких неподвижных дисков с прорезями и расположенного между ними подвижного диска с отверстиями, расположенными по центру, и радиально расположенными зубьями, причем прорези на неподвижных дисках повторяют форму и расположение зубьев на подвижном диске. При вращении ротора зубья на подвижном диске перекрывают прорези на неподвижных дисках с определенной частотой и генерируют пульсации скорости жидкости.

Зазор между дисками выбирается посредствам осевого перемещения вала и изменением высоты проставочных колец, удерживающих неподвижные диски. Экспериментальные исследования показали, что максимальная эффективность перемешивания достигается при наименьшем зазоре между зубьями. Однако по конструктивным соображениям минимальный зазор не следует устанавливать менее 1 мм ввиду осевого смещения вала и нарушения соосности из-за износа подшипников.

Среди большого количества способов исследования дисперсного состава эмульсии, наиболее часто используют методы седиментации, фотометрический и расчетный. Метод седиментации заключается в определении размеров капель дисперсной фазы по времени отстаивания. К недостаткам этого метода можно отнести долгое время отстаивания, относительно невысокую точность, большое влияние внешних воздействий (температура окружающей среды, вибрации и т.д.). Расчетный метод заключается в определении усредненного размера дисперсных частиц исходя из мощности, затраченной на перемешивание, посредством выведенных формул. Данный метод трудоемок и имеет место высокая погрешность. Фотометрический метод является относительно быстрым, точным, простым и позволяет определить распределение дисперсных частиц по размерам. Исследование фотометрическим методом проводят следующим образом:

1. выполняется забор эмульсии на выходе из смесителя;
2. проба выдерживается в пробирке 1-3 минут (это необходимо для остановки вихревых потоков в объеме эмульсии);
3. при помощи пипетки помещают каплю эмульсии на предметное стекло микроскопа и покрывают сверху покровным стеклом;
4. исследуют эмульсию под микроскопом, при необходимости делается рад снимков (рисунок 3).

Если основная и дисперсная фазы трудно различимы, то в месте ввода компонентов смеси в аппарат, дополнительно вводят краситель который растворяется только в основной или дисперсной фазе.

В качестве эталонных компонентов обрабатываемой смеси, для проведения экспериментальных исследований, использовались вода (ρ=998 кг/м^3,

динамическая вязкость 1004 мкПа·с, кинематическая вязкость $1{,}006 \cdot 10^{-6}$ м^2/с, поверхностное натяжение 0,07 Н/м (при 293К) и дизельное топливо (ρ=860 кг/м^3, динамическая вязкость 560 мкПа·с, кинематическая вязкость $0{,}62 \cdot 10^{-6}$ м^2/с (при 293К) с объемным отношением д.т./вода = 1/5 и объемным расходом Q=0,2 м^3/ч. Объем рабочей зоны РДС - 0,8 л.

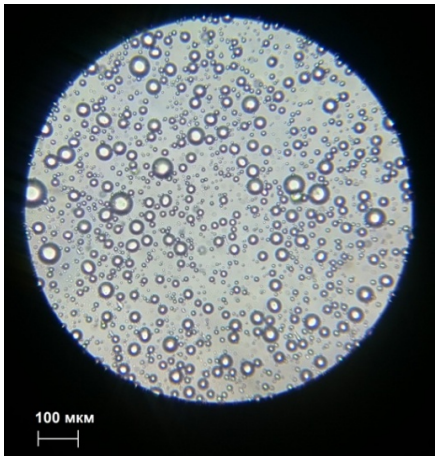


Рисунок 3 - Фотография эмульсии

Из зависимости (рисунок 4) видно, что с увеличением зазора между дисками увеличивается усредненный размер дисперсных частиц. Это связано с уменьшением воздействия зубьев на обрабатываемую среду в рабочей зоне аппарата. Начальная высота зуба равна толщине диска и не превышает 5 мм, следовательно зазор 5мм говорит о практически полностью изношенном рабочем элементе. Компенсируя износ, с целью сохранения дисперсных частиц достаточно малого, для проведения процесса, размера увеличивают скорость вращения вала, что приводит к дополнительным энергозатратам.

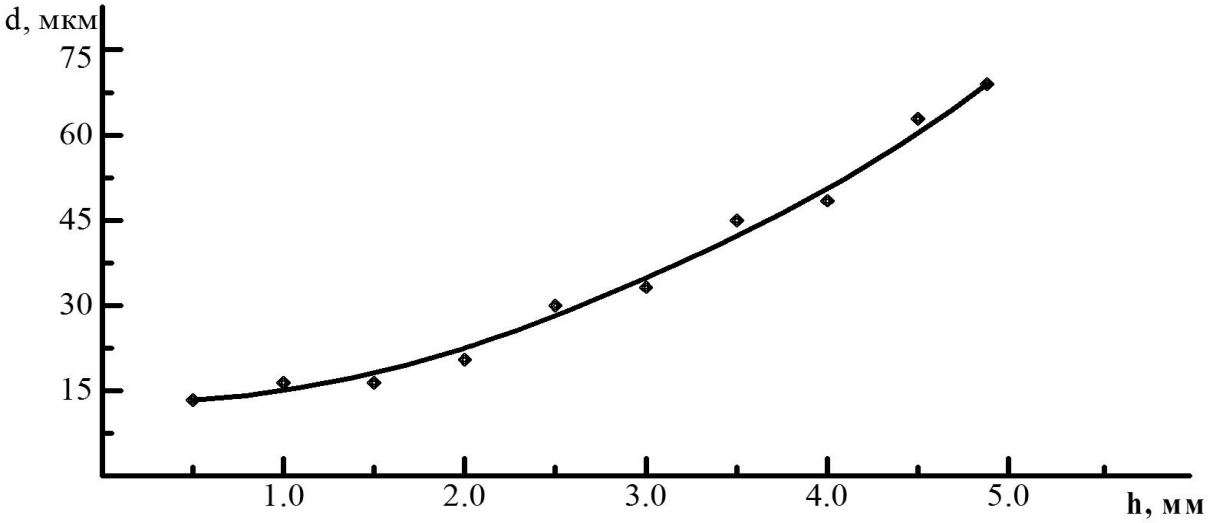


Рисунок 4 - Зависимость усредненного размера дисперсных частиц d от зазора между вращающимися и неподвижными дисками h при скорости вращения ротора n=1500 об/мин

Из графика (рисунок 5) видно, что с увеличением скорости вращения ротора РДС возрастает потребляемая мощность на обработку смеси. Что, в свою очередь, приводит к удорожанию единицы продукции, однако значительно повышается эффективность перемешивания [4].

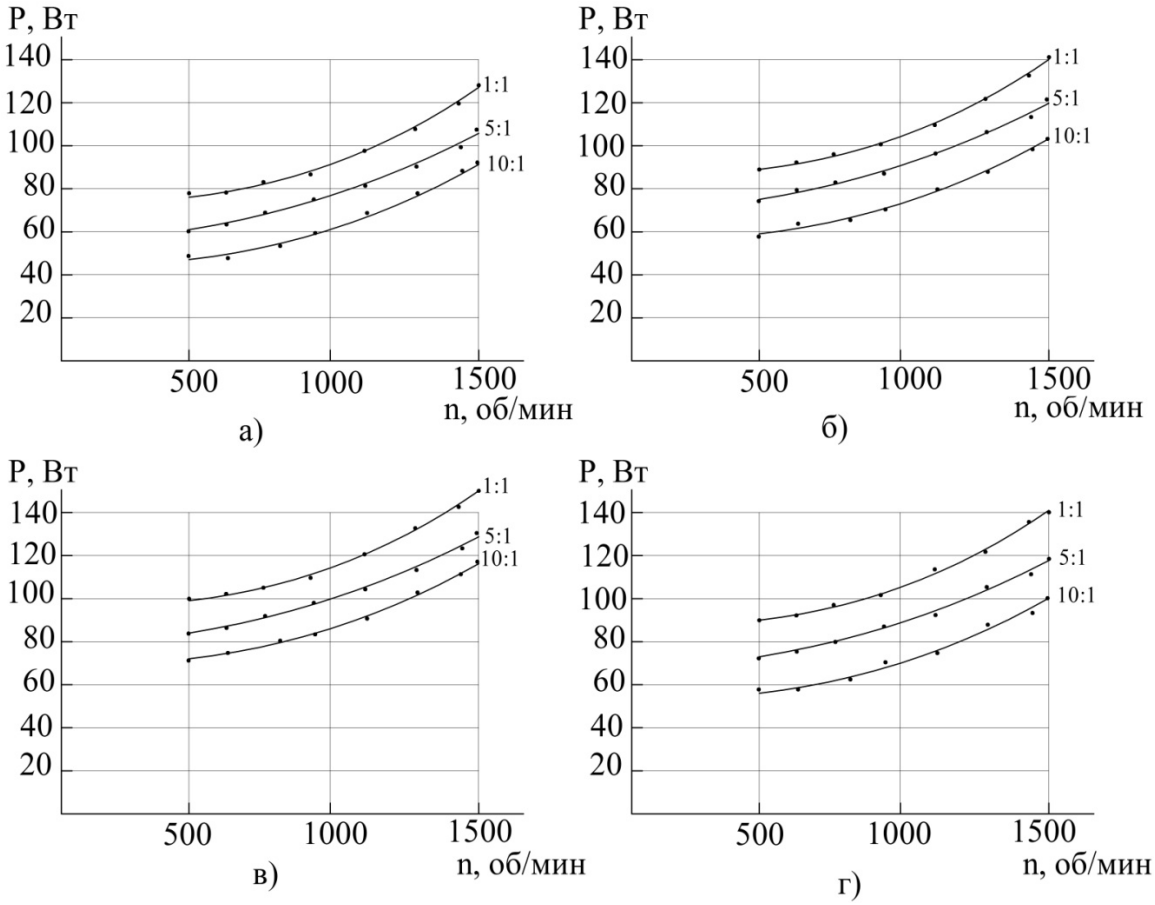


Рисунок 5 - Зависимость потребляемой мощности на перемешивание от скорости вращения ротора при различных соотношениях вода/дизельное топливо, а) для первого, б) второго, в) третьего, г) четвертого комплектов дисков

Из зависимостей (рисунок 6) видно, что с увеличением объемной доли дисперсной фазы усредненный размер частиц увеличивается вследствие повышения концентрации и частоты столкновения дисперсных частиц приводящих к коалисценции. Установлено, что размер частиц дисперсной фазы уменьшается обратно пропорционально скорости вращения ротора [5].

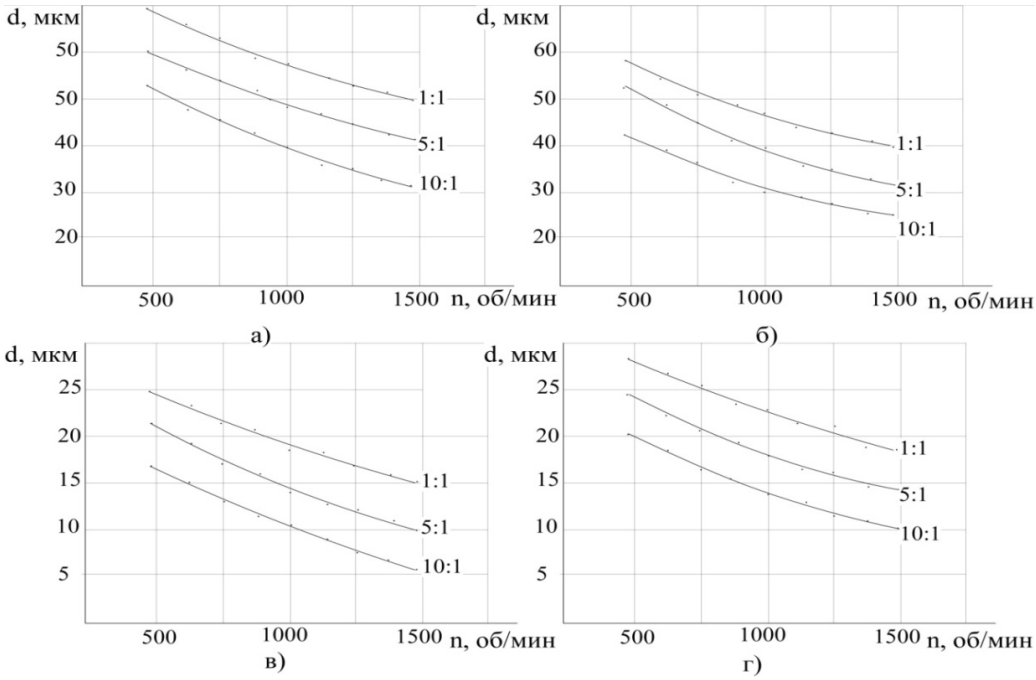


Рисунок 6 - Зависимости усредненного размера дисперсных частиц от числа оборотов ротора при объемном расходе смеси Q=0,2 м^3/ч, а) первый, б) второй, в) третий, г) четвертый комплект дисков.

Литература:

1. Шулаев Н.С., Николаев Е.А., Иванов С.П. Малообъемные роторно-дисковые смесители. - М.: Химия, 2009. - 186 с.

2. Лапонов С.В., Иванов О.С. Перспективы применения роторно-дисковых смесителей в процессах химической технологии//Вестник молодого ученого УГНТУ 2015 №1(01) 16 с.

3. Пат. РФ №161841 Российская Федерация, МПК B02C 7/08. Роторный измельчающий смеситель / Лапонов С.В., Шулаев Н.С., Ибрагимов И.Г., Иванов С,П, Бондарь К.Е. // Заявлено 20.11.2015. Опубл. 10.05.2016.

4. Лапонов, С.В. Особенности эмульгирования в роторно-дисковых смесителях / С.В. Лапонов, Н.С. Шулаев, И.Г. Ибрагимов, С.П. Иванов // Нефтегазовое дело. 2016. Т.14. №4. С. 126-129.

5. S.V. Laponov. Modeling of emulsification processes in rotary-disk mixers. Earth and Environmental Science / S.V. Laponov, N.S. Shulaev, S.P. Ivanov, D.F. Suleimanov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 87. – P. 082028.

Секция 1

УДК 532.73+53.043+617

МАССОПЕРЕНОС ИЗ ПОРИСТОГО МАТРИКСА В ПОТОКЕ СУБ И СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Абдрахманов Г.А., Максудов Р.Н., Аляев В.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: gor130299@gmail.com

В настоящее время при повреждениях и разрушениях опорных тканей организма проводится их полное восстановление с помощью, в том числе, препаратов биогенной природы. Обработка сверхкритическим диоксидом углерода позволяет стерилизовать материал против ряда бактерий и вирусов, сохраняя при этом механические свойства кортикальной кости [1, 2].

В настоящей работе ставилась задача исследовать влияние параметров процесса на эффективность извлечения экстрактивных соединений из недеминерализованного костного матрикса ксеногенного происхождения суб- и сверхкритическим диоксидом углерода; осуществить термодинамическое моделирование растворимости извлекаемых компонентов как функции плотности и температуры растворителя по методу [3].

Эксперименты проводились при давлениях 200 и 300 бар на изотермах 20°C, 25°C, 35°C и 40°C. Ограничение по температуре определяется термической неустойчивостью факторов роста в составе матрикса. Моделирование процесса извлечения [4] позволило оценить начальное содержание извлекаемого «псевдокомпонента» в каждом образце, получить кривые извлечения в долях от начального содержания и оценить влияние параметров процесса на его эффективность. В соответствии с моделью, растворимость экстракта определялась корреляцией кривых выхода от массы использованного растворителя. Наклон линейного участка Y, зависящий от соотношения «количество извлеченного компонента - количество использованного растворителя», определяет растворимость экстракта в растворителе C_0, г/л:

$$C_0 = \frac{m_e}{m_s} = \frac{m_e}{m_0} \cdot \frac{m_0}{m_s} = Y / \frac{m_s}{m_0},$$

где m_s - масса использованного растворителя, г; m_e - масса извлеченного экстракта, г; m_0 - начальная масса экстракта в образце, г; Y - наклон линейного участка экстракционной кривой.

Эффективность очистки костного матрикса оценивалась методами дифференциально сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа. Анализировался образец, очищенный при температуре 20^0C и давлении 200 бар. Обнаружено упрочняющее влияние CO_2 на неорганическую часть костного матрикса. Начальное и конечное содержание органики в образце позволяет оценить

степень его очистки в 58 %. Рассчитанный по методике [4] выход экстракта из анализируемого образца составил 68,95 % от начального содержания извлекаемых компонентов m_0. Расхождение результатов модельного приближения и лабораторного анализа составило более 10 %.

Выход экстрактивных соединений из образцов костного матрикса, очищенных при температуре 40^0C и давлении 300 бар, составил 92 % от их начального содержания.

Для корреляции растворимости «псевдокомпонента», извлекаемого из костного матрикса, с плотностью (концентрацией) растворителя была использована модель, предложенная в [2]. Модель позволяет вычислить равновесную концентрацию C_0 из закона действующих масс по уравнению вида

$$\ln C_0 = k \cdot \ln \rho + \frac{a}{T} + b$$

Точность корреляции оценивалась по среднему абсолютному относительному отклонению (AARD) и оказалась равной 7,22% в исследованном диапазоне параметров.

Литература:

1. Максудов Р.Н., Колсанов В.С., Савельев Р.И., Петров В.А., Аляев В.А., Валиуллин Л.Р., Рагинов И.С., Егоров В.И., Бирюля В.В. Получение высокоочищенного композитного материала для замещения дефектов кости методами сверхкритической очистки и импрегнации // Вестник Казанского технол. Ун-та. 2016. № 20. С. 177.

2. N. Russell, A. Rives, N. Bertollo, M. H. Pelletier, W. R. Walsh, The effect of sterilization on the dynamic mechanical properties of paired rabbit cortical bone // Journal of Biomechanics, V. 46, Issue 10, 2013, p. 1670 – 1675.

3. J. Chrastil, Solubility of solids and liquids in supercritical gases // Journal of Physical Chemistry 86 (1982) 3016–3021.

4. E. Reverchon, C. Marrone, Modeling and simulation of the supercritical CO2 extraction of vegetable oils // Journal of Supercritical Fluids 19 (2001) 161–175.

УДК 661.98

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЕ ВИХРЕВЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ

Айметдинов Н. Ф., Петров В. И., Трусов А. О.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: ohz1@rambler.ru

Оценку эффективности работы вихревых контактных устройств (ВКУ), в соответствии с теорией межфазной турбулентности, можно дать на основе анализа гидравлического сопротивления сухого и орошаемого контактного устройства. Чем больше разность между гидравлическим сопротивлением орошаемого и сухого ВКУ при данной плотности орошения, тем больше количества энергии затрачивается на взаимодействие между потоками, на развитие турбулентности, а, следовательно, тем больше количества передаваемого вещества.

Целью нашего экспериментального исследования является определение одновременного влияния различных конструктивных и режимных параметров на изменение гидравлического сопротивления ВКУ.

Исследование гидравлического сопротивления ВКУ проводилось на экспериментальной установке. Установка была смонтирована с учетом требований, предъявляемых к технике физико-химических исследований.

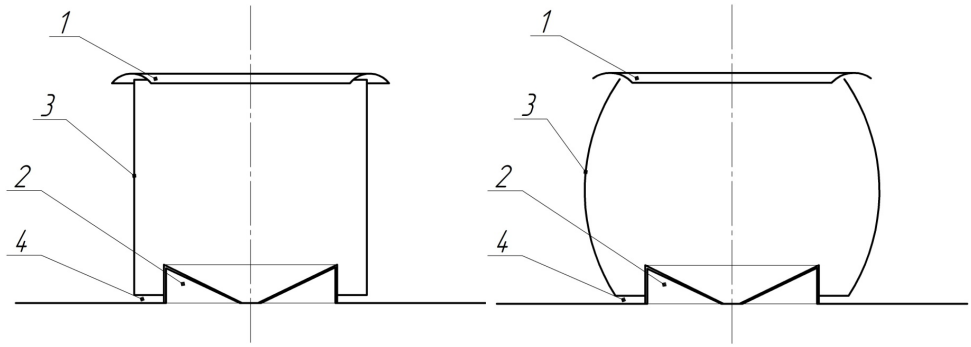
Экспериментальный аппарат состоит из корпуса, собранного из царг диаметром 200 мм, рабочей тарелки, на которой располагается контактный патрубок с аксиальным завихрителем газового потока. Экспериментальный аппарат обеспечен системой подвода газа и жидкости включающей: высоконапорную газодувку с производительностью по газу до 1000 $м^3$/час, нормальную диафрагму, манометр, центробежный насос, ротаметры.

Нами были экспериментально исследовано гидравлическое сопротивление ВКУ с различными контактными патрубками, внутри которых установлены аксиальные завихрители газового потока.

На рис. 1 представлены ВКУ с цилиндрическим и выпуклым патрубком и аксиальным завихрителем.

На рис.2. показана зависимость гидравлического сопротивления орошаемого ВКУ от изменения скорости газа в завихрителе при различных орошениях.

На рис.3 показана зависимость гидравлического сопротивления орошаемого ВКУ с выпуклым патрубком от изменения скорости газа в завихрителе при различных орошениях. На рис.4 представлено сравнение гидравлических сопротивлений ВКУ двух типов от изменения скорости газа в аксиальном завихрителе при равных орошениях контактных устройств.



а) б)

Рис 1. Схемы ВКУ с различными контактными патрубками и аксиальным завихрителем: а) с цилиндрическим патрубком, б) с выпуклым патрубком; 1 – отбойник; 2 – аксиальный завихритель; 3 –патрубок; 4 – отверстие для входа жидкости

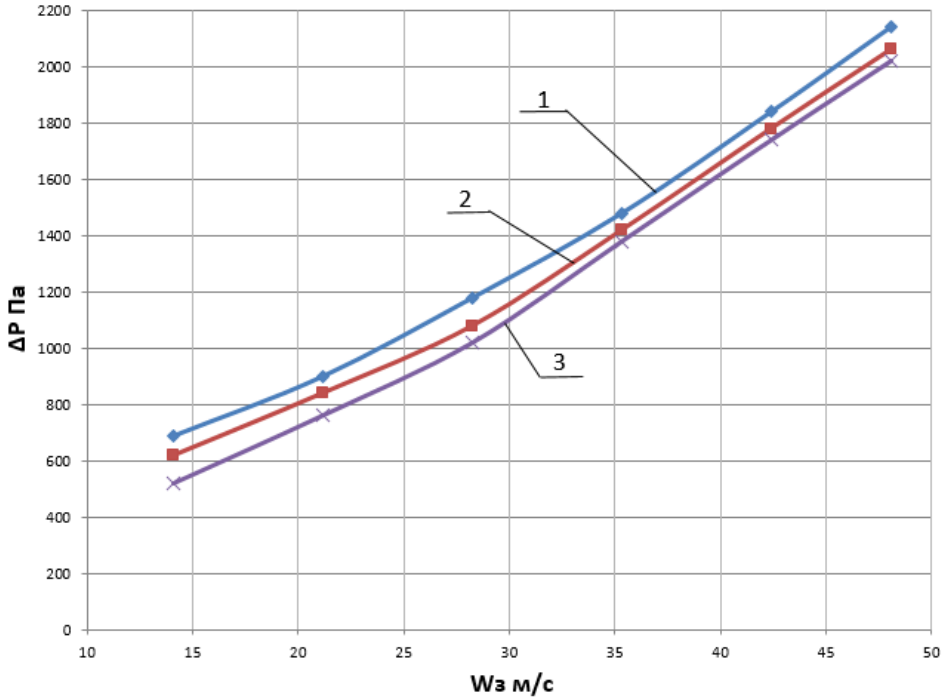


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости газа в завихрителе в ВКУ с цилиндрическим патрубком и аксиальным завихрителем 1 - $L \cdot 10^4 = 0{,}946$ м^3/с; 2 - $L \cdot 10^4 = 0{,}545$ м^3/с; 3 - $L \cdot 10^4 = 0{,}178$ м^3/с

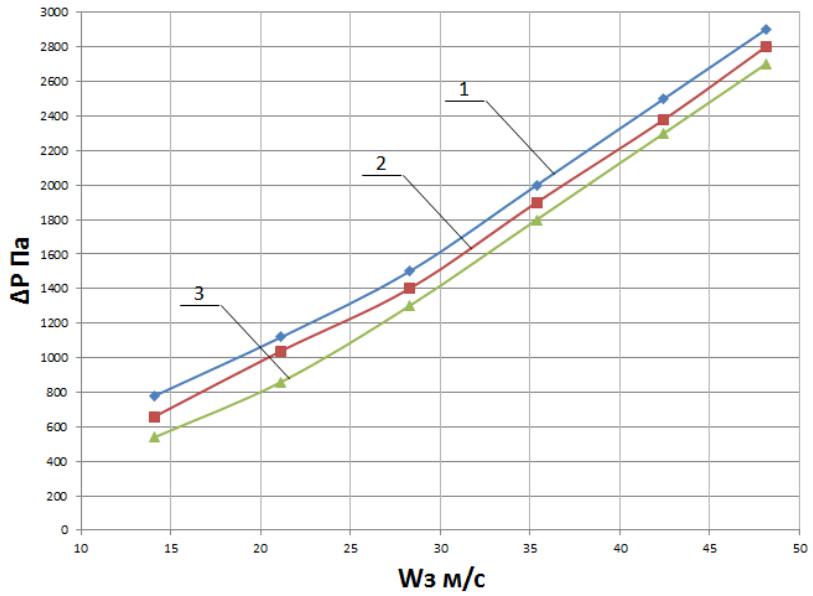


Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости газа в завихрителе ВКУ с выпуклым патрубком и аксиальным завихрителем
1 - $L \cdot 10^4$= 0,946 м^3/с; 2 - $L \cdot 10^4$= 0,545 м^3/с; 3 - $L \cdot 10^4$= 0,178 м^3/с

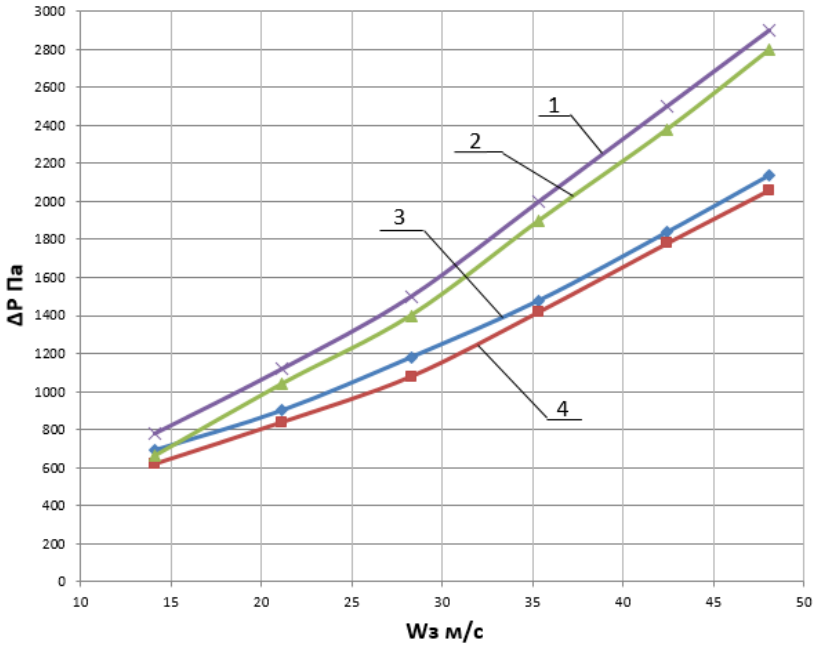


Рис. 4. Сравнение гидравлических сопротивлений от скорости газа для ВКУ двух типов: 1,2 – выпуклый патрубок с аксиальным завихрителем, орошение $L \cdot 10^4$= 0,946 м^3/с и $L \cdot 10^4$= 0,545 м^3/с; 2,3 – цилиндрический патрубок и аксиальным завихритель, орошение $L \cdot 10^4$= 0,946 м^3/с и $L \cdot 10^4$= 0,545 м^3/с

На рис. 5 представлено сравнение гидравлических сопротивлений сухих ВКУ различных типов от изменения скорости газа в завихрителе при отсутствии орошения.

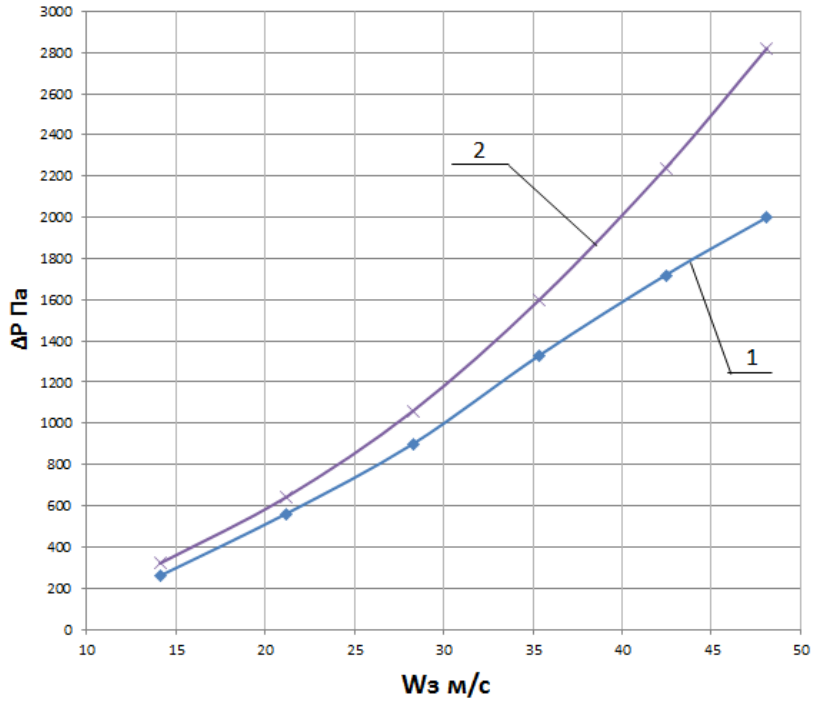


Рис.5 - Сравнение гидравлических сопротивлений от скорости газа в завихрителе для ВКУ двух типов; L=0; 1 – цилиндрический патрубок с аксиальным завихрителем; 2 – выпуклый патрубок с аксиальным завихрителем

Из графика видно, что при одних и тех же значениях скорости газа в завихрителе, гидравлическое сопротивление для ВКУ с выпуклым патрубком и аксиальным завихрителем выше, чем у ВКУ с цилиндрическим патрубком и аксиальным завихрителем. На величину гидравлического сопротивления оказывает влияние кривизна контактного патрубка.

Литература:

1. Кафаров В.В., Основы массопередачи. - Учеб. Для вузов. 3-е изд. «Высшая школа»,1979.- 439 с.

2. Петров В.И., Интенсификация абсорбции оксидов азота / В.И. Петров, А.С. Балыбердин и др. // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. №8. 2004.

С142-143.

3. Александров И.А., Массопередача при ректификации и адсорбции многокомпонентных смесей. Л.: Химия, 1975.- 319 с.

УДК 66.066

ОСАДИТЕЛЬНАЯ ЦЕНТРИФУГА С ФИЛЬТРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Аллахвердиева Э.Ф., Хамидуллина Д.А., Лашков В.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: lashkov_dm@kstu.ru

В процессе производственно-хозяйственной деятельности многие предприятия потребляют большое количество воды, которая используется для самых разнообразных целей: охлаждения, промывки, замочки, увлажнения, в качестве гидротранспорта и в составе производимой продукции.

В связи с особенностью производства бумаги и картона целлюлозно-бумажная промышленность относится к крупным водопотребителям. Целлюлозу в технологическом процессе многократно промывают водой и, кроме того, вода используется для транспортировки получаемой волокнистой массы на различные технологические операции. При подаче ее на бумагоделательную машину в составе суспензии 99% воды и 1% волокна. На современных заводах по производству небеленой целлюлозы (бумаги), из которой делают облицовочный картон, расход воды может составлять 42 $м^3$/т, а на заводах, где производят беленую целлюлозу (бумагу) - 63-83 $м^3$/т.

Предприятия с таким потреблением воды проектируются по принципу оборотной системы водоснабжения с замкнутым циклом.

Однако, несмотря на наличие очистных сооружений в системе оборотного водоснабжения, на целлюлозно-бумажных предприятиях образуются сточные воды, содержащие взвешенное волокно, источниками которых являются стадии промывания, сортирования, многократного разбавления и сгущения.

Для улавливания волокон целлюлозы на предприятиях используются способы механической очистки (фильтрование, центрифугирование), мембранные технологии и т.п.

Наиболее практичным способом, рассчитанным на большое количество оборотной воды, является очистка в центробежном поле (осадительных и фильтрующих центрифугах).

В литературе конструкции осадительных и фильтрующих центрифуг представлены достаточно широко [1-5] и предназначены они для достижения определенных целей. Например, для снижения амплитуды колебаний центрифуги путем уменьшения трения частиц суспензии о радиальные перегородки внутреннего канала направляющей шнека [3]; для перемешивания слоев крупных и мелких частиц шнеком, что улучшает фильтрационные свойства осадка и регулирования соотношения количества и размера частиц в потоках разделенной

суспензии [4]; для предотвращения разбивания агломератов или отдельных частиц твердой фазы при ее движении в сторону зоны разделения и соответственно повышения качества легкой фазы за счет уменьшения содержания в ней твердых частиц [5].

Однако, перечисленные центрифуги малоэффективны при выделении тонкодисперсных волокон целлюлозы из малоконцентрированных сточных вод целлюлозно-бумажных производств. Это объясняется рядом причин: взмучиванием волокнистой массы в потоке жидкости при взаимодействии с радиальными перегородками; неэффективным предварительным разделением суспензий, содержащих высокодисперсную твердую фазу, состоящую из волокон со значительным разбросом размеров; перемешиванием суспензии в раскручивающим устройстве перед выходом на разделение.

Для повышения эффективности разделения высокодисперсных суспензий с низким содержанием твердой фазы с учетом результатов математического моделирования [6] разработана осадительная центрифуга с фильтрующими элементами [7] (рис.1).

Осадительная центрифуга включает цилиндроконический ротор 1 с окнами для отвода фугата 2 и осадка 3. Внутри ротора с кольцевым зазором установлен шнек, состоящий из цилиндроконического барабана 4 с отверстиями 5 для прохода исходной суспензии и закрепленных на нем витков 6. Внутри барабана расположена питающая труба 7. Отверстия 5 снабжены перфорированными камерами 8, размещенными с наружной стороны барабана 4, и по высоте, не превышающими высоту витков шнека 6. Камеры 8 заполнены наполнителем 9, выполненным в виде волокон, и через перфорацию сообщены с кольцевым зазором.

Волокна сориентированы по радиусу ротора и имеют толщину 0,05-0,08 мм. Удельное количество волокон в перфорированных камерах составляет 450-500 шт/см^2. Осадительная центрифуга работает следующим образом. Внутрь вращающегося шнека при вращающемся цилиндроконическом роторе 1 центрифуги по питающей трубе 7 подают исходную суспензию. Суспензия через отверстия 5 в цилиндроконическом барабане 4 поступает в перфорированные камеры 8.

Камеры заполнены волокнистым наполнителем 9, волокна которого имеют определенную плотность заполнения, радиальную ориентацию в кольцевом зазоре между шнеком и ротором и обладают заданными размерами. Благодаря этому, жидкость беспрепятственно отфильтровывается при прохождении суспензии через волокнистый наполнитель в поле действия центробежных сил, а тонковолокнистая фаза за счет оказываемого сопротивления наполнителя – с замедлением скорости. В перфорированных камерах 8 осуществляется сгущение твердой фазы. Жидкая фаза, как более легкая, отводится из осадительной

центрифуги через окна 2, а твердая фаза витками шнека 6 удаляется с внутренней поверхности ротора 1 через окна 3.

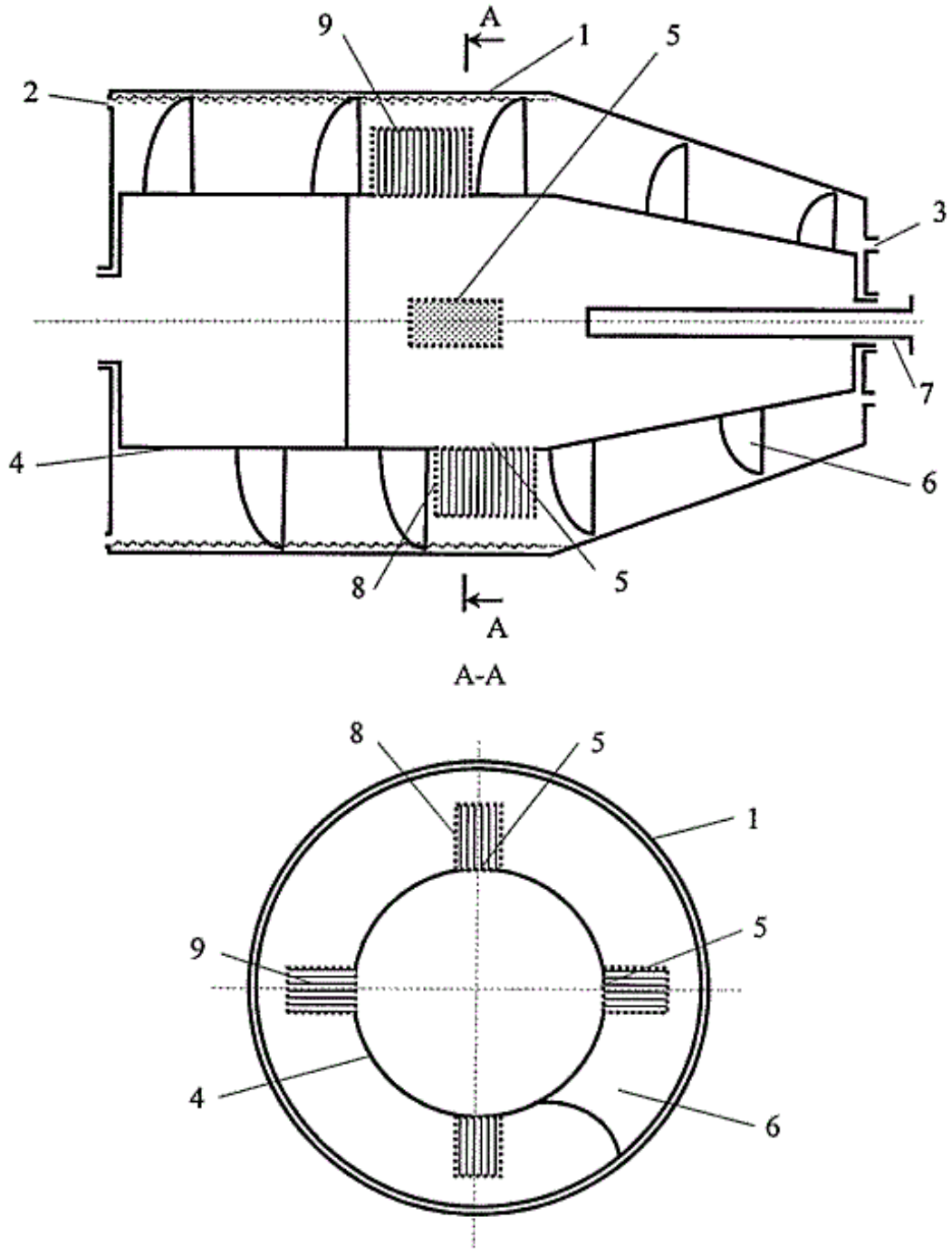


Рис.1. Осадительная центрифуга с фильтрующими элементами

Экспериментальные исследования по очистке в центробежном поле сточных вод целлюлозно-бумажных производств с объемным содержанием твердой фазы 12-15% (целлюлозные волокна и микрофибриллы) позволили выявить влияние параметров наполнителя на степень разделения малоконцентрированных суспензий.

При толщине волокон 0,05 мм и плотности заполнения 450 шт/см2

остаточное количество твердой фазы составляет 3%, что повышает степень разделения в 4-5 раз. Уменьшение толщины волокон и увеличение плотности заполнения приводит к увеличению сопротивления волокнистого наполнителя и его засорению без повышения степени разделения суспензии.

При толщине волокон 0,08 мм и плотности заполнения 400 шт/см^2 остаточное количество твердой фазы составляет 5%, что повышает степень разделения в 2,4-3 раза. Увеличение толщины волокон и уменьшение плотности заполнения снижает степень очистки малоконцентрированных суспензий.

Литература:

1. Лукьяненко В.М., Таранец А.В. Промышленные центрифуги. М.:, Химия, 1974. – 376 с.

2. Шкоропад Д.Е, Новиков О.П. Центрифуги и сепараторы для химических производств. М.: Химия, 2010. – 256 с.

3. Пат. RU 2258565, МПК B 04 B 11/02. Шнековая центрифуга / Антипов С.Т. и др.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Воронежская государственная технологическая академия». – № 2004113706/12; заявл. 05.05.2004; опубл. 20.08.2005, Бюл. № 2. – 9 с.

4.: А.с. 1446740 СССР, МКИ B 04 B 1/20. Осадительная центрифуга / Шевелин Б.П. и др.; – №4100016/13; заявл. 27.08.86; опубл. 15.12.94. – 8 с.

5. А.с. 1464354 СССР, МКИ B 04 B 1/20. Осадительная центрифуга / Снегин А.И. и др.; – №4088056/13; заявл. 09.07.86; опубл. 30.11.94. – 9 с.

6. Мухтаров Я.С. и др. Разработка математического описания процесса центробежного отделения жидкой фазы // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2014. Т.17. №7. С. 237-238.

7. Пат. RU 2656330, МПК B 04 B 11/00. Осадительная центрифуга / Шакиров Р.И., Лашков В.А., Вавилов Ю.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». – № 2017123817; заявл. 05.07.2017; опубл. 04.06.2018, Бюл. №16. – 11 с.

УДК 66.0

АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИИ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ АММИАКОМ

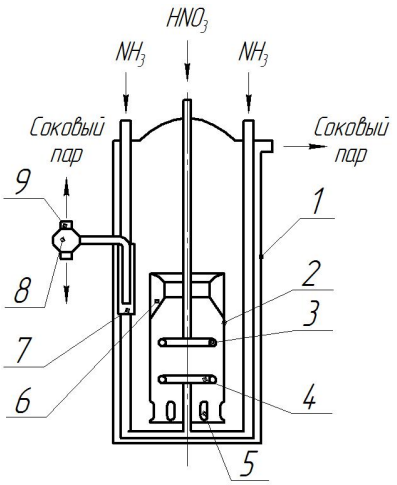
Андреева Д.В., Попов А.Д, Борисов А.И.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: dariasand1@yandex.ru

В существующих технологических схемах для проведения процесса нейтрализации азотной кислоты аммиаком применяются аппараты ИТН (использование тепла нейтрализации). Принципиальная схема первоначальной конструкции данного аппарата представлена на рисунке 1.

Аппарат работает следующим образом. 47 – 49% – ная азотная кислота и аммиак подаются в реакционный стакан 2 в противотоке через диспергирующие их барботеры 3 и 4 соответственно. Стремящийся вверх аммиак, а затем и образующийся соковый пар создают в реакционном стакане подъемную силу заставляющую раствор циркулировать. Пройдя через лопасти завихрителя 6, расположенного в верхней части реакционного стакана, раствор, приобретая направление движения к периферии, попадает в сепарационную зону аппарата ИТН, где отделяется от сокового пара и вновь засасывается в реакционный стакан через отверстия 5 под действием разряжения в стакане. Раствор аммиачной селитры через гидрозатвор 7 попадает в сепаратор 8 где отделяется от сокового пара, выводимого через штуцер 9. При использовании 47–49 %–ной азотной кислоты без предварительного подогрева в аппарате ИТН получают раствор концентрацией 62 – 65% NH_4NO_3 при использовании 54%–ной кислоты –72 – 80% – ный раствор; температура нейтрализации соответственно 120 и 130 °С.

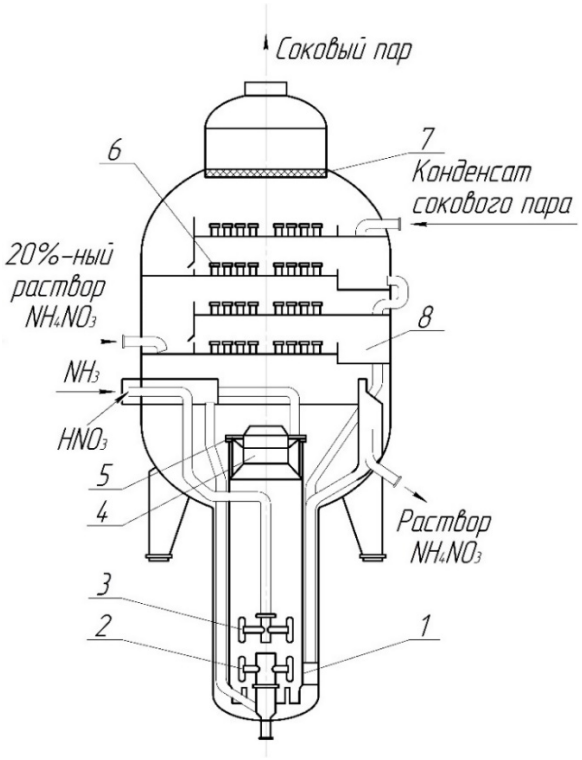
Как правило, в выходящем растворе поддерживают небольшой избыток азотной кислоты (до 2 – 4 г/л), поскольку стабильно сохранять стехиометрическое соотношение HNO_3 и NH_3 на входе в ИТН практически невозможно. При избытке аммиака в выходящем растворе резко возрастает загрязнение им сокового пара; избыток азотной кислоты позволяет практически полностью поглотить аммиак.

В то же время загрязненность сокового пара парами азотной кислоты значительно ниже, чем аммиаком при слабощелочном режиме (в пересчете на азот).



1 – корпус аппарата; 2 – реакционный стакан; 3 - барботер азотной кислоты; 4 - барботер аммиака; 5 - отверстия для циркуляции раствора; 6 - крышка–завихритель; 7 – гидрозатвор;
8 – сепаратор; 9 – штуцер вывода сокового пара.

Рисунок 1 – Принципиальная схема аппарата ИТН



1 – реакционный стакан; 2 – барботер аммиака; 3 – барботер азотной кислоты; 4 – диффузор;
5 – завихритель; 6 – колпачковая тарелка; 7 – брызгоотбойник;
8 – промыватель.

Рисунок 2 – Аппарат ИТН применяемый в агрегатах АС – 72, АС – 72М

Основным преимуществом аппарата является большая кратность перемешивания, достигаемая без затрат энергии за счет эрлифта. В то же время ему присущи следующие недостатки: для достижения высокой кратности перемешивания в реакционный стакан должны подаваться концентрированные компоненты, а газы дистилляции производства карбамида содержат всего лишь около 35% масс. аммиака; высокая концентрация азотной кислоты в объеме реакционного стакана приводит к сильной его коррозии и быстро выводит его из строя; высокая концентрация реагентов приводит к образованию большого объема аэрозоля аммиачной селитры, в аппарате в недостаточной мере осуществлена сепарация раствора и сокового пара.

Типовой аппарат нейтрализации ИТН, применяемый в агрегатах АС – 72, АС–72М, (рисунок 2) представляет собой вертикальный цилиндрический

аппарат, состоящий из реакционной и сепарационной зон диаметром соответственно 1,6 и 3,8 м и высотой 10,1 м. В реакционной зоне имеется реакционный стакан 1 диаметром 1,2 м и высотой 4,3 м, в нижней части которого расположены отверстия для циркуляции раствора. Несколько выше отверстий внутри стакана размещен барботер 2, подающий газообразный аммиак, над ним – барботер азотной кислоты 3. Реакционная парожидкостная смесь выходит из верхней части реакционного стакана; часть раствора выходит из аппарата ИТН и поступает в донейтрализатор, а остальная часть (циркуляционная) – вновь идет вниз. Выделившийся из парожидкостной смеси соковый пар отмывается на колпачковых тарелках 6 от брызг раствора аммиачной селитры и паров азотной кислоты 20%-м раствором селитры, а затем конденсатом сокового пара. Аппарат изготовлен из кислотостойкой стали, а барботеры аммиака и азотной кислоты – из титана. Недостатком типового аппаратурного оформления процесса нейтрализации являются низкая производительность и высокое содержание азотной кислоты и аммиачной селитры в выходящем газовом потоке.

Специалистами ОАО «Куйбышев Азот» предложен агрегат для получения аммиачной селитры, в котором азотную кислоту и газообразный аммиак подают на нейтрализацию посредством контура циркуляции с низа корпуса в стакан.

Агрегат (рисунок 3) содержит корпус с патрубком вывода газового потока, расположенным в верхней части корпуса, с размещенным внутри корпуса стаканом, контур циркуляции, включающий всасывающий трубопровод, насос, нагнетательный трубопровод, который содержит патрубок вывода раствора аммиачной селитры, расположенный после насоса до смесителя азотной кислоты, и смеситель азотной кислоты с патрубком для подачи азотной кислоты, устройство дополнительно имеет смеситель газообразного аммиака, расположенный в нагнетательном трубопроводе после смесителя азотной кислоты, корпус имеет нижнюю суженную цилиндрическую часть, переходящую в расширенную цилиндрическую часть, стакан размещен в нижней части корпуса, нагнетательный и всасывающий трубопроводы соединены с низом корпуса, при этом нагнетательный трубопровод соединен со стаканом [1].

Недостатками агрегата является отсутствие возможности увеличивать в агрегат подачу газообразного аммиака и азотной кислоты, что связано с недостаточной производительностью получения аммиачной селитры, и повышенное содержание азотной кислоты и аммиачной селитры в выходящем газовом потоке.

Повышение производительности процесса нейтрализации азотной кислоты аммиаком может быть достигнуто посредством увеличения подачи газообразного аммиака и азотной кислоты и уменьшения содержания азотной кислоты и аммиачной селитры в выходящем газовом потоке.

Техническая задача решается способом получения аммиачной селитры, включающим нейтрализацию азотной кислоты газообразным аммиаком, в котором азотную кислоту и аммиак подают в верхнюю часть корпуса аппарата, при этом газообразный аммиак подают через патрубок в стакан, а азотную кислоту подают посредством контура циркуляции на тарелку.

Техническая задача решается также аппаратом, содержащим корпус с патрубком вывода газового потока с размещенным внутри корпуса стаканом, контур циркуляции, включающий всасывающий трубопровод, насос и нагнетательный трубопровод, который содержит патрубок вывода раствора аммиачной селитры, расположенный после насоса до смесителя азотной кислоты и смеситель азотной кислоты с патрубком для подачи азотной кислоты, согласно изобретению корпус устройства выполнен цилиндрической формы, в верхней части корпуса расположена тарелка, по центру которой установлена обечайка, внутри обечайки размещен стакан, боковая поверхность которого выполнена из пластин с образованием тангенциальных щелей, корпус сверху имеет патрубок подачи газообразного аммиака в стакан, при этом нагнетательный трубопровод соединен с корпусом с боку над тарелкой, патрубок вывода газового потока расположен в боковой части корпуса под тарелкой, а всасывающий трубопровод соединен с низом корпуса. Решение технической задачи позволяет повысить производительность способа получения аммиачной селитры и устройства для его осуществления за счет интенсификации тепло–массообмена, позволяющего увеличивать подачу газообразного аммиака и азотной кислоты на нейтрализацию, а также уменьшить содержание аммиачной селитры и азотной кислоты в выходящем газовом потоке в два и более раз [3, 4, 5].

Устройство для получения аммиачной селитры (рисунок 4) содержит корпус 1 с патрубком вывода газового потока 6, с размещенным внутри корпуса стаканом 3, контур циркуляции, который включает всасывающий трубопровод 7, насос 8, нагнетательный трубопровод 12, патрубок вывода раствора аммиачной селитры 9, смеситель азотной кислоты 10, соединенный с патрубком подачи азотной кислоты 11, согласно изобретению корпус устройства выполнен цилиндрической формы, в верхней части корпуса расположена тарелка 5, по центру которой установлена обечайка 4, внутри которой размещен стакан 3, боковая поверхность которого выполнена из пластин с образованием тангенциальных щелей, корпус сверху имеет патрубок подачи газообразного аммиака в стакан 2, при этом нагнетательный трубопровод 12 соединен с корпусом 1 с боку над тарелкой 5, патрубок вывода газового потока 6 расположен в боковой части корпуса под тарелкой 5, а всасывающий трубопровод 7 соединен с низом корпуса 1.

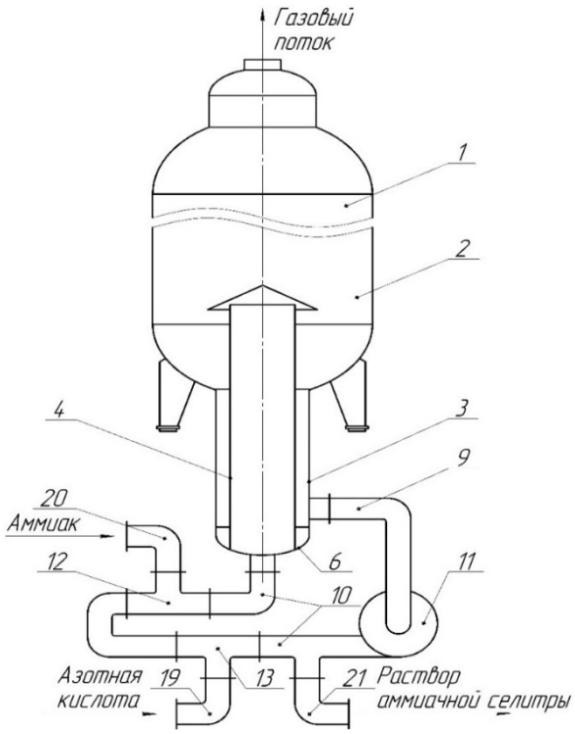


Рисунок 3 – Агрегат для получения аммиачной селитры

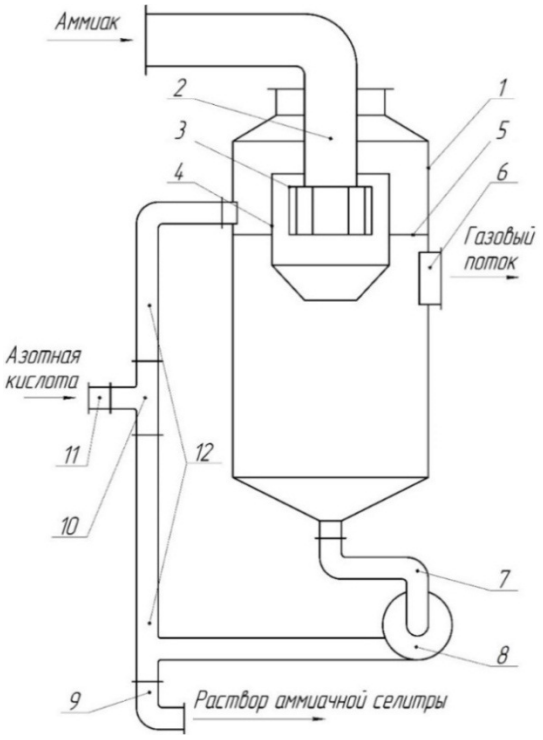


Рисунок 4 – Разработанное устройство нейтрализации азотной кислоты аммиаком

Устройство работает следующим образом, (рисунок 4). Контур циркуляции заполняют раствором азотной кислоты по патрубку подачи 11 через смеситель азотной кислоты 10, затем заполняют нижнюю часть корпуса 1 и всасывающий трубопровод 7. После включения насоса 8 через смеситель азотной кислоты 10 в корпус 1 по трубопроводу нагнетания 12 азотная кислота поступает в верхнюю часть корпуса на тарелку 5. Газообразный аммиак через патрубок подачи газообразного аммиака 2, подают в стакан 3, выходя из стакана, боковая поверхность которого выполнена из пластин с образованием тангенциальных щелей, газовый поток раскручивается, смешивается с раствором азотной кислоты и движется вниз корпуса 1, при этом происходит нейтрализация азотной кислоты газообразным аммиаком. Выделяющееся в ходе нейтрализации тепло вызывает испарение воды. Газовый поток выходит из корпуса 1 через боковой патрубок вывода газового потока 6 под тарелкой 5. Поток раствора аммиачной селитры выходит внизу корпуса во всасывающий трубопровод 7 контура циркуляции. Часть циркулирующего раствора выводится через патрубок вывода раствора аммиачной селитры 9. Непрерывная подача азотной кислоты и газообразного аммиака обеспечивает непрерывный процесс нейтрализации азотной кислоты газообразным аммиаком.

При одинаковой подаче азотной кислоты и газообразного аммиака в устройство по разработанному устройству и аппарату ИТН в выходящем газовом потоке из аппарата ИТН содержание азотной кислоты и аммиачной селитры более чем в два раза больше, чем по разработанному устройству.

При увеличении в четыре раза подачи азотной кислоты и газообразного аммиака по разработанному устройству в выходящем газовом потоке содержание азотной кислоты и аммиачной селитры из аппарата ИТН в два раза больше, чем по разработанному устройству аппарата нейтрализации.

Литература:

1. Кузнецов С. Н., Ардамаков С. В., Будяк А. В.; Пат. РФ №2451637, МПК5 C01C1/18. Агрегат для получения аммиачной селитры / заявитель и патентообладатель ОАО «Куйбышев Азот». – № 2010150034/05; заявл. 06.12.2010; опубл. 27.05.2012.

2. Сахаров И. Ю., Махоткин И. А., Сахаров Ю. Н., Махоткин А. Ф.; Патент РФ № 2619700, МПК C01C 1/18. Способ получения аммиачной селитры и устройство для его осуществления. / заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» - № 2016113051; заявл. 05. 04. 2016; опубл. 17.05.2017.

3. Сахаров И.Ю, Махоткин А.Ф, Сахаров Ю.Н, Махоткин И.А, Дурник Р.В, Сабиров Р.Ф Исследование процесса нейтрализации растворов азотной кислоты аммиаком на модели аппарата периодического действия. // Бутлеровские сообщения. – 2019. – Т.58. №6. – С.110-13.

4. Sakharov I.U. Determination the phase contact surface size of nitric acid with ammonia neutralization process for the ammonium nitrate production / Sakharov I.U., Makhotkin A.F., Sakharov U.N., and Makhotkin I.A. // Conference on Innovative Technologies for Environmental Protection in the Modern World, ITEPMW 2021, Kazan, 18 March 2021 - null, 170870. (IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Открытый доступ Том 815, Выпуск 121 July 2021 Номер статьи 0120152021) – Текст: электронный.

5. Сахаров И.Ю. Научные основы способа интенсификации процесса абсорбции газов в вихревых аппаратах с одновременным решением экологических проблем производства аммиачной селитры и других производств. Сахаров И.Ю., Махоткин А.Ф, Сахаров Ю.Н., Махоткин И.А., Попов А.Д. // Инновационные технологии защиты окружающей среды в современном мире: материалы Всероссийской научной конференции с международным участием (Казань, 18–19 марта 2021 г.)

УДК 615.322

ПИТАТЕЛЬНЫЕ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В СУШЕННОМ ОБЛЕПИХОВОМ ЖОМЕ

Ахметханова Е.Н., Сафин Р.Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: sfornvi@gmail.com

Ягоды облепихи в настоящее время представляют большой интерес благодаря своим нутрицевтическим свойствам и высокому содержанию антиоксидантов, что уже доказано древним традиционным использованием в медицине для лечения астмы, кожных заболеваний, язвы желудка и заболеваний легких.

В ходе исследований были выявлены различные фармакологические действия плодов облепихи, такие как цитопротекторная, антистрессовая, иммуномодулирующая, гепатопротекторная, радиопротекторная, антиатерогенная, противоопухолевая, антимикробная и регенерация тканей.

Переработка ягод облепихи для извлечения сока приводит к образованию большого количества остатков, составляющих 20% от общей массы плодов, состоящих из мякоти, семян и кожицы, которые, как известно, богаты каротиноидами, полифенолами, жирными кислотами и стеринам.

Чтобы уменьшить отходы, облепиховый жмых обычно используется в качестве корма для животных или для экстракции биологически активных соединений, обеспечивая полезные пищевые компоненты, антиоксиданты и косметические продукты. Другие виды применения в пищевой промышленности были направлены на добавление облепихового жмыха в хлеб и другие хлебобулочные изделия в целях повышения их питательной ценности и прямое обогащение пищевых масел облепиховыми каротиноидами.

В настоящем докладе исследование направлено на оценку питательных и антиоксидантных свойств облепихового жмыха с целью стимулирования потребления и использования этого чрезвычайно ценного остаточного ресурса в пищевой промышленности.

Данные о непосредственном составе высушенного облепихового жмыха представлены в таблице 1.

Одной из главных характеристик плодов облепихи является их высокая жирность. В отличие от других плодов, облепиха синтезирует и накапливает липиды во всех частях плода, а потому можно получить три вида масла, в зависимости от того, извлекается ли оно из мякоти, семени или кожуры.

Содержание масла в семенах, как правило, постоянно (около 10%) и не зависит от морфологических характеристик и происхождения, хотя для некоторых сортов сообщалось о более высоких значениях (до 15-16%) [1]. С другой

стороны, содержание липидов в мягких тканях (мякоти и кожице) значительно варьируется (от 1 до 35%) в зависимости от происхождения и других факторов, таких как время сбора урожая, внесение неорганических удобрений, состояние зрелости плодов и климат.

Табл.1 Состав высушенного облепихового жмыха

Компонент (г/кг)	Облепиховый жмых сушеный
Сухое вещество	926.6 ± 11.8
Сырой белок	148.9 ± 6.5
Сырой жир	200.5 ± 5.3
Сырое волокно	198.6 ± 8.9
Зола	18.4 ± 0.8

Плоды облепихи содержат 18 видов свободных аминокислот. Из них восемь аминокислот (треонин, валин, метионин, лейцин, лизин, триптофан, изолейцин и фенилаланин) необходимы для человеческого организма [2].

Содержание аминокислот в сушеном облепиховом жмыхе приведено в таблице 2.

Табл.2 Содержание аминокислот в сушеном облепиховом жмыхе

Аминокислоты	Облепиховый жмых сушеный
Аспарагиновая кислота	17.2 ± 0.5
Глутаминовая кислота	23.7 ± 1.1
Серин	8.5 ± 0.3
Глицин	5.1 ± 0.2
Треонин	5.2 ± 0.2
Аргинин	13.1 ± 0.4
Аланин	6.8 ± 0.3
Тирозин	4.4 ± 0.2
Валин	6.4 ± 0.3
Фенилаланин	7.9 ± 0.3
Изолейцин	7.1 ± 0.2
Лейцин	11.6 ± 0.3
Лизин	7.2 ± 0.2
Цистин	1.5 ± 0.1
Метионин	4.7 ± 0.2
Общее количество аминокислот	130.4 ± 4.8

Состав жирных кислот высушенного облепихового жмыха приведен в таблице 3.

Табл.3 Состав жирных кислот высушенного облепихового жмыха

Жирные кислоты		**Облепиховый жмых сушеный**
Каприк	C 10:0	0,05 ± 0,01
Миристика	C 14:0	0,62 ± 0,02
Пентадекановый	C 15:0	0.11 ± 0.03
Пальмитиновый	C 16:0	29.22 ± 1.25
Пальмитолеина	C 16:1	28.75 ± 1.13
Гептадеканоический	C 17:0	0,13 ± 0,01
Гептадеценоический	C 17:1	0.10 ± 0.01
Стеариновая	C 18:0	1.05 ± 0.08
Олеиновый цис	C 18:1	24.23 ± 0.94
Линолевая цис	C 18:2н6	8.96 ± 0.41
Линоленовой α	C 18:3н3	6.02 ± 0.28
Октадекатетраеновый	C18:4н3	0,46 ± 0,02
Эйкосадиеновый	C20(2н6)	0,26 ± 0,01
Другие жирные кислоты		0.04 ± 0.01
Профиль жирных кислот		
Насыщенные жирные кислоты (SFA)		31.18 ± 1.40
Мононенасыщенные жирные кислоты (MUFA)		53.08 ± 2.08
Полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК), из которых: • *n-3* • *n-6*		15,70 ± 0,72 6,48 ± 0,30 9,22 ± 0,42
н-6/н-3		1.42 ± 0.12

Этот состав определяется содержанием жирных кислот в масле семян и в масле из мягких частей (кожура и остаточная мякоть), которые значительно отличаются. Таким образом, масло семян характеризуется высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот (85-90%), включая две незаменимые жирные кислоты, линолевую кислоту и α-линоленовую кислоту, вместе представляющие до 70%. Пропорции этих двух жирных кислот обычно составляют 30-40% и 20-35% соответственно. Другими жирными кислотами, обычно содержащимися в семенах, являются олеиновые (13-30%), пальмитиновые (0, 7-20%), стеариновая (0, 2-9%) и вакценовая (2-4%) кислоты [3].

Содержание каротиноидов в сушеном облепиховом жмыхе обнаружено 245,6 мг/100 г. [4]. сообщили об общем содержании каротиноидов между 6,19 и 23,91 мг / 100 г свежего веса в ягодах облепихи (*Hippophae rhamnoides* L.).

Таким образом, можно сделать вывод, что облепиховый жмых имеет высокую питательную ценность, обусловленную высоким содержанием жира и белка, его содержанием незаменимых аминокислот (38,42% от общего количества аминокислот) и его профилем жирных кислот, характеризующимся преобладанием

мононенасыщенных жирных кислот (53,08% от общего количества жирных кислот), высоким содержанием полиненасыщенных жирных кислот (15,70%). Эти данные свидетельствуют о том, что облепиховый жмых может быть ценным пищевым ингредиентом или может использоваться в качестве пищевой добавки. Кроме того, было обнаружено, что побочные продукты облепихи содержат высокие уровни фенольных соединений и каротиноидов и демонстрируют высокую антиоксидантную активность. Содержание биологически активных соединений делает облепиховый жмых применимым для использования в качестве функциональной пищевой добавки в качестве источника природных антиоксидантов в медицинской и фармацевтической промышленности.

Литература:

1. Yang B, Kallio H (2005) Липофильные компоненты семян и ягод облепихи (Hippophae rhamnoides L.). B: Singh V (ed) Облепиха (Hippophae L.): многопредложенное чудо-растение, том 2. Издательство «Дайя», Нью-Дели, стр. 70–97.

2. Chen C, Xu XM, Chen Y, You MY, Wen FY, Zhan Y (2013) Идентификация, количественная оценка и антиоксидантная активность ацилированных флавонолгликозидов из облепихи (Hippophae rhamnoides ssp. sinensis). Пищевая химия 141:1573–1579.

3. Yang B, Kallio H (2005) Липофильные компоненты семян и ягод облепихи (Hippophae rhamnoides L.). B: Singh V (ed) Облепиха (Hippophae L.): многопредложенное чудо-растение, том 2. Издательство «Дайя», Нью-Дели, стр. 70–97.

4. Teleszko M, Wojdylo A, Rudzinska M, Oszmianski J, Golis T (2015) Анализ содержания липофильных и гидрофильных биологически активных соединений в ягодах облепихи (Hippophae rhamnoides L.). J Agric Food Chem 63:4120–4129.

УДК 615.322

ПОЛУНЕПЕРЫВНЫЙ ПРОЦЕСС ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОЛИФЕНОЛОВ ИЗ ЛИСТЬЕВ ОБЛЕПИХИ.

Ахметханова Е.Н., Сафин Р.Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: sfornvi@gmail.com

Облепиха (*Hippophae Rhamnoides L.*) является важным источником биологически активных соединений, таких как: антиоксиданты, витамины, жирные кислоты, аминокислоты и минералы. Было доказано, что экстракты листьев облепихи обладают антимикробными, антиоксидантными, противовоспалительными и противовирусными свойствами [1].

Извлечение полифенолов из растений является первым шагом в использовании этих фитохимических веществ в пищевых добавках, пищевых ингредиентах, косметических и фармацевтических продуктах. Фенольные соединения могут быть извлечены из высушенного или свежего растительного сырья. Наиболее распространенным методом получения экстрактов из растений является экстракция растворителем. На процесс экстракции влияют тип растворителя, соотношение растворителя к растению, температура, время экстракции или скорость перемешивания.

Радиционные методы, такие как экстракция или мацерация Soxhlet, обеспечивают низкую эффективность из-за длительного времени экстракции, высоких температур и деградации полифенолов. В последние годы были разработаны более эффективные процессы экстракции, такие как ультразвуковая и микроволновая экстракция, одновременная ультразвуковая микроволновая экстракция, удаление жидкости под давлением и сверхкритических жидкостей, импульсное электрическое поле, микроволновая и ферментная совместная экстракция. Методы, используемые для извлечения биологически активных соединений из растительного сырья, в основном представляют собой периодические процессы.

MAE - это альтернативный процесс, используемый для экстракции полифенолов из растительного материала, который является экологически чистым процессом. Этот процесс имеет много преимуществ, например, более короткое время экстракции и меньшее количество требуемого растворителя. Важным вопросом экстракции полифенолов является их термолируемость. Чтобы избежать деградации полифенолов, экстракция этих термочувствительных соединений требует быстрого нагрева и более короткого времени экстракции. MAE включает в себя объемный нагрев и является контролируемым процессом. По этой причине микроволновая техника является привлекательной альтернативой для экстракции. Деградация чувствительных биологически активных соединений во

время экстракции может быть сведена к минимуму с помощью системы экстракции с непрерывным потоком. Таким образом, время пребывания полифенолов в системе легко контролируется путем изменения скорости потока растворителя, тем самым уменьшая деградацию этих термочувствительных соединений. Важнейшими преимуществами непрерывного микроволнового нагрева являются контролируемое распределение тепла, быстрое повышение температуры, возможность закалки продуктов в потоке.

С целью определения факторов, влияющих на полунепрерывный процесс МАЭ полифенолов, был изучен ряд параметров. Поэтому одним из изученных параметров было влияние скорости перемешивания на ТПК.

Скорость перемешивания представляет собой важный фактор в экстракции полифенолов. Более высокая скорость перемешивания приводит к увеличению ТПК как в первой фракции, так и в общем количестве полифенолов. Благодаря эффективному перемешиванию экстракционной среды достигается лучший контакт между растительным материалом и растворителем и увеличивается ТРС. Кроме того, более высокая скорость перемешивания вызывает механическое разрушение клеточных стенок, облегчающее доступ растворителя в клетку, что способствует экстракции полифенолов.

Увеличение скорости перемешивания приводит к увеличению общего количества полифенолов (с 81,74 мг/г до 127,76 мг/г). Подход к достижению эффективного перемешивания экстракционной среды заключается в использовании мешалки с большими размерами. Таким образом, реактор, используемый для экстракции, был модифицирован, чтобы позволить использовать большую мешалку.

Увеличение скорости перемешивания за счет использования магнитной мешалки большего размера приводит к повышению ТРС в первой фракции. Хотя разница значений ТРС для других фракций незначительна, общее количество полифенолов выше для реактора.

Стратегией увеличения количества полифенолов в первой фракции для полунепрерывного процесса является предварительный нагрев растворителя. Перед входом в экстракционный реактор, который содержит листья облепихи, растворитель нагревают при 60 °C, а затем ему дают непрерывно течь через реактор.

Предварительный нагрев растворителя влияет на общее количество полифенолов, увеличивая ТРС в первой фракции примерно на 25% и общее количество полифенолов примерно на 20% при скорости потока 1,5 мл/мин. Также предварительный нагрев растворителя позволяет увеличить расход с 1,5 мл/мин до 6 мл/мин без влияния на эффективность экстракции. Такая стратегия предварительного нагрева растворителем приводит к извлечению около 80% от общего

количества полифенолов из листьев морского бакторна (176,66 мг/г для полунепрерывной МАЕ и 216,37 мг /г для прерывистой многократной экстракции [2].

Антиоксидантная способность полифенольных экстрактов

Антиоксидантную емкость для методов МАЕ и СЕ с предварительным нагревом растворителя со скоростью потока 6 мл растворителя/мин и скоростью перемешивания 900 об/мин. Антиоксидантная способность всех собранных фракций соответствует значениям ТРС, полученным для тех же условий экстракции. Антиоксидантная способность для МАЕ выше по сравнению с СЕ как для первой фракции, так и для общего количества всех восьми фракции [3].

Состав полифенолов

Количественный анализ основных полифенолов для экстрактов листьев облепихи представлен в таблице 1. Основными компонентами из экстрактов листьев облепихи являются галловая кислота, катехин, п-кумаровая и феруловая кислоты, рутин, кемпферол-глюкозид, изормамнетин-глюкозид и кверцетин. Все компоненты получаются в больших количествах полунепрерывной МАЕ, чем СЕ. Галловая кислота является преобладающим полифенольным видом, за которым следует катехин для обеих проанализированных фракций.

Таблица 1. Количественный анализ офсновных полифенолов, полученных полунепрерывными МАЭ и СЕ с предварительным нагревом растворителя

Полифенольное соединение	**Концентрация полифенольного соединения [мг/г DM]**			
	Тип отопления			
	МАЕ		**СЕ**	
	Фракция 1	**Фракция 4**	**Фракция 1**	**Фракция 4**
Галловая кислота	18.02	3.67	12.37	3.42
Катехин	14.62	2.43	9.86	1.62
п-кумаровая кислота	0.31	0.03	0.28	0.03
Феруловая кислота	0.60	0.07	0.52	0.07
Рутин	3.37	0.28	2.69	0.22
Кемпферол-3-О-глюкозид	2.49	0.19	2.19	0.16
Изормамнетин-3-О-глюкозид	2.09	0.27	1.96	0.30
Кверцетин	1.64	0.93	1.24	0.88
Итог	43.14	7.88	31.11	6.71

Литература:

1.Олас, Б. Облепиха как источник важных биологически активных соединений при сердечно-сосудистых заболеваниях. Пищевая и химическая токсикология 97, 199–204.

2. Dai, J. & Mumper, R. J. Растительные фенолы: экстракция, анализ и их антиоксидантные и противораковые свойства. Молекулы 15, 7313–7352.

3. Kumar, M. S. Y., Tirpude, R. J., Maheshwari, D. T., Bansal, A. & Misra, K. Антиоксидантные и антимикробные свойства богатой фенолами фракции листьев облепихи (Hippophae rhamnoides L.) in vitro. Food Chem.

УДК 532.516

ИССЛЕДОВАНИЕ БРЫЗГОУНОСА ВИХРЕВЫХ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ

Бабушкин И.С., Петров В.И., Хамидуллина А.Р.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: ohz1@rambler.ru

В многоступенчатых массообменных аппаратах брызгоунос влияет на эффективность контактных устройств и предопределяет собой верхние предельные нагрузки по газу. При расчете конструкций вихревых контактных устройств (ВКУ) для взаимодействия газа с жидкостью важное значение имеет численное значение брызгоуноса. Кроме того, брызгоунос существенно изменяет структуру жидкостного потока по аппарату, существенно влияет на эффективность работы многоступенчатого массообменного аппарата. Допустимое значение брызгоуноса зависит от условий статики процесса на данной ступени, нагрузки по фазам и кратности циркуляции.

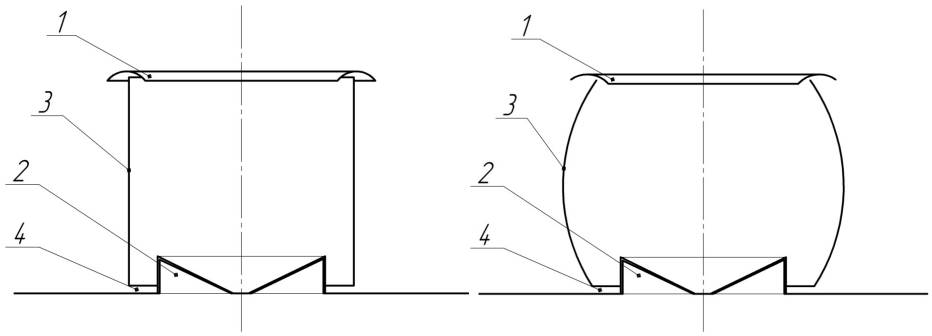
Известно несколько различных методов определения количества жидкости, уносимой потоком газа на вышележащие тарелки. Широкое распространение получил метод непосредственного замера количества уносимой жидкости. В этом случае, унесенная потоком газа жидкость, собирается на верхней неорошаемой ступени, имеющей одинаковую с рабочими ступенями конструкцию и дополненную сверху фильтром для полного улова мелких капель. Этот метод достаточно прост и дает хорошо воспроизводимые результаты.

Исследование брызгоуноса проводилось на системе воздух-вода при изменении расходов газа от 200 до 700 м^3 /час, жидкости от 0,85 до 52,60 м^3 /м^2 час, при температуре воздуха 30°С, воды 20°С. В качестве контактного устройства использовались ВКУ диаметром 0,07 м, высотой 0,13 м, внутри которых располагался аксиальный завихритель. Кроме того, исследовано ВКУ с выпуклым патрубком, диаметром в центральной части равным 130 мм.

Измерение брызгоуноса осуществлялось на экспериментальной установке, схема которой представлена в работе [1-3]. Уносимые с исследуемого ВКУ частицы жидкости попадали в брызголовушку. Жидкость собиралась на тарелке и через патрубок отводилась из аппарата. Уносимые с брызголовушки малые капли жидкости попадали в туманоловушку, имеющей фильтр. Двухступенчатая сепарация уносимой жидкости из рабочего ВКУ обеспечивала полное их улавливание.

На рис.1 представлены исследуемые конструкции ВКУ с различными контактными патрубками и аксиальным завихрителем. На рис. 2 представлена

зависимость брызгоуноса ВКУ с цилиндрическим патрубком и аксиальным завихрителем от изменения скорости в патрубке при различных расходах жидкости.



а) б)

Рис. 1. Схемы ВКУ с различными контактными патрубками и аксиальным завихрителем: а) с цилиндрическим патрубком, б) с выпуклым патрубком; 1 – отбойник; 2 – аксиальный завихритель; 3 –патрубок; 4 – отверстие для входа жидкости

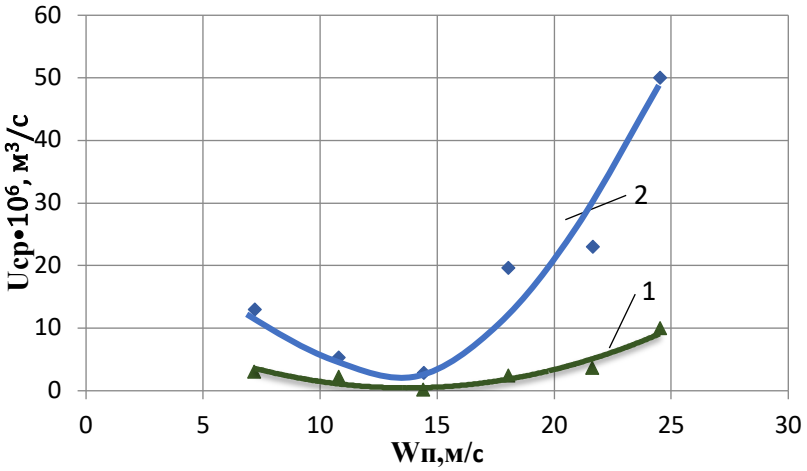


Рис. 2. Зависимость брызгоуноса ВКУ с цилиндрическим патрубком и аксиальным завихрителем от изменения скорости в патрубке при различных расходах жидкости: 1 – $L \bullet 10^4 = 0{,}358$ м^3/с; 2 – $L \bullet 10^4 = 0{,}946$ м^3/с; $D_п$=70 мм, высота патрубка H=130 мм

На рис. 3 показана зависимость брызгоуноса ВКУ с выпуклым патрубком и аксиальным завихрителем от изменения скорости в патрубке при различных расходах жидкости.

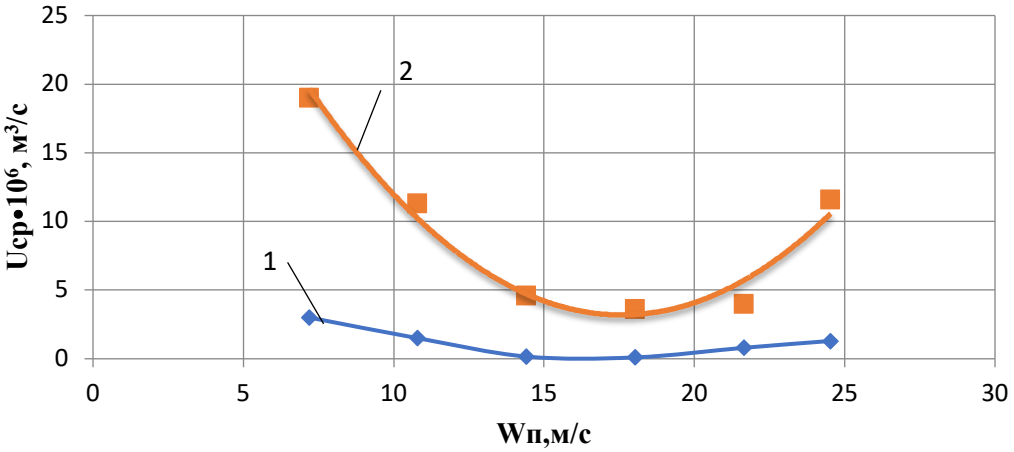


Рис. 3. Зависимость брызгоуноса ВКУ с выпуклым патрубком и аксиальным завихрителем от изменения скорости в патрубке при различных расходах жидкости: 1 – L•10^4= 0,358 $м^3/с$; 2 – L•10^4= 0,946 $м^3/с$; $D_п$=70 мм, высота патрубка H=130 мм

На рис. 4 представлена сравнительная зависимость брызгоуноса ВКУ с различными контактными патрубками и аксиальным завихрителем.

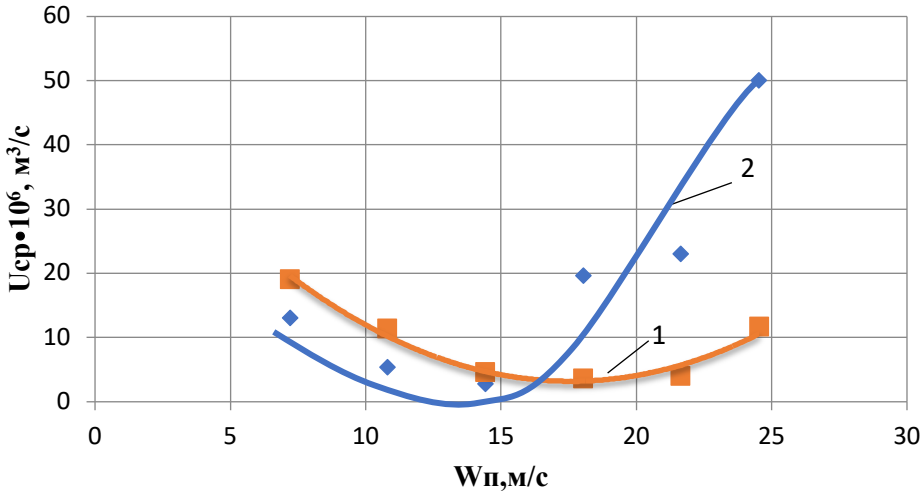


Рис. 4. Зависимость брызгоуноса ВКУ с различными патрубками и аксиальным завихрителем: 1 – ВКУ с выпуклым патрубком; 2 – ВКУ с цилиндрическим патрубком от изменения скорости в патрубке при одинаковом расходе жидкости L•10^4= 0,946 $м^3/с$

Выводы:

Экспериментальные исследования брызгоуноса ВКУ с разной геометрией контактных патрубков показал, что брызгоунос находится в экстремальной зависимости от режимных и конструктивных параметров. Минимальный брызгоунос ВКУ с цилиндрическим патрубком и аксиальным завихрителем находится в интервале скоростей по патрубку от 12-16 м/с, а для ВКУ с выпуклым патрубком и

аксиальным завихрителем интервал смещается к диапазону 15-20 м/с. Это отличие связано с аэродинамикой контактных патрубков, в данном случае наличием выпуклого контактного патрубка.

Литература:

1. Петров В.И. О значимости брызгоуноса в тепломассообменных процессах очистки отходящих газов / В.И. Петров, А.Ф. Махоткин и др.// Междунар. метод. конф. «Экология – образование, наука и промышленность»: сб. науч. тр./БГТУ.-Белгород.2002. – С.213-216.

2. Петров В.И. Анализ и исследование брызгоуноса жидкой фазы вихревых контактных устройств /Петров В.И.Трусов А.О., Ушанов И.Н.// Вестник технологического университета. – 2019. –Т.22, №11. – С.45-49.

3. Александров И.А. Массопередача при ректификации и адсорбции многокомпонентных смесей. Л.: Химия, 1975. – 319 с.

УДК 621.175

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ВАКУУМНОЙ ДЕАЭРАЦИИ В КОНДЕНСАТОРАХ ПОВЕРХНОСТНОГО ТИПА

Водениктов А.Д., Чичирова Н.Д.
Казанский государственный энергетический университет,
E-mail: vodhan@mail.ru

Неотъемлемой частью большинства паровых турбин тепловых и атомных электростанций является конденсатор – теплообменный аппарат, предназначенный для конденсации отработавшего в турбине пара. Помимо поддержания минимально возможного давления пара за последней ступенью турбины, конденсатор является первой ступенью деаэрации в системе регенеративного подогрева. Содержание растворенного кислорода в основном конденсате регламентируется правилами технической эксплуатации (ПТЭ) и не должно превышать 20 мг/дм^3.

Как показывает практика эксплуатации, в случае неудовлетворительной плотности вакуумной системы паровой турбины, а также при неблагоприятных эксплуатационных факторах (малый пропуск пара в конденсатор, низкая температура охлаждающей воды [1]) не представляется обеспечить необходимую степень деаэрации конденсата в конденсаторе. Это обстоятельство приводит к росту скорости коррозии регенеративных подогревателей, трубопроводов и арматуры, а также выносу продуктов коррозии в котел [2]. В связи с этим, возникает потребность в решениях, способствующих интенсификации десорбции растворенного кислорода.

Некоторые марки конденсаторов имеют специальные устройства – деаэрационные конденсатосборники. Принцип работы основан на нагреве основного конденсата паром, доведением до температуры насыщения с последующим удалением кислорода. Подобные устройства присутствуют в конденсаторах 800 КЦС (турбина К-800-240 ЛМЗ), К-15240 (турбина К-300-240 ХТЗ). Однако, широко распространенные турбины (К-210-130 ЛМЗ, ПТ-60-130 ЛМЗ, Т-100-130 УТЗ) не имеют подобных устройств. В связи с этим, дле решения вышеописанной проблемы, автором был предпринят проект реконструкции конденсатора 200 КЦС-2 паровой турбины К-210-130.

Реконструкция конденсатора включала в себя перетрассировку паропроводов и установку в существующий конденсатосборник барботера.

Программа испытаний предусматривала включение устройства в работу при номинальной нагрузке турбины. Результаты испытаний устройства представлены на рисунке 1. При включении устройства в работу, концентрация растворенного кислорода уменьшилась более чем в 2,5 раза и достигла значений ниже установленных правилами технической эксплуатации.

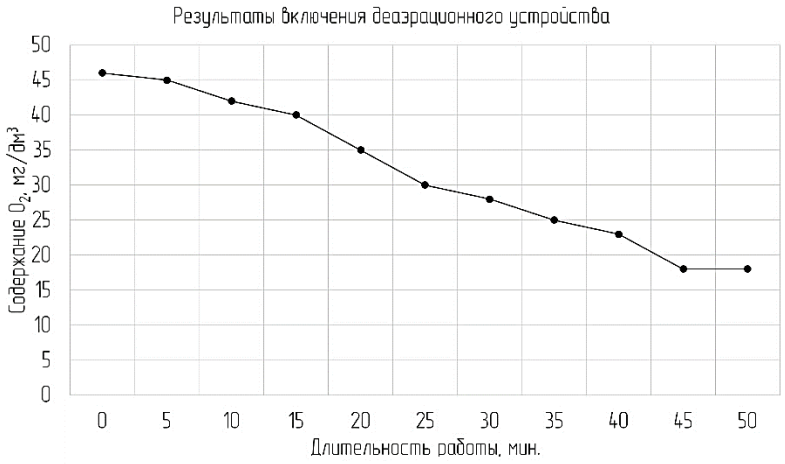


Рис. 1. Результаты испытания деаэрационного устройства

В ходе проведения модернизации было отмечено следующее:

1. Существующая конфигурация конденсатосборников и днищ конденсаторов накладывает существенные ограничения на габариты устройства, не позволяя максимизировать время и площадь контакта конденсата и пара.

2. Включение в работу деаэрационного устройства не вызывает запаривания конденсата и практические не влияет на глубину вакуума в конденсаторе.

Литература:

1. Водениктов А. Д., Чичирова Н. Д. Влияние температуры охлаждающей воды на деаэрирующую способность конденсатора 200-КЦС-2 //Труды Академэнерго. – 2020. – №. 4. – С. 7-18.

2. Кирш А.К. Деаэрация конденсата в конденсаторах паровых турбин. М.: БТИ ОРГРЭС, 1960. 28 с.

УДК 622.691.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТУРБОДЕТАНДЕРА В ПРОЦЕССАХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Вторушина В.А., Дружинина Д.Н., Таранова Л.В.
Тюменский индустриальный университет,
E-mail: general@tyuiu.ru

В настоящее время все большую долю сырья в нефтехимической промышленности занимают природный и попутный нефтяной газы. В связи с этим разработка схем подготовки и переработки газа приобретает все большее значение и является важной и актуальной задачей развития всей отрасли.

Широкое распространение в процессах переработки природного газа на газоперерабатывающих заводах получили турбодетандеры, в которых они также являются основными источниками холода [3].

В данной работе рассмотрен способ охлаждения газа с помощью турбодентадерного агрегата и его аппаратурное оформление в процессах низкотемпературного разделения углеводородных газов.

Турбодетандеры – это турбомашины, используемые для расширения газов. Основным назначением турбины является выработка механической энергии, а турбодетандера — это производство холода [1]. Схема турбодетандера приведена на рисунке 1.

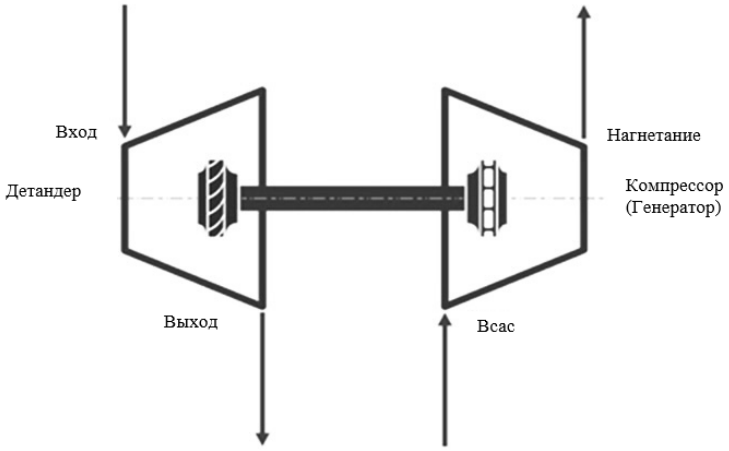


Рисунок 1 – Схема турбодетандера

В мировой практике турбодетандерные установки используются на каждом пятом газоперерабатывающем заводе (ГПЗ), и их количество постоянно возрастает. Известен ряд технологических схем газопереработки с помощью турбодетандерного агрегата (ТДА) [1] и их последующее становление, бесспорно, имеет крупное научно-техническое значение.

Результативность работы установок низкотемпературной сепарации (НТС) и низкотемпературной конденсации (НТК) зависит от состава газа, давления и температуры процесса, числа ступеней конденсации, характеристик оборудования и др. факторов. Поэтому, при недостаточном избыточном давлении газа, в схему включается испаритель, где охлаждение газа осуществляется с применением внешнего хладагента. Следует отметить, что наиболее низкую температуру можно получить за счет применения ТДА.

Одна из особенно распространённых схем установки НТС с турбодетандером, предназначенным для сжижения низкокипящих углеводородов природного газа, приведена на рисунке 2.

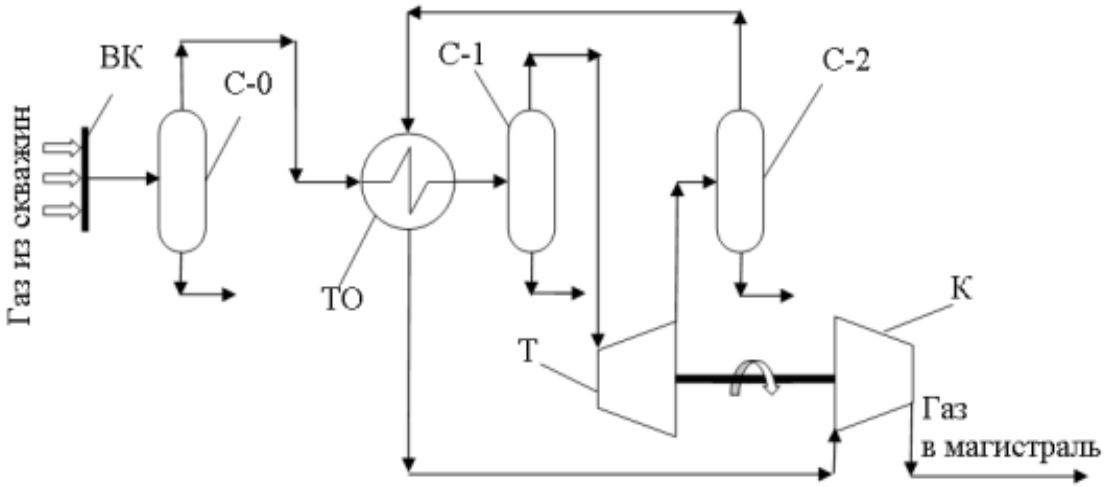


Рисунок 2 – Принципиальная схема турбодетандерного агрегата для сжижения низкокипящих углеводородов природного газа: ВК – входной коллектор; С-0, С-1, С-2 – сепараторы предварительной, вторичной очистки и низкотемпературный; ТО – рекуперативный теплообменник; Т – турбина турбодетандерного агрегата; К – компрессор.

Принцип работы данной схемы заключается в следующем: из месторождения сырой газ поступает в сепаратор С-0, в котором разделяется на две фракции газообразную и жидкую. В последствии газообразная фракция подается в рекуперативный теплообменник (ТО), в котором охлаждается обратным потоком сухого газа. В результате охлаждения происходит частичная конденсация газа, после охлаждения в ТО газ подается в сепаратор С-1, в котором происходит дальнейшее разделение жидкой и газообразной фракций. Осушенный газ направляется в турбодетандер, в котором газ расширяется с понижением температуры и давления. При этом происходит частичная конденсация газа, в последствии чего газ становится влажным.

Расширяясь газ вырабатывает механическую энергию, которую отдает присоединенному компрессору. Затем влажный газ поступает в сепаратор С-2, в котором происходит дополнительное разделение жидкой и газообразной фракций,

из сепаратора С-2 сухой газ направляется в ТО, где отдает свой холод сырому газу. После ТО нагретый сухой газ поступает в компрессор, присоединенный к турбодетандеру, в котором сжимается и после повышения давления и температуры газ направляется в магистраль.

Низкотемпературная конденсация (НТК) – процесс изобарного охлаждения природного газа, попутного нефтяного газа (ПНГ) сопровождающийся последовательной конденсацией отдельных компонентов газового конденсата или их фракций при определенном давлении. Осуществляется при температурах от 0 до минус 40 °С.

НТК осуществляется по следующей схеме. После первичной обработки во входном сепараторе 1, газ поступает в теплообменник 2, где охлаждается, встречным потоком отсепарированного холодного газа. После теплообменника проходит в сепаратор I ступени 3, расширяется, охлаждается и частично конденсируется в турбодетандере 4 и поступает в сепаратор II ступени 5. Из сепаратора газ подается в межтрубное пространство теплообменника 2 и после сжатия в компрессоре 6, находящемся на одном валу с турбодетандером, направляется в выходной коллектор (на рисунке не показан), а затем в магистральный газопровод. Выделившийся в процессе сепарации конденсат поступает на установку стабилизации. Принципиальная технологическая схема НТК с турбодетандером представлена на рисунке 3.

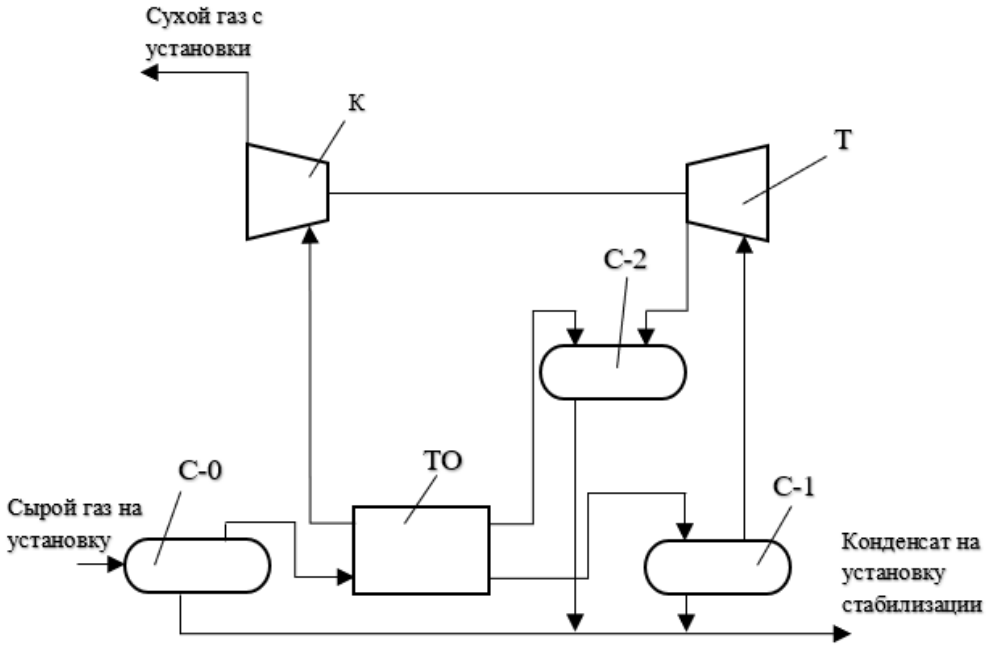


Рисунок 3 – Принципиальная схема промысловой установки НТК с турбодетандером: 1, 3, 5 — сепараторы; 2 – регенеративный теплообменник; 4 – турбодетандер; 6 – компрессор турбодетандерного агрегата. I – сырой газ на установку; II – сухой газ с установки; III – конденсат на установку стабилизации

Турбодетандер в представленной схеме может быть включен с целью рационального использования энергии пласта. При снижении давления газа до значения, при котором невозможно обеспечить заданную температуру сепарации за счет энергии пласта, в схему включается источник искусственного холода – холодильный агрегат. Технологический режим установки НТК определяется термодинамической характеристикой месторождения, составом газа и газового конденсата, а также требованиями, предъявляемыми к продукции нефтепромысла.

Для высокой четкости разделения углеводородных газов путем однократной конденсации и последующей сепарации добиться практически невозможно, поэтому современные схемы НТК включают ректификационные колонны деметанизации/деэтанизации/дебутанизации.

Из рассмотренных методов самым легким и распространенным вариантом обработки газа при таких условиях — это низкотемпературная сепарация газа, так как используется минимум капитальных вложений при удовлетворяющих показателях на выходе. Также огромным плюсом данного метода является простота эксплуатации и обслуживания оборудования.

Недостатки: низкое извлечение конденсата, большие потери, связанные с уносом «ценных» компонентов. Подготовка конденсата в колонне-стабилизаторе позволяет в разы сократить расход газа, сжигаемого на факеле, и увеличить количество конденсата.

Достоинства установки НТК: низкие капитальные и эксплуатационные затраты, недостатки: низкие степени извлечения конденсатообразующих компонентов из тощих газов, непрерывное снижение эффективности в процессе эксплуатации за счёт облегчения состава пластовой смеси, необходимость коренной реконструкции в период исчерпания дроссель-эффекта.

Исходя из приведенных преимуществ и недостатков рассмотренных методов можно сделать выводы, что:

-НТК по сравнению с НТС позволяет получать боле стабильную точку росы вне зависимости от перепада давления газа и времени года;

-НТК позволяет охлаждать газ до более низкой температуры по сравнению с НТС и получать больше жидких продуктов [2].

Литература:

1. Бекиров Т.М. Технология обработки газа и конденсата / Т.М. Бекиров, Г.А. Ланчаков. – М.: Недра, 2002. – 596 с. – Текст: непосредственный.

2. Преимущества и недостатки НТК и НТС: [сайт]. – URL: https://gazsurf.com/ru(дата обращения: 1.04.2022). – Текст: электронный.

3. Трухний А.Д. Термодинамические основы использования утилизационных турбодетандерных установок / А.Д. Трухний.–Текст: непосредственный. // Журнал «Вестник МЭИ». Москва – 1999. - №5. – С. 62-66

УДК 66.021.1

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ НЕФТИ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ В ФИЛЬТРЕ-ГРЯЗЕУЛОВИТЕЛЕ

Гайнутдинов А.Р., Алексеев В.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: stopgameheat@gmail.com

Фильтр-грязеуловитель (ФГУ) входит в состав технологических трубопроводов нефтеперекачивающих станций (НПС) и предназначен для защиты приборов и оборудования нефтепроводов от механических примесей, парафин смолистых отложений и посторонних предметов [1]. Общий вид ФГУ представлен на рис. 1.

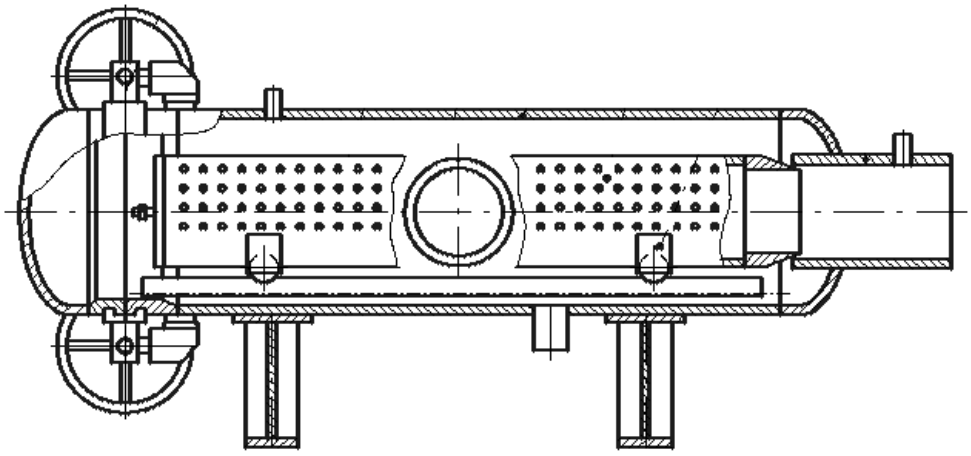


Рис. 1

Нефть проходит через один или несколько ФГУ, где она очищается. Значение максимального перепада давления на ФГУ принимается по техническим требованиям завода-изготовителя и составляет 0,03 Мпа [2]. Далее нефть поступает в магистральную насосную.

Внутри цилиндрического корпуса фильтра установлен съемный фильтрующий элемент многократного использования в виде перфорированной трубы с размерами отверстий от 4 до 12 мм, изготовленный из коррозионно-стойкой стали. Для перемещения фильтрующего элемента внутри корпуса предусмотрены искронедающие ролики. Номинальная тонкость фильтрации выбирается проектной организацией из ряда в зависимости от места установки фильтра [1,2]. Состояние фильтров при их эксплуатации постоянно контролируетсяс помощью манометров, установленных на входе и выходе каждого аппарата. При повышенном перепаде давления на каком-либо из фильтров он отключается и содержащиеся в нем механические скопления удаляются.

Технические осмотры ФГУ проводятся: дежурным персоналом НПС 2 раза в смену с контролем перепада давления; инженерами служб 1 раз в день; заместителем начальника НПС 1 раз в 2 дня; начальником НПС 1 раз в месяц при общем обходе НПС [2].

Актуальность автоматизации ФГУ возросла в связи с наличием на НПС морально устаревших манометров, отсутствием автоматизированного контроля за перепадом давления на ФГУ, а также длительностью технического обслуживания. На блоке фильтров стоят манометры избыточного давления, для измерения давлений на входе и выходе. При очистке магистрального трубопровода, а также после его ремонта и пропуска диагностических устройств в течение не менее 12 час осуществляется контроль перепада давления с периодичностью не реже одного раза в час.

Одним из недостатков работы ФГУ является отсутствие автоматизированного контроля за перепадом давления. Он осуществляется визуально обслуживающим персоналом.

Для упрощения процедуры замера перепада давления непосредственно на площадке ФГУ предлагается внедрить датчик разности давлений типа Метран-150. Его основные технические характеристики приведены в таблице [3].

Таблица 3

Наименование показателя	Значение
Диапазон измерений давления (шкала прибора), МПа	0 - 68
Основная приведенная погрешность, %	0,075
Температура измеряемой среды, °С	- 40…149
Температура окружающей среды, °С	- 40…80
Стоимость, руб.	20000

Внешний вид датчика (рис. 2) состоит из сенсора и электронного преобразователя.

Сенсор состоит из измерительного блока, схема которого представлена на рис. 3, и платы аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Давление подается в камеру измерительного блока, преобразуется в деформацию чувствительного элемента и изменение электрического сигнала.

Схема датчика состоит из корпуса (1), емкостной измерительной ячейки (2), разделительной мембраны (3), разделительной жидкости (4), измерительной мембраны (5) и пластины конденсатора (6).



Рис. 2

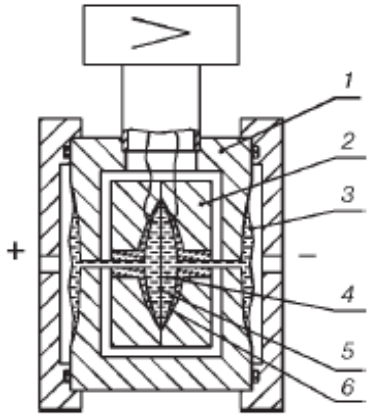


Рис. 3

Измерительный блок датчиков этих моделей состоит из корпуса 1 и емкостной измерительной ячейки 2. Емкостная ячейка изолирована механически, электрически и термически от измеряемой и окружающей сред. Измеряемое давление передается через разделительные мембраны 3 и разделительную жидкость 4 к измерительной мембране 5, расположенной в центре емкостной ячейки. Воздействие давления вызывает изменение положения измерительной мембраны 5, что приводит к появлению разности емкостей между измерительной мембраной и пластинами конденсатора 6, расположенным по обеим сторонам от измерительной мембраны. Разность емкостей измеряется АЦП и преобразуется электронным преобразователем в выходной сигнал [4].

Его применение позволит упростить процедуру замера перепада давления непосредственно на площадке ФГУ и уменьшить время общего технического обслуживания.

Основным преимуществом данного датчика является отечественное производство, необходимое для условий импортозамещения при невысокой стоимости относительно импортных аналогов.

Литература:

1. ОТТ-75.180.00-КТН-179-10
2. ГОСТ Р 53676-2009
3. https://www.emerson.ru/ru-ru/catalog/metran-150-ru-ru
4. https://www.emerson.ru/documents/automation/%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA-%D0%B4%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F-%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD-150-%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%B4%D0%B5%D0%BB-%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B0-ru-4848826.pdf

УДК 66-9

ВЛИЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ НА ПРОЦЕССЫ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ МЕТОДАМИ ЭКСТРАКЦИИ

Горшунова А.Н., Салин А.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: 225111@mail.ru

Нарастание темпов нефтехимических производств и интенсификация процессов химической технологии неизбежно приводят к увеличению объёмов входного контроля исходного сырья, качества получаемой продукции и контроля содержания вредных и опасных веществ в отходах производства. Востребованность аналитических исследований влечет за собой увеличение затрат времени на проведение процессов концентрирования, как основной части подготовки образцов для определения содержания микрокомпонентов. В нефтегазовой промышленности и химической технологии в качестве методов концентрирования наиболее широко распространены жидкостная и твердофазная экстракция, в связи чем на сегодняшний день актуальной задачей представляется решение вопросов увеличения производительности и улучшения метрологических показателей методов экстракционного концентрирования.

Для успешного проведения большинства процессов концентрирования, связанных с тепло- или массообменом, необходимо принудительное перемешивание. Интенсивность перемешивания определяет не только скорость и полноту протекания процесса, но часто и возможность его проведения. В особенности это относится к случаям взаимодействия твердых или газообразных тел с жидкостями, а также двух несмешивающихся жидкостей. Для малых объемов и времени используется, как правило, ручное перемешивание, в остальных случаях широко используются мешалки пропеллерного типа с одной или двумя лопастями, которые перемешивают почти любые жидкости, пригодны как для высокоинтенсивных процессов, так и в тех случаях, когда необходимо обеспечить спокойную равномерную циркуляцию жидкости. К основным недостаткам перемешивающих устройств можно отнести: использование стеклянной посуды, длительное гравитационное отстаивание, неприспособленность объема используемой лабораторной посуды к индивидуальным методикам и большой разброс опытных данных по концентрированию.

Как правило, процесс жидкостной и твердофазной экстракции сопровождается последующей операцией гравитационным расслаиванием экстракта и образца, либо разделением при помощи различных центрифуг. Изъятие образца из аппарата и слив экстракта для подготовки его к дальнейшему использованию,

как правило, производится вручную, в результате чего происходят потери микрокомпонента.

В связи с вышесказанным, для проведения полного цикла пробоподготовки необходимо использование комбинации приборов для перемешивания исходной смеси с растворителем и последующего разделения фаз (концентрирования экстрактов), при этом представляется возможным использование комбинированных центробежных аппаратов с целью интенсификации рассматриваемых процессов и сокращения потерь экстрагента и разделяемых компонентов [1, 2]. Для разработки аппаратуры необходимо четкое представление о том, какие параметры являются определяющими и оказывают значительное влияние на процессы жидкостной и твердофазной экстракции в качестве методов концентрирования микрокомпонентов.

Как известно, в литературе [3] широко освещен процесс жидкостной экстракции и его аппаратурное оформление [4], в работах по перемешиванию смесей, в том числе аппаратах центробежного типа. На практике микропримесь не полностью переходит в растворитель (экстрагент), определенная ее часть остается в жидком образце. Распределение микрокомпонента в жидкости и в экстрагенте характеризуется следующим соотношением:

$$\varphi = \frac{C_р}{C_ж} \cdot \frac{V_o}{V_э} \quad (1)$$

где φ – коэффициент распределения, определяемый опытным путем и зависящий от свойств жидкой системы, температуры и концентрации; V_o, $V_э$ – объемы образца и экстракта. Эффективность экстрагирования увеличивается с повышением значения φ. В аналитической химии эффективность отделения экстракта от образца принято определять значением «процента извлечения», когда определяется содержание микрокомпонентов в растворителе. Из литературного обзора можно сделать вывод, что процесс жидкостной экстракции зависит от следующих параметров [5]:

- разности концентраций микрокомпонента в образце и растворителе;
- поверхности контакта фаз;
- времени контакта;
- температуры процесса;
- интенсивности перемешивания;
- геометрических характеристик контактных элементов;
- pH среды;
- соотношения объемов обрабатываемых систем;
- вязкости образца и растворителя.

При обработке результатов рассмотренных исследований, как правило используется общее критериальное уравнение массопередачи:

$$Nu \sim Re^z \cdot Pr^q \quad (2)$$

где $Nu = {\beta\ell}/{D}$ – критерий Нуссельта, $Re = {w\ell\rho}/{\mu}$ – критерий Рейнольдса, $Pr = \mu/D\rho$ – критерий Прандтля; z и q – коэффициенты, зависящие от режимов массообмена; β – коэффициент массоотдачи; D – коэффициент диффузии; w – скорость потока; ρ – плотность; μ – вязкость, где

$$\beta = \frac{D}{l}\left(\frac{w\ell\rho}{\mu}\right)^{t}\left(\frac{\mu}{D\rho}\right)^{q} \quad (3)$$

Отсюда следует, что одним из наиболее влияющих факторов является интенсивность перемешивания, которую можно выразить через критерий Рейнольдса (*Re*), представляющий собой отношение сил инерции к силам внутреннего трения и определяющий характер течения.

Таким образом, взаимное влияние параметров процесса экстракции на эффективность, можно выразить в виде функциональной зависимости $\varphi_к = f(к_{с.ф.}, \tau, I, C_0, П.К.Ф., d_к, t, Г, pH, Re, \mu)$, где $\varphi_к$ – процент извлечения; $к_{с.ф.}$ – соотношение фаз; τ – время процесса; I – интенсивность перемешивания; C_0 – начальная концентрация микропримесей в образце; *П.К.Ф.* – поверхность контакта фаз; $d_к$ – диаметр капель; t – температура процесса; $Г$ – геометрические параметры перемешивающего устройства; pH – кислотность среды; μ – вязкость обрабатываемой смеси.

Сложность процессов твердофазной экстракции (экстрагирования) зависит от большого числа параметров [3], и определяется количеством и разнообразием способов концентрирования образцов и определения содержания при контроле качества на всех этапах производства в химической технологии. Кроме того, при проведении твердофазной экстракции используют ряд дополнительных операций:

- подготовка образца (измельчение, классификация, сушка и т.п.);
- подготовка (очистка, перегонка) и регенерация экстрагента;
- разделение образца и экстрагента (отстаивание, центрифугирование и т.д.);
- фильтрация и концентрирование микрокомпонента.

Если процессы жидкостной экстракции относительно широко исследованы в многочисленных аппаратах, то в теории твердофазной экстракции рассмотрены, в основном, вопросы диффузии в пористых средах и кинетика извлечения экстракционных веществ [3]. В результате литературного обзора установлено, что требуемая степень извлечения целевых веществ из твердых продуктов и возможность интенсификации указанного процесса во многом определяются структурой самого твердого тела (носителя) и агрегатным состоянием извлекаемого компонента. Скорость экстракции существенно зависит также от размера и формы пор. Для сравнительно больших пор движение жидкости в них достаточно интенсивно и диффузия близка к конвективной. Для малых же пор

движение жидкости пренебрежимо мало и вещество переносится значительно медленнее, в основном за счет молекулярной диффузии.

Извлечение микрокомпонентов из твердых образцов состоит из двух стадий - диффузия экстрагента в объем твердой фазы и выход растворителя с извлекаемым компонентом на поверхность пор твердого образца. Таким образом, в дополнение к вышеназванным параметрам жидкостной экстракции эффективность процесса экстрагирования из твердого образца обеспечивается следующими основными условиями:

1) выбор растворителя;

2) физико-химические свойства систем

2) степень измельчения образца;

3) температурных условий;

4) соотношение объемов пробы и растворителя;

5) продолжительность проведения процесса экстрагирования.

При дальнейшем тщательном анализе результатов экспериментальных исследований представляется возможным определение степени значимости каждого из влияющих параметров, что необходимо при проектировании новой экстракционной аппаратуры и совершенствовании существующего оборудования с целью улучшения метрологических характеристик процесса концентрирования.

Литература:

1. Салин, А. А. Действие сил Кориолиса на радиальные потоки в центробежных экстракторах / А. А. Салин, Н. С. Гришин, С. И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 7. – С. 228-231.

2. Салин, А. А. Особенности движения радиальных потоков в центробежных экстракторах безнапорного типа / А. А. Салин, Н. С. Гришин, С. И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 4. – С. 231-234.

3. Гришин, Н.С. Оптимизация аппаратурного оформления. Автоматизация пробоподготовки /Н.С. Гришин. – Казань: Изд-во Казан.ун-та, 2016. – 380 с.

4. Салин, А. А. Использование массообменной аппаратуры для автоматической пробоподготовки / А. А. Салин, А. Н. Горшунова, Н. С. Гришин // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 4. – С. 144-147.

5. Салин, А. А. Исследование влияющих параметров на процесс экстракции в центробежном аппарате безнапорного типа / А. А. Салин, А. Н. Горшунова, Н. С. Гришин // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 5. – С. 58-60.

УДК 66.023+532.52

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ РЕАКТОРОВ

Еремеев Е.В., Поникаров А.С.
Казанский национальный исследовательский технологический университет
E-mail : office@kstu.ru

Ключевые слова: пульсирующий; пульсирующий аппарат проточного типа; газожидкостный массообмен; пузырь; реактор; гидродинамика; усиление.

При движении газожидкостной смеси в проточном пульсирующем аппарате можно создать режим, приближенный к идеальному вытеснению, с высокоинтенсивным упорядоченным относительным движением фаз, что приводит к интенсификации процессов межфазного переноса.

Одним из способов экономии сырья и энергии в химической технологии представляется интенсификация процессов тепломассообмена при соблюдении условия более рационального преобразования энергии, которую ввели в аппарат. Такую интенсификацию получают , в следствие использования каналов с периодически меняющимся сечением по длине аппарата. В 1970 г. Г. Аксельруд [1], вероятно, первым призвал использовать в подобном массообменном аппарате периодически меняющуюся скорость для увеличения эффективности растворения твердых включений. В [2] для быстротекущих реакций выбирается новый тип «трубчатого турбулентного аппарата» (ТТА). В статье [3] исследуют закономерности турбулентного перемешивания фаз в трубчатых аппаратах типа «диффузор - конфузор». Подобное устройство, но имеющее немного более обтекаемую геометрическую форму - проточно пульсирующий аппарат (далее - ПАПТ) было решено использовать для процесса жидкостной обработки капиллярно-пористых частиц - пропитки и экстракции [4]. Еремеев Е.В. , Поникаров А.С.

К тому же, в недавнее время наметилась тенденция в развитии одного из наиболее перспективных направлений для интенсификации межфазного обмена в гетерогенных средах – в результате ввода энергии в основном в непосредственной близости от границы раздела фаз [5-8].

Как мы видим, данный способ преобразования энергии приводит к увеличению эффективности процессов тепломассопереноса, что выразится, , в резком увеличении удельной поверхности дисперсной фазы при сопоставимых энергетозатратах.

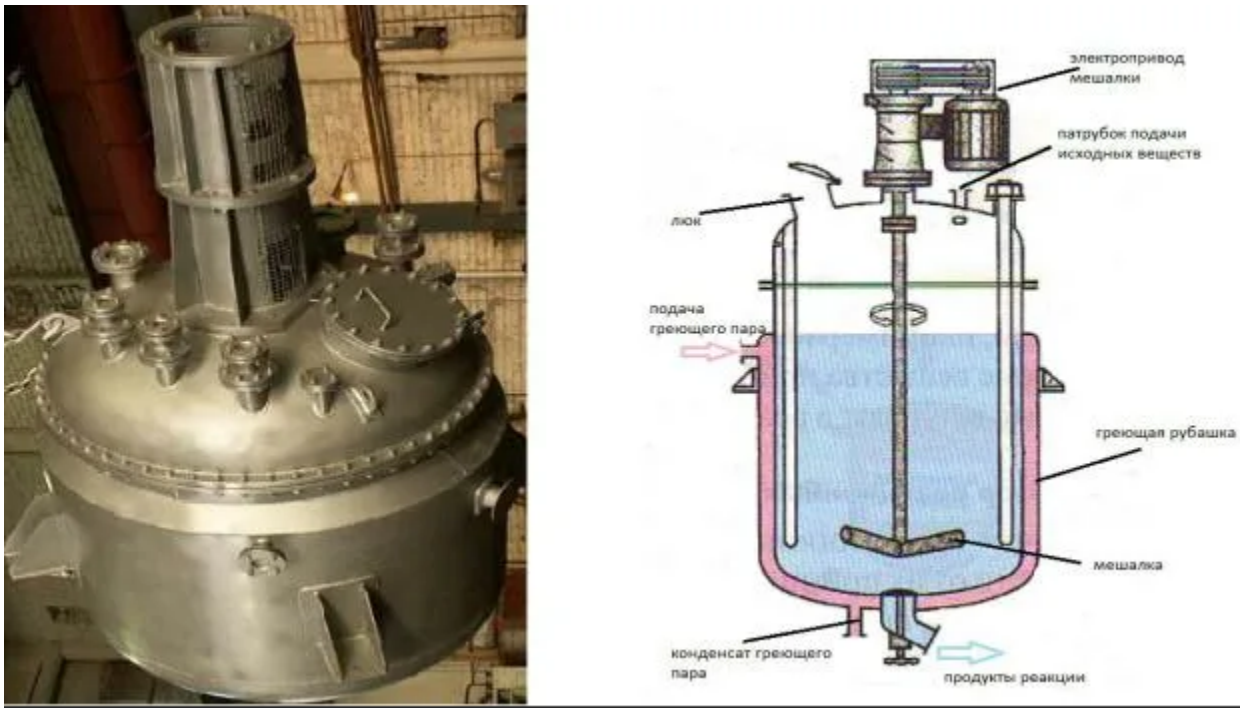


Рис. 1 – Конструкции межфазного обмена в гетерогенных средах

В принципе работы ПАТ лежит цель, смысл которой заключается в организации условий для максимально полного преобразования энергии , вводимой в аппарат, во-первых, в поверхностную энергию капель или пузырьков (в процессе диспергирования), а во-вторых, в кинетическую энергию относительного движения дисперсной и сплошной фаз, что поспособствует ускорению масообменных процессов, с поверхности капель или пузырьков, а также внутри них. Образующее рассеяние энергии в результате процесса в турбулентных вихрях рассматривается в этом случае как побочный эффект, являясь неизбежным, он остается частично управляемым.

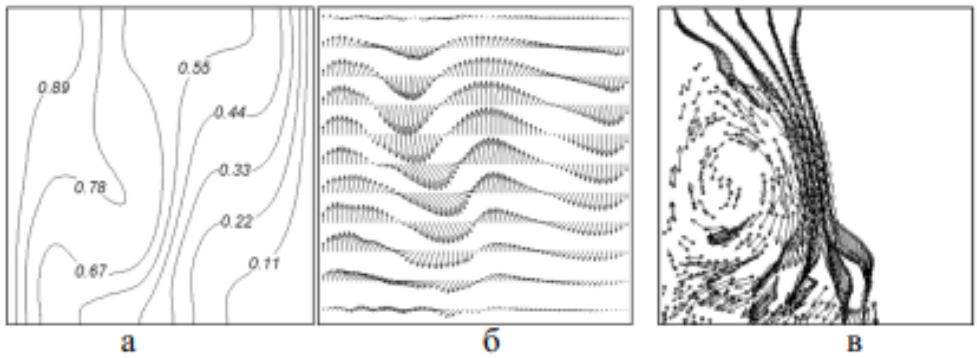


Рис. 2 - Расчетные поля температуры (а), векторов скорости несущей среды (б) и распределения дисперсных частиц (в) при Gr = 105 , Pr = 0,71, dp = 10 мкм

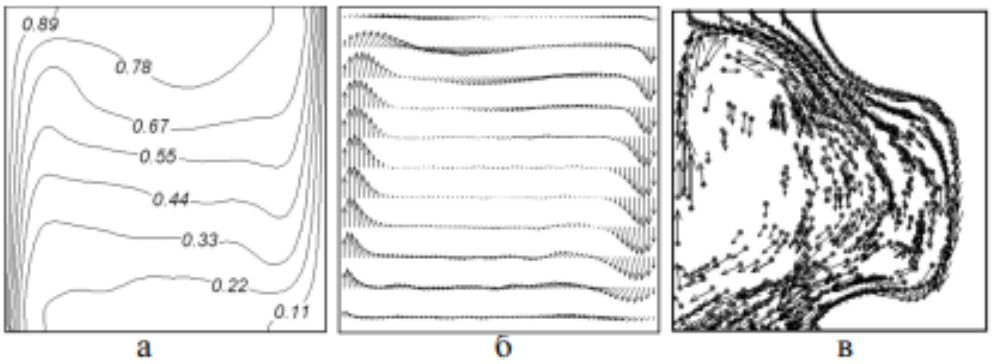


Рис. 3 - Расчетные поля температуры (а), векторов скорости несущей среды (б) и распределение дисперсных частиц (в) при Gr = 106 , Pr = 0,7, dp = 10 мкм

Несмотря на то , что гидродинамические условия течения газожидкостных смесей либо чистых жидкостей пока не слишком изучены, в промышленности активно вводят аппараты устройства типа ТТА для осуществления процесса хлорирования бутилкаучука и этилена молекулярным хлором в жидких фазах и подготовка гомогенных и газожидкостных систем [10]. Авторы [2, 9, 10] находят связь между высокой эффективностью аппаратов этого типа и значительной степенью турбулентности потока в реакционной среде. Также отмечаются преимущества таких устройств [11] как : возможность формирования турбулентного режима при малых значениях числа Рейнольдса, высокий уровень поперечной турбулентной диффузии и, при этом время, режим работы реактора, приближенний к режиму идеального вытеснения .

Хотя вопросы, связанные с гидродинамикой этих аппаратов, особенно ПАТТ, наврядли считаются решенными. Например, открыт вопрос об оптимальной форме приведенных устройств, а также линейных и угловых размерах.

Всё это осложняет разработку инженерного метода для расчета новых аппаратов и значительно усложняет расчеты различных процессов массообмена.

Для моделирования движения чистой жидкости в ПАТТ провели множество серий численных экспериментов с использованием в них системы моделирования движения газа и жидкости FlowVision от российской компании ТЕСИС.

Геометрия моделируемого для статьи аппарата включала в себянесколько последовательно соединенных между собой элементов периодичности, на рис. 4 продемонстрирован их профиль. На роль модельной среды взяли чистую воду при температуре 20°С.

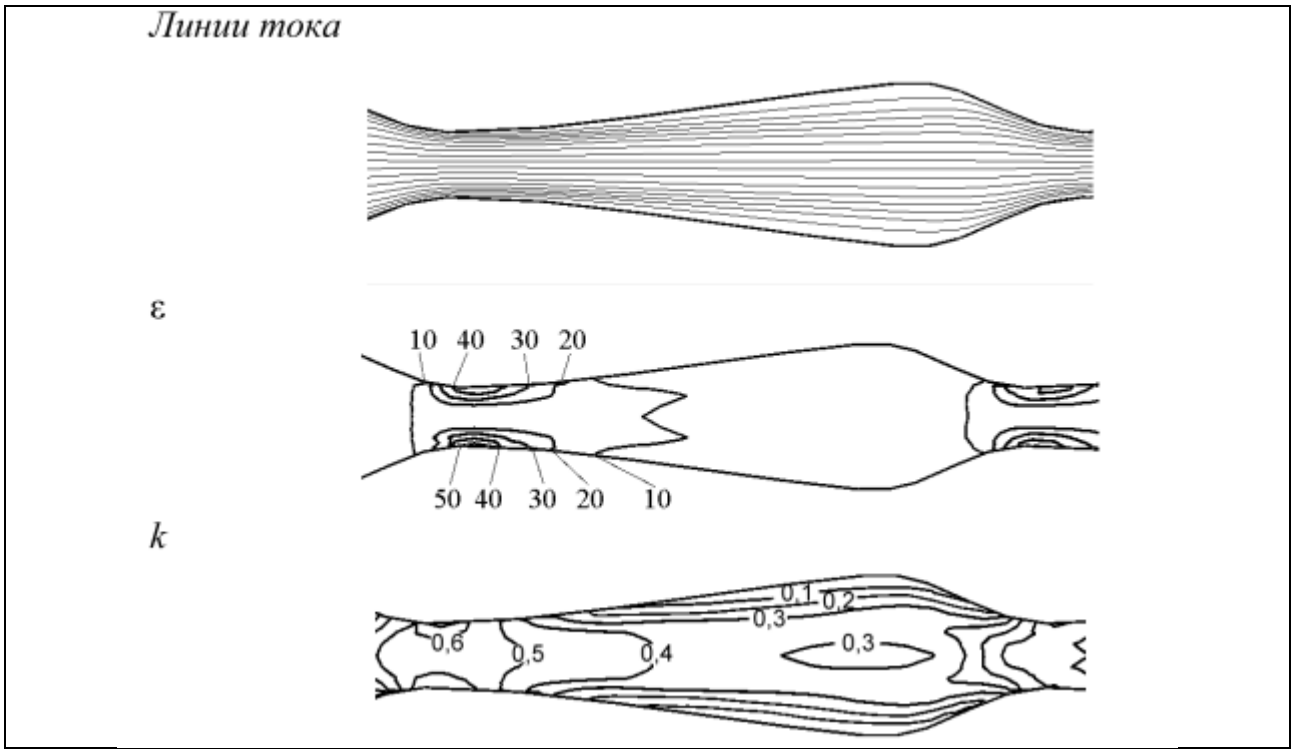


Рис. 4 - Линии тока жидкости, изолинии кинетической энергии турбулентности k (м ^{2}/с) и диссипации турбулентной энергии s (м ^{2}/с ^{3}) для ПАТФ

Для того чтобы расчетать гидродинамические характеристики ПАТТ использовал стандартнкю **k -** е модель турбулентного движения жидкости с аппроксимацией границы условия, соответствующие стенкам, с использованием логарифмического профиля скорости, подкорректированного с учетом шероховатости поверхности.

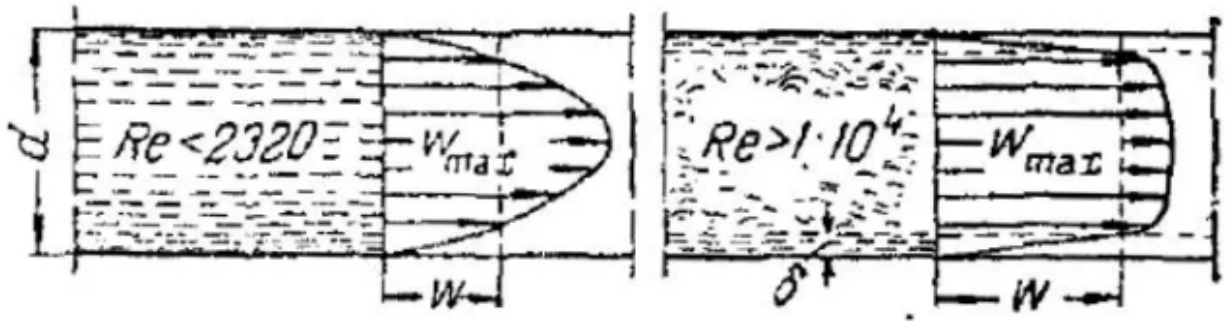


Рис. 5 - Модель турбулентного движения жидкости

В вычислительную область включили несколько факторов периодичности , чтобы исключить влияние граничных условий, соответствующих вход-выходу жидкости,.

Для решения данной задачи граничные условия, которые описывают параметры k и ε на границе, соответствующей входу в устройство, задались такими, чтобы значения условий подходили таковым на идентичном участке одного из ниже приведенных элементов периодичности.

Поскольку детерминированное моделирование движения газо-жидкостной среды при учете дробления , сжимаемости газовой фазы, а также коалесценции пузырей, относительного движения газовой или жидкой фаз в моём случае невозможно по причине ресурсоемкости и сложности. . Поэтому в данной работе используется детерминированный подход с ниже перечисленными допущениями:

- объемная доля пузырьков в аппарате настолько мала, что каждый отдельный пузырёк не влияет на движение других отдельных ближайших пузырьков , а также на движение сплошной жидкой фазы;

- жидкость протекает по каналу ПАТ не отрываясь от стенок; в каждом из сечений канала скорость равномерно распределяется по всему диаметру;

- изменения диаметра или плотности отдельного пузырька, произошедшее от изменения давления, настолько незначительно и им решено пренебречь;

- движение пузырька учитывается исключительно вдоль трубы, потому что различные силовые факторы , которые направлены поперек стенок малы в сравнении с продольными;

- коалесценция или дробление пузырей не учитывались.

В модели учитываются ниже перечисленые силы, которые действуют на пузырек:

- сила в результате градиента давлении, привязанного к измененинию скорости жидкости в продольном сечении;

- сила инерции, прикрепленной массы пузыря;

- сила сопротивления поверхности пузырька (в ней учетывается деформируемость поверхность пузырька при относительно больших скоростях);

- Сила Бассета.

Размер исследуемых пузырьков выявлен по результатам натурного моделирования движения газожидкостной смеси.[1]

Натуральная модель ПАТТ является стеклянной трубкой (рис. 6) длиной 840 мм , имеющим узкий диаметр горлышка d = 8,6 мм, диаметр же самого широкого участка D = 21,7 мм , состоящей из десяти периодичных элементов, геометрия которых совпадала геометрии элементов периодичности нашей расчетной модели. В виде моделируемых сред используется воздух и вода.

Точки замера давления расположились на цилиндрических участках стабилизации, находящихся на концах рассматриваемой трубы. Длязамера расхода воды через данную модель реактора используется расходомер электромагнитного типа 5 ЭРСВ 540М (производство «Взлет», г.Санкт-Петербург, Россия) максимальной относительной погрешностью измерения приняли ±2% от расхода.

[1] https://www.ngpedia.ru/id657642p3.html

Изменение давления по всей длине модели замеряли датчиками давления 6 и 7 марки АИР 20/М 2 ДИ (производства Элемер, Россия) с относительной погрешностью не превышающей ±0,1 % от верхнего предела измерения в 400 кПа. Расход газа же измеряли преобразователем Honeywell AVM 5104 VN с относительной погрешностью ±0,5% от максимального расхода в 20 нл /мин.



Рис. 6 – Стеклянная трубка

В результате натурного и численного моделирования движения чистой жидкости получили коэффициенты гидравлического трения для разнообразых критериев Рейнольдса. Разница между результатами натурального и численного экспериментов не превысили 18 % и объясняются ошибками во время подготовки стеклянной модели ПАТП.[2]

Таким образом, можно предположить, что математическая модель движения чистой жидкости соответствует гидродинамической ситуации в приведенной модели ФАТП.

Форма ППД такая, что в самом аппарате отсутствуют вихревые зоны, а линии тока (рис. 7) в развитом турбулентном течении имеют такую форму,которая характерна для потенциального течения. В итоге, жидкость протекает по каналу ППД не отрываяя пограничный слой от стенок на участке расширения. Также на рис. На рис. 7 представляются изолинии для турбулентной энергии k и ее диссипации ε в ППД, получемых по итогу численного моделирования при расходе воды Q = 4,72-10 $^{-4}$ м ^{3} /с и температуре t = 20 °C . (|i = 10 $^{-3}$ Па-с).

Численный эксперимент демонстрирует, что при развитом турбулентном режиме течения характер распределяемой турбулентной энергии , а также её диссипации вдоль ЦАПО никак не зависим от расхода жидкости. Довольно характерна концентрация пиковых значений турбулентной энергии , как и диссипация

[2] https://dpva.ru/Guide/GuideTricks/PressureLoss/LambdaHydraulik/

в зонах сужения , при этом максимальные значения фиксируются конкретно у стенки. Вырожденность зависимости коэффициента гидравлического трения от критерия Рейнольдса при относительно малых значениях критерия Рейнольдса и характер распределения энергии турбулентных пульсаций и ее диссипации говорит о том, что сопротивление ВАПТ с турбулентностью движения жидкости происходит в основном за счет шероховатости стенки в узкой горловины аппарата. При этом влияние шероховатости стенки на невозратные потери давления при ППД начинают фиксироваться даже при малых значениях критерия Рейнольдса потому, что длина шейки намного меньше расстояния, при котором формируется гидродинамический пограничный слой. Колебания давления по длине ППД обусловливается не только потерями от гидравлического трения, но и от изменения скорости жидкости по всей длине (потери при торможении и разгоне). Учитывая периодичность изменений в поперечном сечении аппарата продольный градиент давления тоже имеет периодический характер. После проведения численного эксперимента было установлено, что составляющая градиента давления, вызванная изменением скорости выбранной жидкости, на порядок больше, чем составляющая градиента давления, вызываемая гидравлическими потерями на трение в ПВД, сохраняя тенденцию даже при небольших скоростях, его пиковое значение на пару порядков превосходит градиент гравитационного давления.

Ввод дисперсной фазы с плотностью, отличающейся от плотности движущейся по ППД жидкости , приводит к тому, что данная дисперсная фаза от воздействия циклично переменных сил, обусловленных градиентом давления, начинает совершаеть колебания в продольном направлении относительно непрерывной фазы.

По итогам натурного эксперимента было установлено, что одно наличие в жидкости дисперсной фазы (напр. воздуха) влияет на уровень гидравлических потерь в ППДТ. При постоянном критерии Рейнольдса, от увеличения объемного газосодержания, коэффициент гидравлического трения газожидкостной смеси в ПАТ увеличивается (рис. 2).

Основная причина увеличения гидравлического сопротивления ПАТП при увеличении газосодержания это диссипация энергии при циклическом движении газовой фазы относительно жидкой фазы под воздействием продольного градиента давления, меняющегося по всей длине. Разность между мощностью, требуемой для прокачки таких же объемов газожидкостной смеси и прокачки чистой жидкости через модель РАРТ при таких же критериях Рейнольдса, привязанной к объемной доле газовой фазы, равна рассеиваемой мощности Е при относительном движении единицы объема газовой фазы.

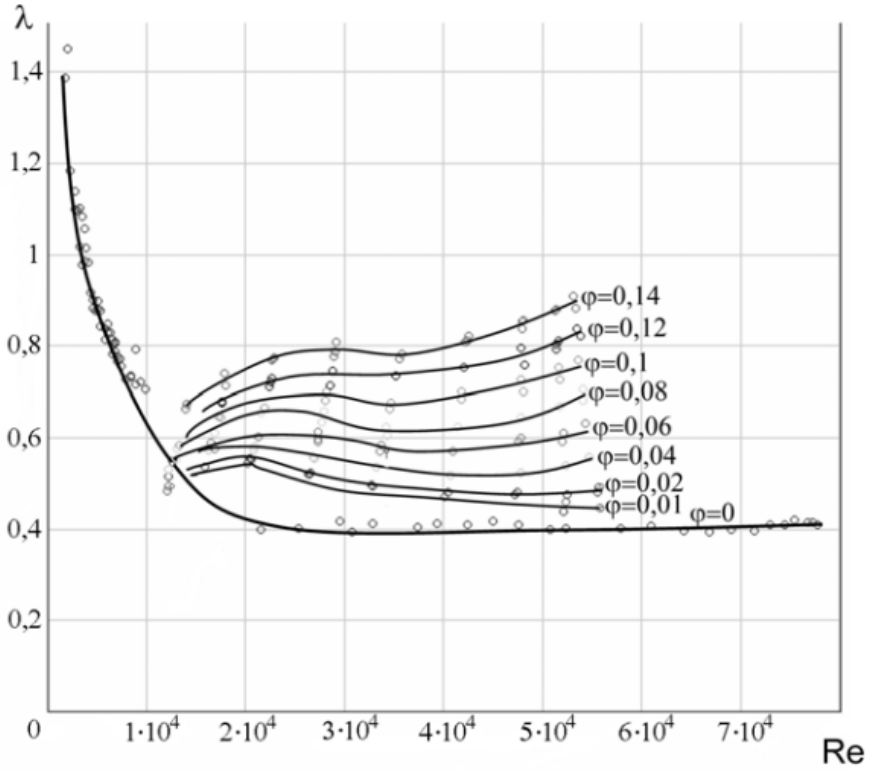


Рис. 7 - Зависимость коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса Re для чистой жидкости и газожидкостной смеси при различных газосодержаниях φ

Зависимость данной мощности от числа Рейнольдса ,а также объемного газосодержания продемострирована на рис. 7. Аналогичную зависимость мы получаем, выделив работу диссипативных сил, влияющих на газовую фазу во время ее относительного движения. Провели численное моделирование для относительного движения пузыря в канале ППД. Выявленные значения мощностей диссипативных сил движения пузырей газа для различных чисел Рейнольдса уже указаны на рис. 3.

Из указанного графика (рис. 8) видно, что мощность, рассеянная при относительном движении фаз, серьёзно зависит от газосодержания, зависимость обратная.

Вдобавок теоретическая зависимость приближена к экспериментальной особенно при малом газосодержании. Исследуя структуру газожидкостного потока с объемным газосодержанием , f = 3 % в ППД , который представляет собой плоский канал с периодически меняющейся шириной, мы выяснили, что уменьшение рассеиваемой мощности от увеличении газосодержания вероятно связано со тем , что пузыри воздуха при малом (более двух-трех процентов) газосодержании оттесняются к периферии расширений, а параллельно в центре ППД проявляется струя жидкости с большой скоростью и с меньшим средним газосодержанием в пересчете на объем. Так изменения в площади проходного сечения

ППД по длине больше не определяет скорость смеси, и значения продольных градиентов давления становятся ещё меньше в сравнении с определяемыми теоретически.

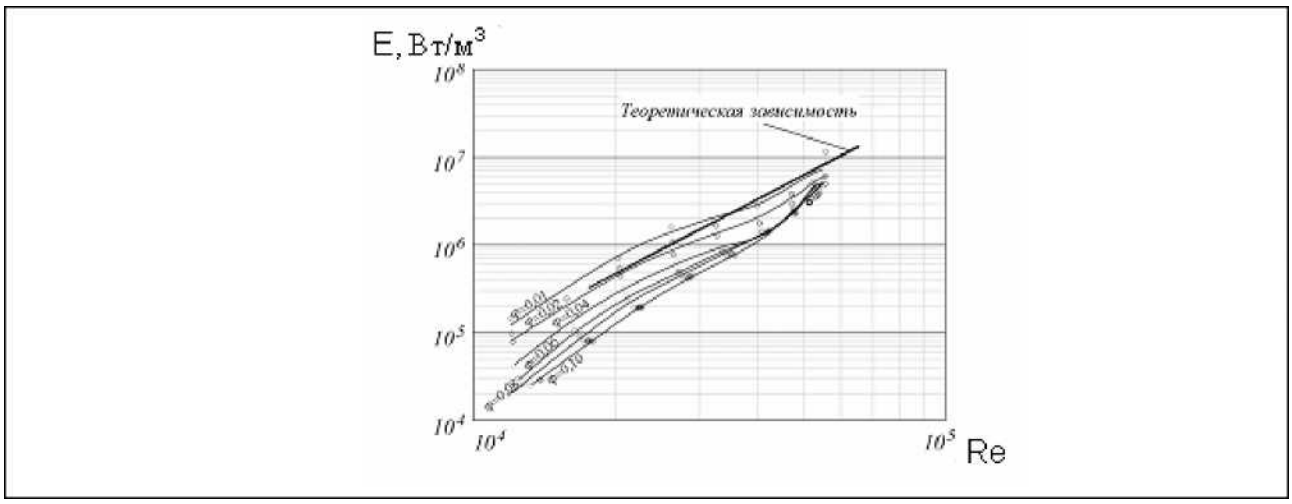


Рис. 8 - Зависимость мощности, которая рассеивается при относительном движении дисперсной фазы в сплошной фазе от критерия Рейнольдса

При малых газосодержании все допущения, которые использовались в математическом моделировании относительного движения фаз, не становятся причиной к снижению точности искомого результата. Распределение скоростей движения для сплошной жидкой фазы V и дисперсной газовой фазы относительно данной жидкости V_{0TH}, результат численного моделирования для канала РАРТ показан на рис. 9.

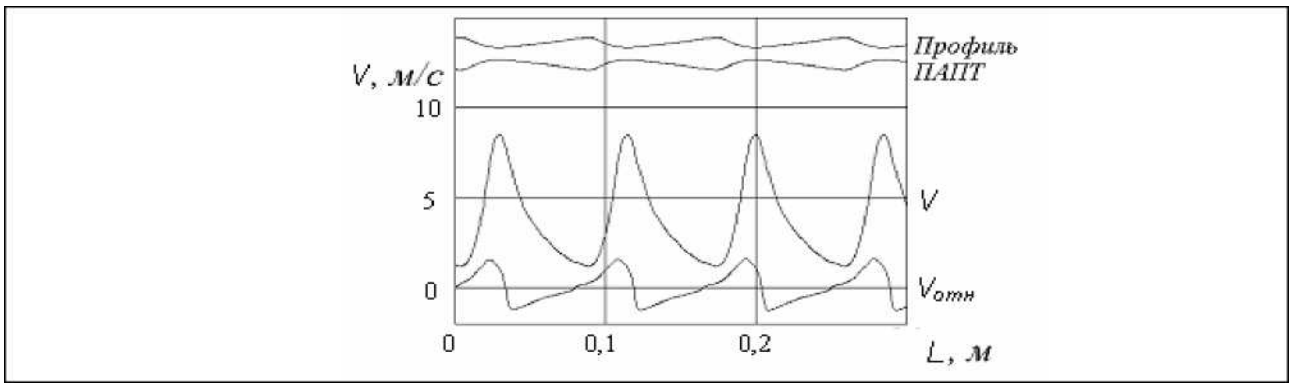


Рис. 9 - Распределение скоростей жидкости V и газовой фазы относительно жидкой фазы V_{omH} по длине ПАПТ при расходе газожидкостной смеси $Q=4{,}72\text{-}10^{-4}$ м ^{3} / с

Распределение скоростей дисперсной и сплошной фаз , полученных по итогам численного моделирования, почти не зависимы от расхода газожидкостной смеси, а наибольшая скорость относительного движения дисперсной фазы

достигает всего 20% от наибольшой скорости у непрерывной фазы. Высокое значение скорости у относительного движения фаз приводит к более интенсивному обновлению на межфазной поверхности и, следовательно, интенсификации процессов межфазного переноса. Но увеличение газосодержания превышающем 2 - 3% приводит к снижению значения скорости относительного движения фаз.

Во время движении разных смесей с отличной плотностью компонентов в ПФТ случается их упорядоченное и циклично относительное движение в результате влияния градиента давления на дисперсную фазу в сплошной фазе. Как итог, диссипация энергии случается в прямой близости к межфазным границам , а не по всему объему реакционной смеси, как например, когда вследствии турбулентности потока получается достичь высокой интенсивности в межфазных переносных процессах. Из этого следует, что энергия самого потока исполняет работу для обновления межфазной поверхности с наибольшей эффективностью, за счёт интенсификации процесса межфазного переноса.

Благодаря обтекаемости выбранной формы в ПАТП наблюдается отсутствие застойных зон и циркуляционны течений, также итогои выбора формы является тот факт , что режим работы аппарата близок к режиму идеального вытеснительния. Высокоэффективное преобразование энергии, вводимой в ПАТП, подтверждается различными коэффициентами массообмена в представленных системах жидкость-газ [12-17]., которые на отмечены порядок выше, чем аналоги в традиционных аппаратах при той же скорости диссипации энергии

Вывод. Способы увеличения эффективности массообменного процесса в системах газ-жидкость. Массообмен - необратимый перенос массы одного из компонентов смеси в пределах одной или нескольких фаз. Массобмен состоит из массоотдачи и массопередачи. Суть массообмена, проходящего в газожидкостной системе , заключена в переносе определеного количества этого вещества из одной фазы в другую через контактную поверхность фаз SF из-за разницы концентраций компонента во разных взаимодействующих фазах C. При том количество вещества, передаваемое в единицу времени, определяется скоростью массопередачи.

В системе газ -биомасса-жидкость перемешивание призвано обеспечить тонкое дробление твердых частиц или жидкостей , а также равномерное распределение в этой жидкости газовых пузырьков, твердых взвешенных компонентов, и разнообразной биомассы [1, с. 35].

Если рассмотреть и вывести математическую модель для проточного реактора с рубашкой и мешалкой (CSTR) , то параметры у математической модели реактора будут следующими:

F i – расход , интенсивность подачи;

C Ai – концентрация подачи;

T i – температура подачи.

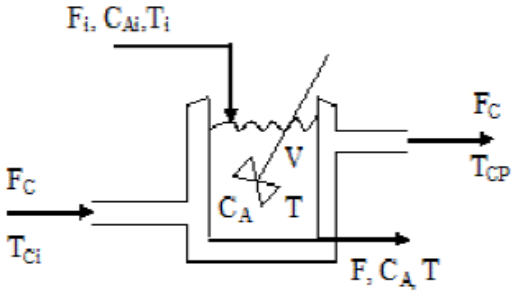


Рис. 10 – Схема проточного реактора с мешалкой

Представим, что подача получила F i , C Ai , T i . Индекс i значит input (введение) начальное значение, A – начальная концентрация.

Пар, который выпускаеют в конце, – это конечный пар, который отмечается следующими параметрами: F, C A , T. До того, как будет выведена математическая модель, нужно узнать единицы измерения для различных потоков, таких как F i , F, FC , эти указанные единицы – единицы объемной интенсивности подачи. C A , C Ai – молярные концентрации, моль/объем [2, с. 45].

Допустим, что:

1. Идеальное смешение (T и C A исходного одинакова) с T и C A субстрат, размещенный внутри реактора. В данном случае и деальная смесь указывает, что в любой точке реактора T и C A будут одинаковыми, также как T и C A при выпуске будут идентичны с реактором.

2. ρ – плотность жидкости; C A – теплоемкость. ρ, C A – константы.

3. A→B Это экзотермическая реакция первой степени. Чтобы убрать выделенное экзотермическое тепло в самом реакторе, использовали смазочно-охлаждающая смесь.

4. Реактор представлен идеально изолированым, что подразумевает, отсутствие потерь тепла (не уходит в окружающую среду).

5. Смазочно-охлаждающая смесь идеально размешана в реакторе.

6. Баланс энергии рубашки не рассматривается.. На их основе мы выводятся формулы. В начале рассмотривается закон сохранения массы (massbalance) [3, с. 56]:

$$\begin{pmatrix}\text{скорость}\\ \text{накопления}\\ \text{массы}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{скорость}\\ \text{входной}\\ \text{массы}\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\text{скорость}\\ \text{исходной}\\ \text{массы}\end{pmatrix}$$

V – объем жидкости; ρ – плотность; Vp – масса.

Дифференцируя массу и плотность получается ниже представленное дифференциальное уравнение

$$\frac{d}{dt}(V\rho) = F_i\rho - F\rho$$

$$\rho\frac{dV}{dt} = F_i\rho - F\rho \rightarrow \frac{dV}{dt} = F_i - F \qquad (1) - \text{закон сохранения массы.}$$

Закон сохранения массы компонента (составной части, компонент А)

$$\begin{pmatrix}\text{скорость}\\ \text{накопления}\\ \text{компонента А}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{скорость}\\ \text{вхождения}\\ \text{компонента А}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\text{скорость}\\ \text{генерации}\\ \text{(образование пара)}\\ \text{компонента А}\end{pmatrix} - \begin{pmatrix}\text{исходная}\\ \text{скорость}\\ \text{компонета А}\end{pmatrix}$$

Была представлена разработка довольно простой CSTR системы, мы отметили различные переменные, многие из которых были учтены в этом CSTR примере. Общий алгоритм для вычисления скорости концентрации (2) и температуры (3) относительно времени приведен в следующей блок-схеме (рисунок 2):

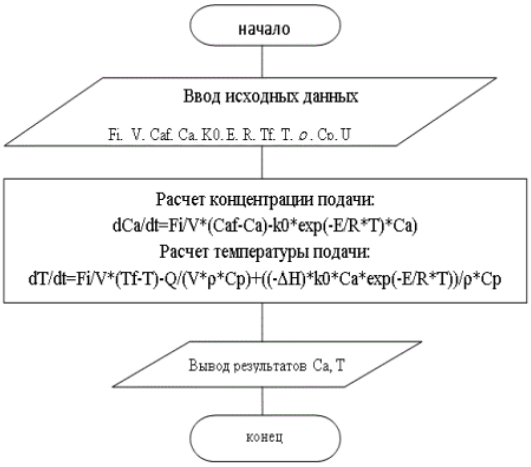


Рис.11 - Блок-схема

Литература:

1. Аксельруд, Г.А. Массоперенос в системе твердое тело-жидкость / Г.А. Аксельруд - Львов: Изд-во Львовск. ун-та, 1970. - 188 с.

2. Берлин, Ал.Ал. О новом типе реакторов для быстрых процессов / Ал.Ал. Берлин, К. С. Минскер, В. П. Захаров // Докл. АН, - 1999. - Т. 365. - № 3. - С. 360–363.

3. Тахавутдинов, Р.Г. Турбулентное перемешивание в малогабаритных устройствах химической технологии / Р.Г. Тахавутдинов [и др.]// Хим. выпускной вечер. - 2000. - № 5. - С. 41-49.

4. Патент 2064319 РФ, МКИ B01D11/02, 12/00. Устройство для жидкостной обработки капиллярно-пористых частиц / Абиев Р.Ш. // БИ, 1996. № 21.

5. Долинский, А.А. Принципы разработки новых энергоресурсосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного

ввода энергии / А.А. Долинский, Г.К. Иваницкий // Пром. теплотехника. - 1997. - Т. 19. - № 4-5. - С.13-25.

6. Долинский, А.А. Принципы оптимизации массообменных технологий на основе метода дискретно-импульсного ввода энергии / А.А. Долинский, А.И. Накорчевский // Пром. теплотехника. - 1997. - Т. 19. - № 6. - С.5-9.

7. Абиев, Р.Ш. Течение однородной несжимаемой жидкости в трубе с периодически изменяющимся сечением / Р.Ш. Абиев// Журнал. хим. и нефть и газ. машиностроение - 2003. - № 1. - С. 6-10.

8. Абиев, Р.Ш. Исследование течения газожидкостной системы в трубе с периодически изменяющимся сечением / Р.Ш. Абиев // Химическая промышленность. - 2003. - Т. 80. № 12. - С. 600-607.

9. Данилов, Ю.М. Математическое моделирование течений в малогабаритных трубчатых турбулентных аппаратах / Ю.М. Данилов // Химическая промышленность. - 2004. - Т. 81. - № 9. - С. 451-457.

10. Захаров, В.П. Закономерности течения газожидкостной реакционной смеси в трубчатых аппаратах / В.П. Захаров, Ф.Б. Шевляков // Химическая промышленность. 2005. — Т. 82. — № 3. — С. 133-138.

11. Минскер, К.С. Трубчатые турбулентные реакторы вытеснения - новый тип промышленных аппаратов / К.С. Минскер, В.П. Захаров, А.А. Берлин // Теоретические основы химической технологии. - 2001. - Т. 35. - № 2. - С. 172-177.

12. Галушко, А.С. Массоперенос на границе газ-жидкость в аппарате с периодически изменяющимся поперечным сечением / А.С. Галушко, Р.Ш. Абиев, Т.А. Курилова // Матем. методы в технике и технологии: автореф. д ок. международный конф. - Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2007. - С. 92-93.

13. Софронов, М.А. Влияние температуры на массоперенос / М.А. Софронов, А.С. Поникаров, С.И. Поникаров // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология конф. – Казань : КНИТУ , 2018.-С.129-130

14. Поникаров, А.С. Кинетика многокомпонентной массоотдачи в системах газ(пар)-жидкость / А.С. Поникаров // Процессы и аппараты химических технологий : автореф. – Казань: КНИТУ , 2017 .-С.22

15. Теляков, Э.Ш. Kinetics of nonequimolar mass transfer in multicomponent gas (vapour) – liquid systems / Э.Ш. Теляков, А.С. Поникаров, Л.Э. Осипова // Theoretical foundations of chemical engineering – Москва , 2018 – С.11-23

16. Некоторые аспекты обеспечения промышленной безопасности опасных объектов: коллективная монография / В. А. Алексеев, С. И. Валеев, П. В. Вилохина [и др.] ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский

технологический университет». Под общей редакцией С.И. Поникарова. – Казань: Издательство "Фэн" Академии наук Республики Татарстан, 2019. – 160 с. – ISBN 978-5-9690-0610-2. – EDN DCXZNE.

17. Алексеев, В.А. Некоторые аппараты обеспечения промышленной безопасности опасных объектов. Имитационное моделирование / В.А. Алексеев, А.С. Поникаров, С.И. Поникаров , Э.Ш. Теляков [и др.]// Казань: КНИТУ, 2020 – С.128.

18. Зотов, М. А. Автоматическая система локализации аварийных выбросов токсических веществ на открытых площадках / М. А. Зотов, А. А. Салин, А. С. Поникаров // Казань, 30 ноября 2018 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "КОНВЕРТ", 2018. – С. 24-26. – EDN YRPKCT.

УДК 664.1.033

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ОШПАРИВАТЕЛЯ СВЕКЛОВИЧНОЙ СТРУЖКИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ САХАРОЗЫ

Журавлев М.В., Степаненко И.Ю., Суходоева Я.А., Чурсина Е.С.
Московский государственный университет пищевых производств,
E-mail: zhuravlevmv@mgupp.ru

Одной из приоритетных задач государства является совершенствование продовольственной политики, а также улучшение качества жизни и здоровья населения. Для реализации данной задачи важным критерием является обеспечение населения безопасными и качественными продуктами питания, которые составляют значительную долю повседневного рациона питания человека.

В последние годы отмечается устойчивая тенденция повышения потребности населения углеводсодержащих продуктах питания, важнейшим из которых является белый сахара. Сахарная промышленность, перерабатывающая значительные объемы сахарной свеклы, является масштабным кластером пищевой промышленности отечественного АПК. Это обусловлено высоким потребительским спросом на сахар, как у рядовых потребителей, так и у различных отраслей: кондитерская, биохимическая, фармацевтическая и другие, где сахар играет огромную роль и является незаменимым компонентом производства. В России данный продукт производят из сахарной свеклы с учетом требований стандарта ГОСТ 33222-2015 «Сахар белый. Технические условия»[1].

По своей сложности, энергоемкости и синергизму связей между технологическими и теплофизическими процессами, производство белого сахара занимает одну из лидирующих позиций среди прочих отраслей индустрии продуктов питания, а по фундаментальной значимости приближается к таким отраслям, как нефтехимическая, металлургическая, и целлюлозно-бумажная. Для производств подобного уровня индикационным критерием оценки эффективности их функционирования являются значения показателей ресурсосбережения и энергоэффективности, к которым следует отнести расход природного газа, технологических компонентов и вспомогательных материалов (камень известняковый, сатурационный газ), необходимых для осуществления технологических процессов [5].

За последние 10 лет эффективная поддержка государственных программ, позволила существенно модернизировать аграрную и материально-техническую базу свеклосахарного подкомплекса - в сезон переработки свеклы 2021 года была достигнута рекордная урожайность 389 тонн с 1 гектара, благодаря чему увеличилась выработка свекловичного сахара на 15 % по сравнению с предыдущими

сезонами переработки. Однако не преодолены проблемы рационального использования сырья и максимального извлечения целевого компонента – сахарозы.

Одним из наиболее энергоемких участков свеклосахарного производства является станция диффузионного извлечения сахарозы из свекловичной стружки. На данном участке производства сосредоточено значительное количество тепловой энергии, затрачиваемой на обогрев диффузионных аппаратов с целью поддержания их эффективной работы и обеспечения необходимых условий для экстрагирования сахарозы. Большинство отечественных предприятий оснащено диффузионными аппаратами наклонного типа. Проведение диффузионного процесса в аппаратах такой конструкции сопровождается рядом проблем: неравномерный обогрев сокостружечной смеси по длине аппарата, высокий расход греющего пара для достижения необходимой температуры процесса, высокие потери сахарозы в свекловичном жоме [3].

В сложившейся ситуации, актуальной задачей является совершенствование процесса диффузионного извлечения сахарозы из свеклы путем разработки и внедрения энергоэффективной ресурсосберегающей технологии термохимической обработки свекловичной стружки перед ее поступлением в диффузионный аппарат, и конструкции ошпаривателя прогрессивной конструкции [2].

Для осуществления термохимической обработки свекловичной стружки разработан вертикальный ошпариватель свекловичной стружки, в конструкцию которого заложены следующие эффективные технические решения:

- использование современного загрузочного устройства свекловичной стружки, обеспечивающего непрерывность процесса ошпаривания;

- тангенциальное расположение распылительных форсунок для пара, подведенных с внешней стороны, а также форсунок оси трубовала, позволяющее предотвратить их забивание стружкой и образование застойных зон внутри секций, что исключает возникновение локальных перегревов и устраняет неравномерность обогрева свекловичной стружки;

- модернизация перемешивающего устройства введением дополнительного витка и специального дугообразного ножа, благодаря чему обеспечивается более эффективное перемешивание и перемещение стружки по секциям ошпаривателя и удаление оставшегося количества прилипшей свекловичной стружки с поверхности горизонтальных сит, что исключает образование застойных зон;

На рисунке 1 изображен общий вид винтового ножа-мешалки.

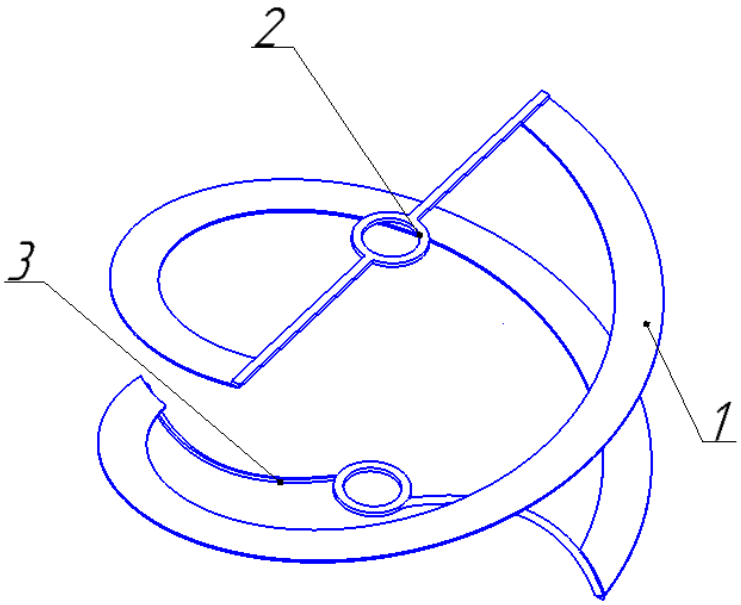


Рисунок 1 – Общий вид перемешивающего устройства: 1–перемешивающий виток; 2 – отверстие крепления; 3 – дугообразный нож

На рисунке 2 представлен общий вид ошпаривателя свекловичной стружки.

Ошпариватель работает следующим образом. Исходная свекловичная стружка после свеклорезок подается в загрузочный бункер 4 ошпаривателя, где захватывается лопастями роторного дозатора 5 и направляется в секцию 10, в которой обрабатывается греющим паром температурой 102 °С, поступающим из паропроводов 6 и форсунок 7, а затем раствором реагента из расположенных на трубовале форсунок 20, который подается во внутренний вал 17. Температура раствора составляет 75 °С. В межтрубное пространство между внешним и внутренним валом подается греющий пар, необходимый для подогрева раствора реагента.

Далее нагретая стружка через проемы 14 в горизонтальном сите 12 подается в секцию 11, где она перемешивается и обрабатывается паром из форсунок, расположенных на оси трубовала, и раствором реагента из форсунок 20, в которые он поступает из трубопроводов 8. Такой подвод пара и раствора реагента обеспечивает равномерный обогрев стружки по длине секции до температуры 68-72°С.

Далее ошпаренная свекловичная стружка из секции 11 через проемы в горизонтальном сите 14 ссыпается в днище 3 корпуса и выгружается турникетом 21.

Использование ошпаривателя стружки данной конструкции позволяет:

- повысить эффективность термохимической обработки свекловичной стружки за счет более равномерного ее обогрева по всей высоте аппарата;

- исключить появление локальных перегревов стружки, за счет тангенциального расположения форсунок;

- обеспечить непрерывность процесса термохимической обработки стружки;

- интенсифицировать процесс диффузионного извлечения сахарозы.

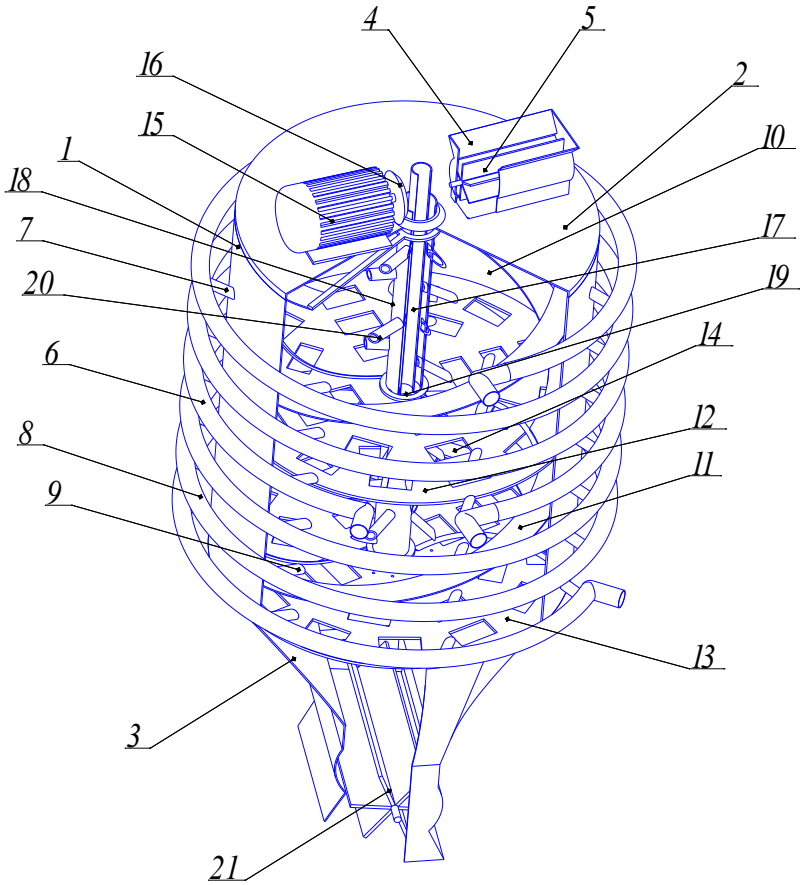


Рисунок 2 – Ошпариватель свекловичной стружки: 1 – корпус ошпаривателя; 2 – верхняя крышка; 3 – конусообразное днище; 4 – приемный бункер; 5 – роторный дозатор; 6 – паропровод; 7, 9 – форсунки внешнего подвода; 8 – трубопроводы подвода раствора сульфата аммония; 10 – верхняя секция ошпаривателя; 11 – нижняя секция ошпаривателя; 12,13 – горизонтальные сита; 14 – перегрузочные проемы; 15 – привод; 16 – коническая передача; 17 – внутренний вал ротора; 18 – внешний вал ротора; 19 – разделительная перегородка; 20 – форсунки внутреннего орошения; 21 – турникет

Литература:

1. Журавлёв, М.В. Разработка ресурсосберегающей технологии извлечения сахарозы из свёклы с использованием термохимической обработки стружки : дис. канд. техн. наук : 05.18.12 : защищена 17.04.17 : утв. 29.04.17 / Журавлёв Михаил Валентинович. – М., 2017. – 278 с.

2. Кульнева, Н.Г. Моделирование конструкции ошпаривателя для термохимической обработки свекловичной стружки перед экстрагированием сахарозы //

Н.Г. Кульнева, М.В. Журавлёв // Вестник ВГУИТ. – 2020. – № 2. – С. 148-152.

3. Нуждин, Р.В. Оценка основных трендов промышленной безопасности сахарного производства: результаты индикации // Р.В. Нуждин, А.И. Хорев // Сахар. – 2021. – № 12. – С. 44-50.

4. Пушанко, Н. Н. Критерии эффективности диффузионного процесса // Н. Н. Пушанко, Л. А. Верхола // Сахар. – 2012. – № 5. – С. 25-28.

5. Штангеев, К.О. Теплотехнические и технологические аспекты совершенствования продуктового отделения свеклосахарного завода // К.О. Штангеев, К.Д. Скорик, Н. И. Штангеева // Сахар. – 2021. – № 12. – С. 20-25.

УДК 66.074

МОДЕЛЬ КАПЛЕОТБОЙНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ В ДВУХФАЗНОМ СЕПАРАТОРЕ

Загидуллин К.И., Старовойтова Е.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: aelitazagidullina@mail.ru

Во многих освоенных нефтегазовых месторождениях присутствует значительная доля пластовой воды и других примесей. Так как пик производительности большинства этих скважин уже пройден, происходит ухудшение качества природного газа. Поэтому большая роль в технологии подготовки природного газа перед последующей его переработкой или транспортировкой в магистральный газопровод отводится сепараторам, которые предназначены для очистки природного газа от полидисперсных частиц воды, солей и механических примесей, поступающих из скважин [1]. Так как требования к качеству со стороны потребителя остаются прежними, вопрос повышения эффективности сепарации является актуальным.

Двухфазный газовый сепаратор предназначен для разделения газожидкостной смеси на две фазы (рис.1) [2]. Данное оборудование может различаться по расположению: вертикальные и горизонтальные; по характеру действующих сил: гравитационные, в них разделение происходит за счёт разности плотностей жидкости, газа и других примесей, и центробежные, в них разделение происходит за счет центробежных и инерционных сил; по форме: цилиндрические и сферические. Но в основном газовый сепаратор представляет собой стальной, вертикальный, цилиндрический сосуд, объём которого подбирается в зависимости от количества проходимого через него газожидкостного потока.

Существуют различные виды конструкций газовых сепараторов [3], но все они, как правило, состоят из следующих зон: зона предварительной сепарации, зона каплеулавливания и фильтрации. Зона предварительной сепарации имеет важную роль, так как в ней происходит отделение более крупных капель влаги и механической примеси из газожидкостного потока, а также в ней идёт равномерное распределение потока по всему сечению сепаратора. Внутри сепаратора на входе могут монтироваться следующие конструктивные устройства: тангенциальный коагулятор, отражательные (отбойные) устройства, циклон и другие конструкции, позволяющие осуществить раздельный ввод газа и жидкости.

Необходимо отметить, что показатель эффективности газового сепаратора зависит от интенсификации процесса газоотделения и уноса капельной жидкости

с газом. На данные критерии влияют следующие факторы: время пребывания потока смеси в сепараторе, градиент давления и температурный режим, а также интенсивность перемешивания. Следовательно, задача сводится к уменьшению уноса капельной жидкости из сепаратора за счет изменения его конструктивных параметров. По требованиям величина капельного уноса обычно составляет от 1 г/тыс. м3 до 5 г/тыс. м3 газа.

Плотность капель, улавливаемых в сепараторе, изменяется в широких пределах, поэтому каждое из этих устройств по своему влияет на эффективность сепарации. В производстве зарекомендовали себя коагуляторы отбойного типа в виде собранного пакета сложной формы пластин, так как в них интенсивность перемешивания и центробежные силы увеличивают поверхность для отбора капель. Но если пластины коагулятора расположены слишком близко, то увеличивается и гидравлическое сопротивление в аппарате. Многие входные устройства не могут обеспечивать равномерного распределения газожидкостного потока по всему сечению аппарата, что приводит к снижению эффективности очистки газа. В связи с этим, нами была предложена модель каплеотбойного распределителя. На рис. 1 представлен эскиз сепаратора с новым каплеотбойным распределителем 1.

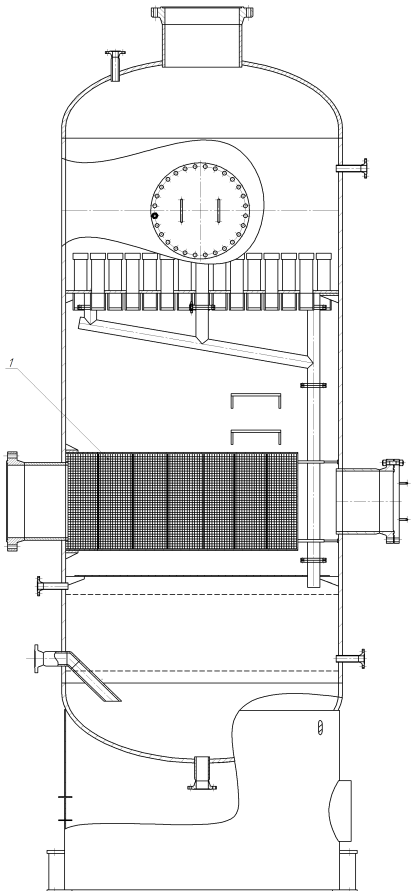


Рис. 1. Эскиз вертикального газового сепаратора
с каплеотбойным распределителем

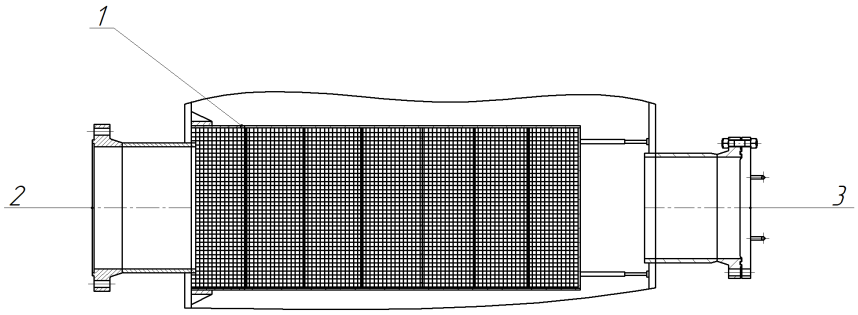


Рис. 2. Эскиз каплеотбойного распределителя: 1-каплеотбойный распределитель; 2-входной штуцер; 3-люк-лаз

Принцип работы двухфазного сепаратора с новым каплеотбойным распределителем следующий: сырой газ, содержащий жидкие и твердые примеси поступает в сепаратор на входной каплеотбойный распределитель (см. рис. 2), установленный на входном штуцере с помощью опорных и распорных устройств, где в результате снижения линейной скорости потока газа крупные капли порядка 50-60 мкм и частицы механической примеси осаждаются в кубовой части. После газ направляется на тарелку с центробежными элементами, где за счет центробежного эффекта часть жидкости и твердые частицы отбрасываются к периферии трубок, а после улавливаются в карманах. Далее газ поступает на тарелку с фильтр-коалесцирующими патронами, где фильтровальный элемент имеет большое число узких зон, представленных порами и отверстиями. Проходящие через него частицы сталкиваются, в результате чего происходит их слияние и увеличение размеров. Силы гравитации способствуют осаждению из потока предельно укрупненных частиц. При этом фильтр очищает поток среды, удерживая более мелкие частицы требуемых размеров, далее они отводятся через внешний дренажный слой, поток стекает на тарелку коалесцеров. Очищенный газ из сепаратора направляется на следующий этап переработки. Жидкость с тарелок и из кубовой части сепаратора выводится через клапаны-регуляторы уровней.

Применение данной модели каплеотбойного распределителя позволит создать благоприятные условия для работы последующих ступеней сепарации из-за равномерного распределения фаз по поперечному сечению аппарата, что приведёт к повышению разделяющей способности и производительности сепаратора.

Литература:

1. Мановян А. К. Технология первичной переработки нефти и природного газа: учеб. Пособие для студентов вузов 2-е изд., испр. - М.:Химия, 2001. - 567 с.

2. Нефтегазовое дело. Полный курс: учеб. пособие / В. В. Тетельмин, В. А. Язев. – Долгопрудный :Интеллект, 2009. – 799с.

3. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: учеб. пособие / А. И. Скобло, Ю. К. Молоканов, А. И. Владимиров, В. А. Щелкунов: РГУ нефти и газа им И. М. Губкина.

УДК 622.32

СЕПАРИРОВАНИЕ ПИРОЛИЗНЫХ ГАЗОВ МЕТОДОМ ДИСТИЛЯЦИИ

Загиров А.Н., Сафин Р.Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: aidarzagirov98@mail.ru

Способ, при котором можно получить наибольшее количество пиролизной жидкости, из которой получают биотопливо, применяют *низкотемпературный быстрый пиролиз*. Данный вид пиролиза протекает при температуре 500°С с его применением большее всего получают пиролизный газ, который при дальнейшей сепарации разделяют на пиролизную жидкость и неконденсированные газы. Процессы конденсации пиролизных газовых смесей, связанные с отводом больших количеств тепла хладагентами, осуществляются в теплообменных аппаратах — *конденсаторах*. Конденсаторы паров возможно разделить по принципу теплообмена на конденсаторы смешения и поверхностные конденсаторы. В конденсаторах смешения пиролизный газ непосредственно соприкасается с охлаждающей жидкостью, а в поверхностных конденсаторах пары рабочего тела отделены стенкой от охлаждающего теплоносителя.

При применении поверхностных конденсаторов для сепарации пиролизных газов во время конденсации возникает проблема, связанная с загрязнением внутренней полости аппарата, из-за чего увеличиваются издержки производства. Для устранения этого недостатка рекомендуется использовать конденсаторы смешения.

После получения пиролизной жидкости её необходимо разделить на отдельные компоненты, которые являются полезными в различных отраслях промышленности, для это применяют метод простой дистилляции.

Был проведен эксперимент по сепарированию пиролизной жидкости на отдельные компоненты на лабораторной установке. Лабораторная установка по сепарации газов состоит (рис. 10) из нагревательной плиты 1, емкости 2, канала отвода газов 3, термометра 4, конденсатора 5 и мерной колбы 6.

Проведение эксперимента начинается с того, что в емкость 2 заливают пиролизную жидкость, полученную после пиролиза. Закрывают установку фланцем, к которому присоединен термометр 4 для определения температуры и приварен канал отвода газов 3. Емкость устанавливают на нагревательную плиту 1. К каналу отвода газов 3 присоединяют водяной конденсатор 5, в котором происходит частичная конденсация пиролизных газов посредством хладагента (воды). Сконденсировавшаяся жидкость отводится в мерную колбу 6, где скапливается. Неконденсирующиеся газы (воздух) отводятся в мерную колбу 6, откуда они направляются в атмосферу.

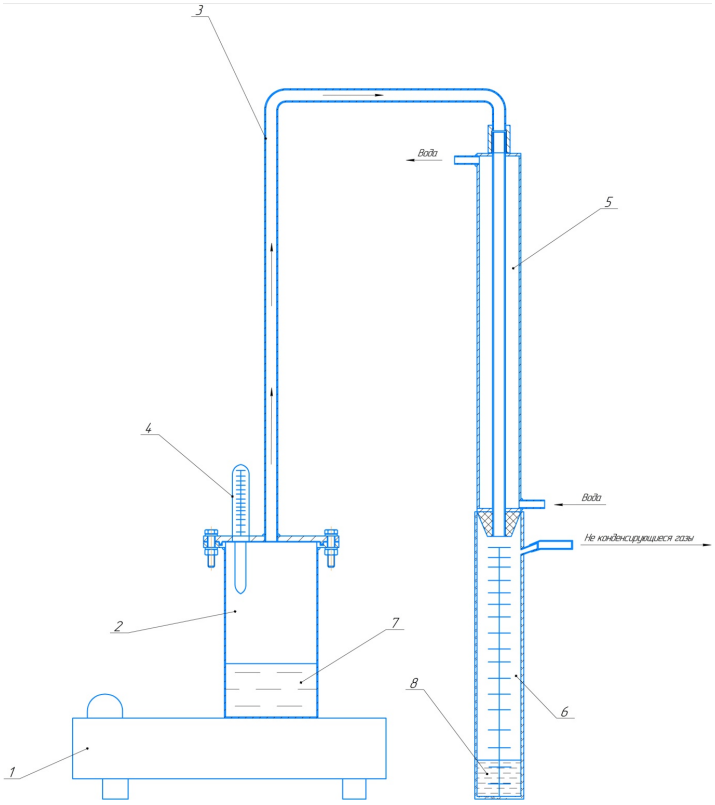


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по сепарации: 1 – нагревательная плита; 2 – емкость; 3 – канал отвода газов; 4 – термометр; 5 – конденсатор; 6 – мерная колба

Во время проведения эксперимента фиксируем температуру кипения жидкости и объем дистилята. Благодаря этому можем разделить пиролизную жидкость на фракции. Разделение пиролизной жидкости на фракции происходит следующим образом: достигнув определенной температуры кипения пиролизной жидкости, мы меняем колбу 6 с полученным дистиллятом на новую. Эксперимент заканчивается при перегонке 90 % пиролизной жидкости. При проведении эксперимента фиксируются следующие значения: время, температура и объём жидкости в мерной колбе. Значения, полученные во время эксперимента, вносятся в таблицу 1.

Таблица 1

t, мин (время)	T, °C (температура)	V (Объем жидкости в колбе)	m, гр. (масса)	Примечание
0	90	0	0	
19	99,6	5	0	
25	100	5	5,65	Сменили колбу на новую
29	100	0	0	
30	100	10	0	

42	100	30	0	
53	101	40	41,90	Сменили колбу на новую
55	101	0	0	
61	120	5	7,21	

На основе этих значений строится гистограмма зависимости объема жидкости от температуры кипения (рис. 1).

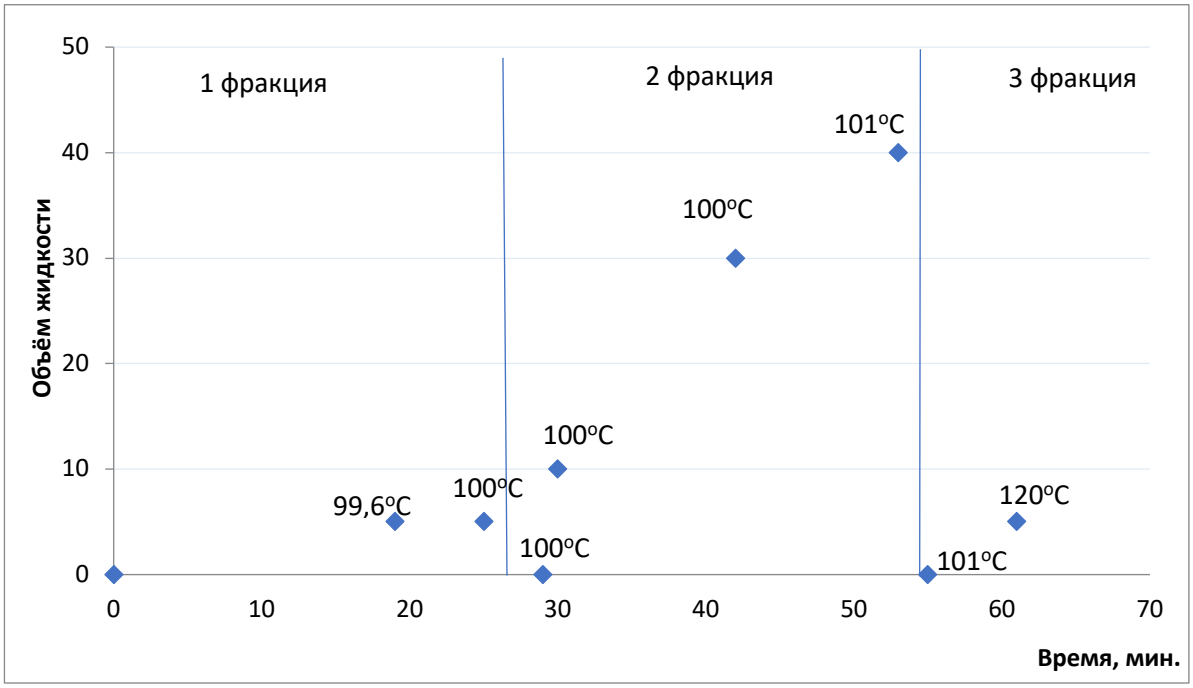


Рис. 11. Точечная диаграмма зависимости объёма жидкости от времени

На основе данных, изображенных на рис. 11, можно сделать вывод, что в ходе эксперимента были получены три разные фракции конденсата. При этом в большем количестве получена жидкость второй фракции при температуре кипения 100–101 °С.

Литература:

1. Сафин Р.Г, Родионов А. С., Загиров А. Н, Хайруллин И. Ф. Методическое указание Термохимическая переработка древесных отходов в активированный уголь и пиролизную жидкость. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2022. –35 с.

2. Загиров, А. Н. Сепарация пиролизных газов / А. Н. Загиров // Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике: материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Воронеж, 2021: Изд-во Воронежского гос. лесотехн. ун-та, 2021. – С. 78–81.

УДК 674.8

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС БЫСТРОГО ПИРОЛИЗА С ПОЛУЧЕНИЕМ ПИРОЛИЗНОГО ТОПЛИВА

Загиров А.Н., Сафин Р. Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: aidarzagirov98@mail.ru

Технологическая схема процесса быстрого пиролиза по получению жидкого биотопливо включает в себя технологически связанные участки: участок подготовки сырья, пиролизный реактор, устройства газоочистки, блока конденсации и энергетического блока (рис. 1). Главное отличие существующих технологическим схем заключается именно в реакторе пиролиза от которого зависит метод термохимической конверсии исходной древесной биомассы в пиролизные газы и уголь. От типа и конструкции реактора зависит узел подачи сырья, газоочистные устройства, блок конденсации и энергетический блок с подачей тепла в реактор.

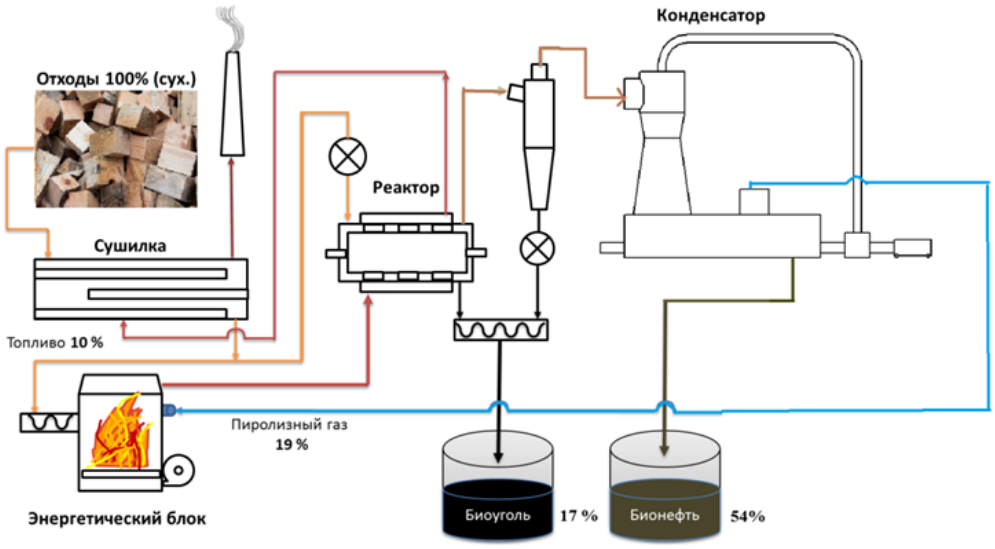


Рисунок 1. Схема установки пиролиза

В начале сырьё поступает в барабанную сушилку для измельченной древесины. Итак, щепа и опил загружаются в камеру и начинают под наклоном перемещаться по стенкам вниз по направлению к разгрузочному отсеку. Внутренние лопасти и рельефы барабана разбивают слежавшиеся комки сырья. Из топочной камеры или из теплогенератора внутрь цилиндра нагнетается нагретая до 600-700 °С газо-воздушная смесь. Она обдает материал и нагревает его. Влага непрерывно испаряется. Просушенный материал выгружается через люк. После прохода через камеру газы охлаждаются до температуры 80-120° С и далее направляются в циклон. Там из них выделяется древесная пыль и загрязняющие воздух вещества.

Устройство барабанных сушилок предполагает внешнюю загрузку сыпучих материалов. Для этого обычно используются шнековые или скребковые транспортеры.

Далее высушенный материал поступает в реактор, где осуществляется процесс пиролиза.

Абляционный реактор работает следующим образом (рис. 2): высушенное и измельченное (до диаметра 5-10 мм) древесное сырьё подаётся в загрузочный бункер 9. Откуда подаётся через полый цилиндр 4 в чашку 7 турбины на вращающейся лопатки 8, которая обеспечивает псевдокипящее состояние измельченному древесному сырью, частицы которого образуют вихревое облако. Под воздействием центробежной силы оно непрерывно расширяется и приобретает форму, близкую к перевернутому конусу. Далее вихревое облако частиц древесного сырья подхватывается лопатками 5 ротора. При помощи центробежной силы древесные частицы отбрасываются к нагретой стенке пиролизатора 2. И в момент удара частицы о стенку происходит взрывоподобная абляция. Унос массы твердого растительного сырья (абляция) при температуре не меньше 720К происходит вследствие разрушения его биологической структуры до молекулярного состояния, разрыва химических связей полярных соединений и превращения их в низкомолекулярные вещества [1].

Основными продуктами, полученными во время абляционного пиролиза древесных частиц, являются пиролизный газ который состоит из таких веществ: водород, кислород, азот, монооксид и диоксид углерода, ацетальдегид, циклогексан, этан; пары более 40 веществ.

После пиролиза пиролизные газы проходят через циклон для очистки газов от мелких дисперсий. После циклона пиролизные газы поступают в конденсатор-сепаратор где происходит конденсации газов в жидкость (см рис. 2).

Через патрубок 1 пиролизный газ поступает в бак 9 где, газ конденсируется в жижку при помощи охлаждающей жидкости поступающей из эжектора 2, газ стекает в приемную ванну 6. В приемной ванне располагается змеевик 10 по которому циркулирует вода для охлаждения жижки. Вода попадает в змеевик через патрубок 4 и отводится через патрубок 5. Через патрубок 11 жижка подается в эжектор при помощи насоса 8. Избыток жижки переливается через патрубок 7 в резервуар, в котором собирается жижка. Патрубок 3 служит для отвода несконденсированных газов в энергетический блок для дальнейшей работы [2].

В энергетическом блоке происходит сжигание несконденсированных пиролизных газов, которые превращаются в топочный газ. Топочный газ покидает энергетический блок с начало направляется пиролизный реактор отдавая внутри него тепло на процесс пиролиза, а затем в сушильный аппарат где тоже происходит процесс теплоотдачи но уже на процесс сушки.

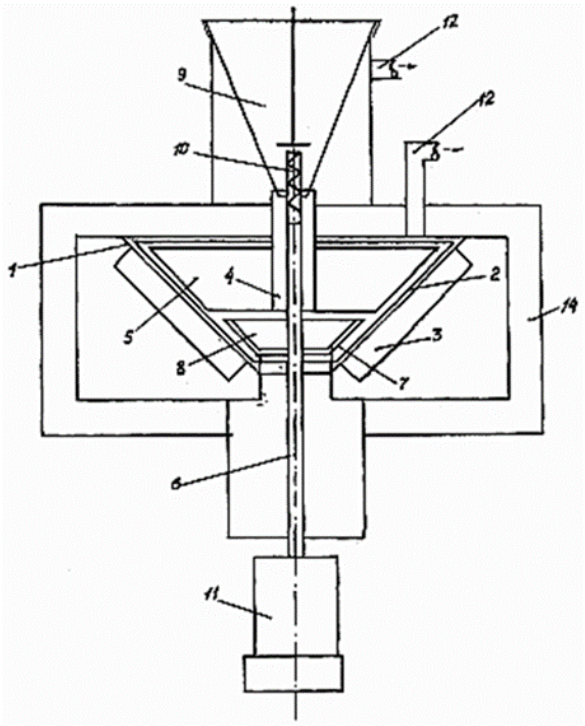


Рисунок 2. Схема реактора для абиляционного пиролиза

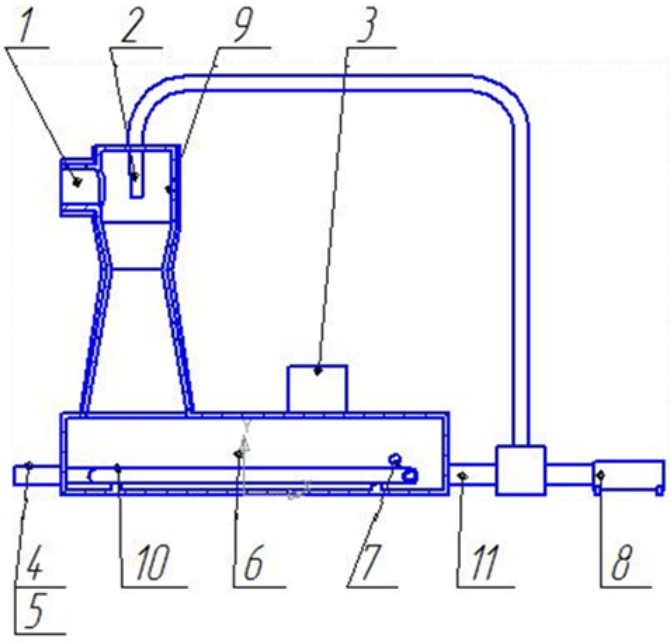


Рисунок 3. Схема конденсатор-сепаратор для разделения жидких и газообразных продуктов пиролиза: 1-патрубокдляподачипиролизныхгазов; 2 - эжектор; 3 – патрубок для отвода пиролизных газов; 4, 5 – патрубки для подачи и отвода охлаждающей жидкости; 6 – приемная ванна для сбора жидкости; 7- патрубок для отвода жидкости; 8 - насос; 9 – бак приема пиролизных газов; 10 –змеевик; 11 –патрубок для подачи жидкости в эжектор

Образовавшаяся во время процесса пиролиза жидкость является многокомпонентным веществом содержашим множество полезных продуктов, применяемых в промышленности, из-за чего подлежит разделению на разные фракции. Основным методом, который применяется для разделения пиролизной жидкости на разные фракции является метод дистилляции.

Литетатура:

1. Пат. 2281313 Рос. Федерация, МПК C10B 53/02 (2006.01), B01J 19/18 (2006.01). Абляционный реактор / Стеблин А.Н., Лисицкий А.А., Зубанов В.В., Исакова О.А., Стеблин Н.А.; Федеральная служба по интелектуальной собственности, патентам и товарным знакам, заявл. 24.02.2005; опубл. 10.02.2006, Бюл. №22. -7

2. Загиров А.Н., Мифтахов Р.А. « Общество-наука-инновации» КОНДЕНСАТОР - СЕПАРАТОР ПИРОЛИЗНОГО ГАЗА. с. 26-27

УДК 622.27

ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО СГУСТИТЕЛЯ

Закиров И.Р., Ахметсафина Ф.Ф., Голубева И.Л.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: golubeva1967@yandex.ru

Сгуститель – аппарат для проведения процесса сгущения. Сгущение – процесс повышения концентрации твердого в пульпе, происходящий в результате осаждения в ней твердых частиц под действием массовых (гравитационных либо центробежных) сил. В сгустителе при оптимальном заполнении его материалом и установившемся режиме существует несколько зон. Вверху располагается зона осветленной жидкости, ниже – зона пульпы исходной плотности. Внизу находится зона уплотнения (консолидации). В этой зоне жидкость выделяется из пульпы в результате давления находящегося выше материала. В придонном слое пульпа дополнительно уплотняется гребками. Радиальные сгустители предназначены для сгущения и обесшламливания пульп, осветления оборотных вод и растворов и суспензий. Сгустители широко применяются на предприятиях металлургической, угольной, химической и других отраслях промышленности.

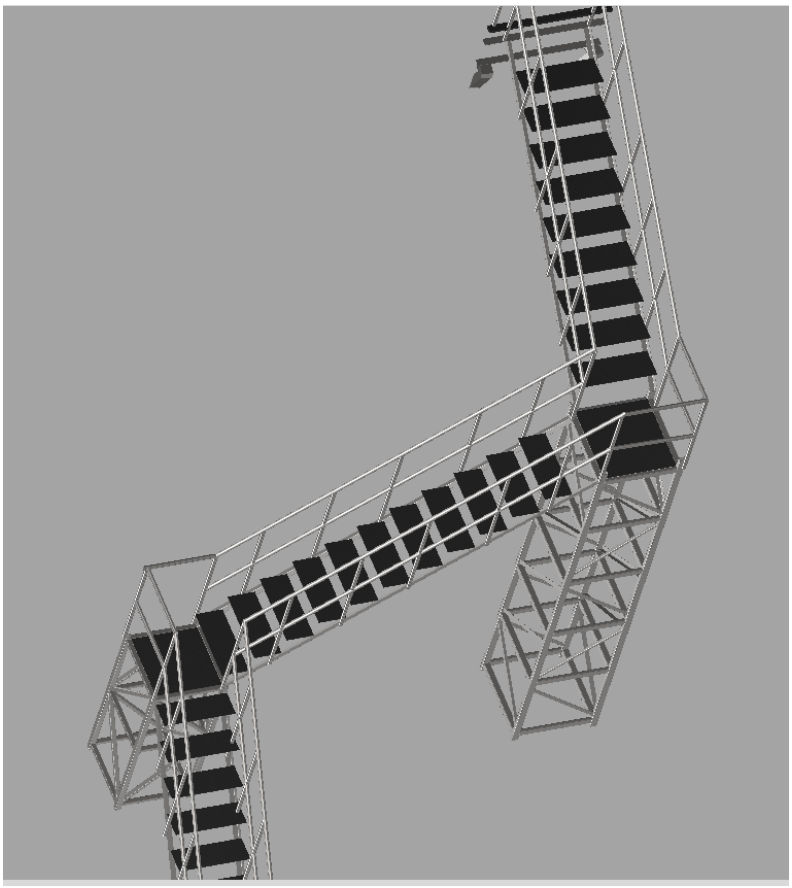


Рис. 1. Проектирование металлоконструкций

В рамках работы студенческого конструкторского бюро, существующего на кафедре ИКГАП, изучается проектирование аппаратов химической промышленности. Важно уже с 1 курса научить студентов механических специальностей основам проектной деятельности.

В ходе работы над проектом «Радиальный сгуститель» изучалось твердотельное 3D моделирование, моделирование деталей из листового материала, сборочные операции.

Особое внимание в этом проекте уделялось созданием рамных конструкций с использованием встроенного в САПР модуля. Многие элементы проектировались без использования чертежей, например, лестница (рис. 1).

В условиях цифровой экономики неотъемлемой частью разрабатываемого проекта является презентация проекта. САПР Autodesk Inventor обладает встроенным модулем для создания презентаций. Inventor Studio — это среда визуализации и анимации для деталей Autodesk Inventor. В этой среде имеется собственный набор команд и уникальных узлов браузера, предназначенных для визуализации и анимации [2]. Команды визуализации позволяют добавить освещение и точки обзора камеры, улучшающие качество восприятия и создающие ощущение масштаба или пространства при визуализации, а также тени, отражение (рис. 2).

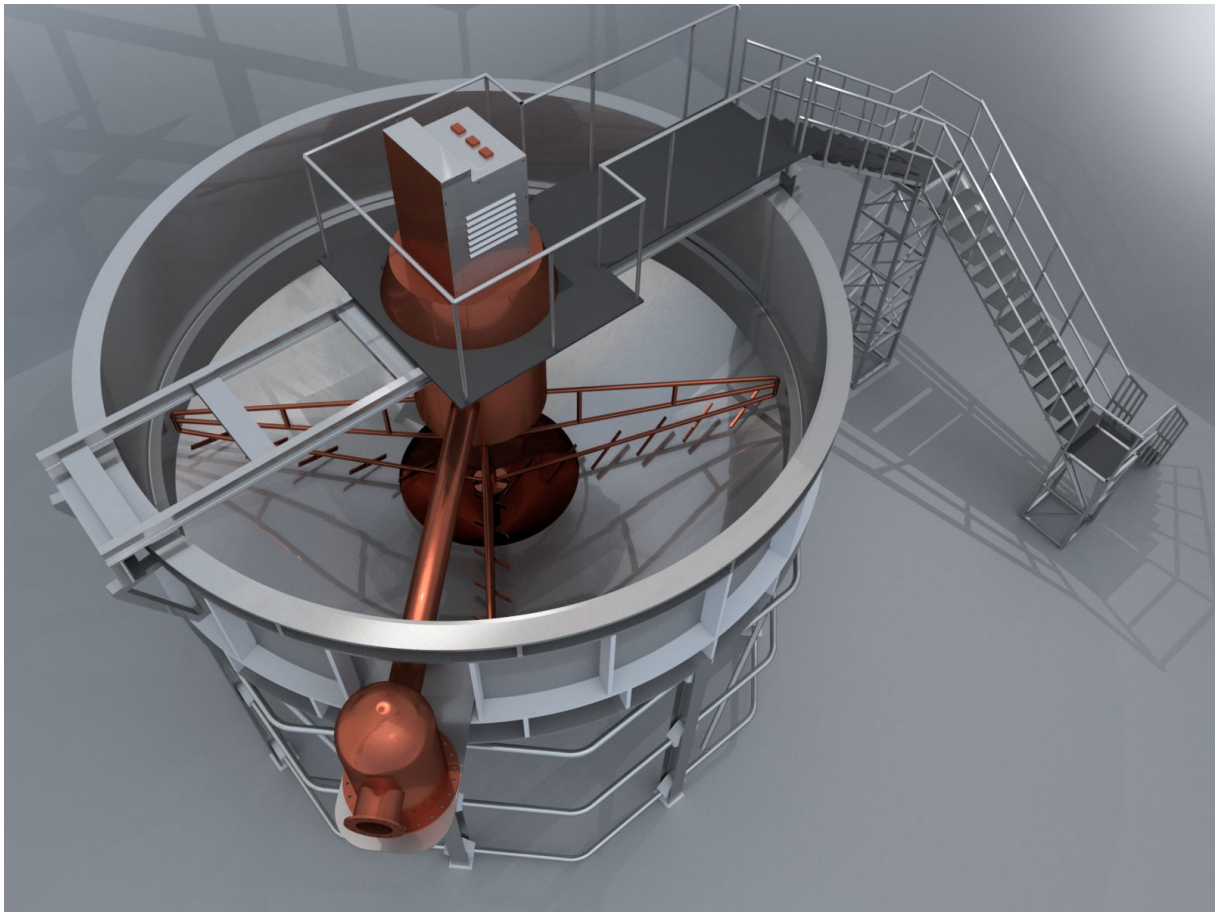


Рис. 2. Фотореалистичное изображение сгустителя

В ходе работы над проектами закладываются основы проектно-конструкторской компетентности будущих специалистов, и работа совместно с выпускающими кафедрами позволяет улучшить результаты. Данная разработка может быть использована в учебном процессе при изучении тепло-массообменных процессов и аппаратов.

Литература:

1. Процессы и аппараты обогащения и химической технологии. Сгущение и водооборот. Комплексные решения и «ноу-хау» / А.В. Бауман. Новосибирск, 2011
2. https://www.autodesk.ru/products/inventor/overview

УДК 622.279.8

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТАНОВОК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Зялалов А.А., Новиков А.Е., Валеев С.И.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ЗАО «ИТЦ «Эксперт Профи»,
E-mail: vsi73@mail.ru
E-mail: novikov_andrey1@mail.ru

При промысловой подготовке газа на газовых и газоконденсатных месторождениях в условиях постоянно снижающегося давления проблема обеспечения требуемых кондиций газа и максимального извлечения из него углеводородов C_2–C_{5+}, являющихся ценным сырьем газохимии, приобретает особую актуальность.

Переработка природного и попутного нефтяного газов осуществляется с применением низкотемпературных процессов. В настоящее время, основным процессом на установках комплексной подготовки газа (УКПГ) является процесс низкотемпературной сепарации (НТС), который хорошо изучен, наиболее технологически простой среди всех низкотемпературных процессов, поэтому его использование наиболее экономически обосновано [1,2].

Температуру потока газа в процессе низкотемпературной сепарации можно понизить за счет: изоэнтропийного расширения газа, изоэнтальпийного расширения газа или изобарного охлаждения газа. Изоэнтальпийное расширение газа в процессе низкотемпературной сепарации осуществляется с использованием эффекта Джоуля-Томсона (использование дроссельных устройств). Изоэнтропийное расширение газа осуществляется с применением турбодетандеров. В случае использования изобарного охлаждения газа принято говорить о процессе низкотемпературной конденсации.

Изоэнтальпийное расширение газа в установках НТС с дросселем является технически наиболее простым способом и первым получило массовое промышленное использование в мире в середине XX столетия. Например, в СССР НТС с дросселем начали использоваться с 1960-х годов на Оренбургском месторождении, месторождениях Средней Азии и др. [3]. Принципиальная схема установки низкотемпературной сепарации с дросселем показана на рис. 1.

Основное преимущество установок НТС с дросселем их простота и дешевизна, обусловленная низкими как капитальными, так и эксплуатационными затратами. Также достоинством является легкость регулирования технологического процесса.

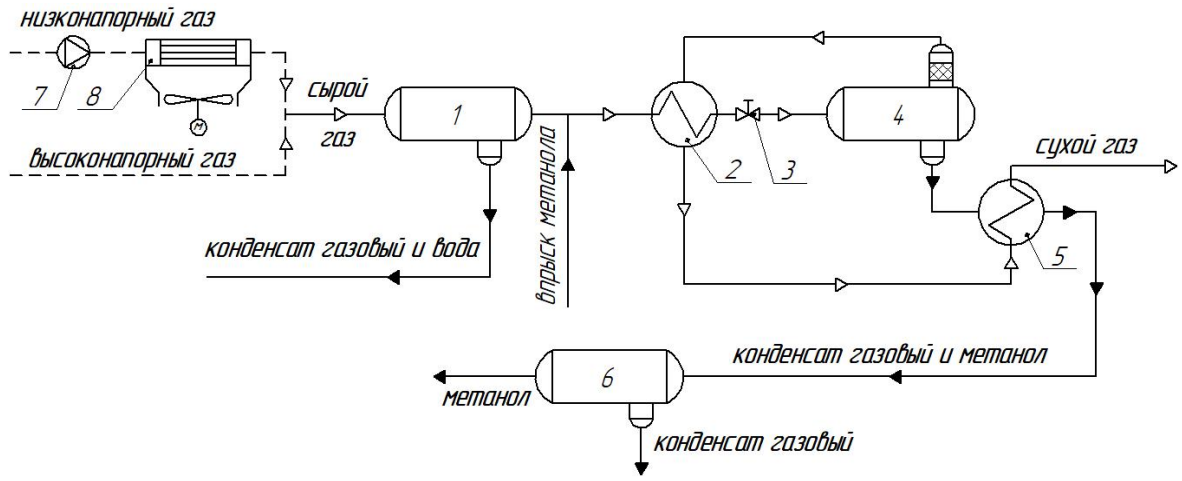


Рис. 1 – Схема установки низкотемпературной сепарации газа с дросселем:
1, 4 – сепараторы; 2, 5 – теплообменники; 3 – дроссель; 6 – разделитель;
7 – компрессор; 8 – АВО

Главной особенностью и недостатком установок НТС с дросселем является необходимость высокого давления на линии высоконапорного газа на входе в установку, иначе процесс дросселирования газа не обеспечивает достижения необходимых температур, достаточных для конденсации тяжелых компонентов газа. Для продления срока эффективной эксплуатации установки НТС в период снижения давления газа на устьях скважин используют внешние источники холода, а также дожимные компрессорные станции, модернизацию сепарационного оборудования.

Другим устройством, используемым в технологических схемах НТС, является эжектор. Отличие эжекторного устройства от дроссельного заключается в возможности вовлечения (эжекции) низконапорных газов концевой дегазации конденсата в основной поток.

Эжекторное устройство характеризуется простотой конструкции, малыми габаритами и надежностью эксплуатации. Рабочий перепад давления, эжекторных установок сопоставим с аналогичными параметрами дроссельной технологии. Достижение более низких температур технологически затруднено вследствие увеличения количества низконапорных газов дегазации конденсата.

Схема установки НТС с турбодетандерным агрегатом (ТДА) показана на рис. 2.

Подключение ТДА на УКПГ возможно по двум схемам: «компрессор–детандер» («К–Д») или «детандер–компрессор» («Д–К») (как на рис. 2), что оказывает существенное влияние на технологические параметры работы установки. Подключение «К–Д» обеспечивает постоянную температуру НТС около –35 °С круглогодично. Работа технологической схемы при подключении ТДА по схеме «Д–К» позволяет более полно использовать холод окружающей среды, поэтому

в зимний период достигается более глубокое охлаждение, а летом достигаемая температура составляет всего около –25 °С.

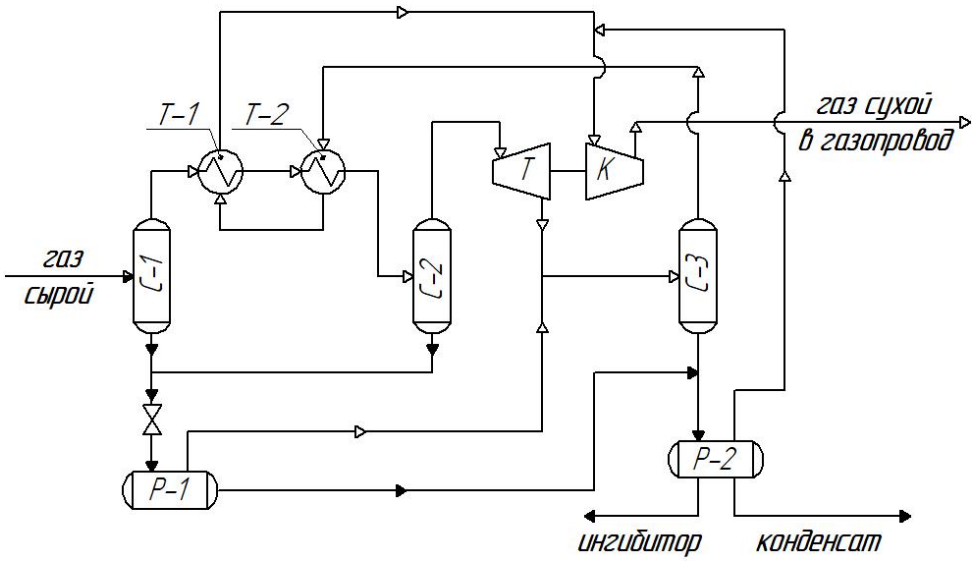


Рис. 2 – Схема установки НТС с турбодетандером: С-1, С-2, С-3 – сепараторы; Т-1, Т-2 – теплообменники; Т – турбодетандер; К – компрессор; Р-1, Р-2 – разделители жидкости.

По сравнению со схемами НТС с дроссельными и эжекционными устройствами технология НТС с ТДА обладает следующими преимуществами:

- существенного снижения требуемого перепада давления для достижения необходимой температуры газа;

- достижения значительно более низких температур газа при том же перепаде давления.

В то же время ТДА обладает рядом недостатков:

- переменный режим работы по расходным и термобарическим параметрам;

- компрессор ТДА вносит теплоту в систему подготовки газа, что снижает эффект охлаждения газа в турбодетандере;

- эксплуатация ТДА требует наличия специально подготовленного персонала высокой квалификации.

В РФ происходит активное внедрение ТДА на промысловых УКПГ. Только в 2012-2015 гг. введены в эксплуатацию 37 агрегатов [3]. При этом сложности, связанные с эксплуатацией ТДА, и необходимость в больших капитальных затратах на их внедрение стимулирует активные работы по модернизации существующего сепарационного оборудования [4-8].

Литературный анализ показал, что на завершающем этапе разработки «метановых» сеноманских месторождений основное увеличение нагрузки падает на входные сепараторы установок подготовки газа, и, прежде всего, требуется их модернизация. При эксплуатации газоконденсатных месторождений при

увеличении обводненности продукта и/или росте производительности требуется модернизация всего сепарационного оборудования вводных и низкотемпературных сепараторов, разделителей жидкости, другого основного оборудования УКПГ, часто связанная с изменением технологической схемы подготовки.

Основным путем модернизации сепарационного оборудования является замена сетчатых и др. отбойных элементов на высокоскоростные центробежные сепараторы, при использовании центробежных сепарационных элементов «старых» конструкций – их замена на новые современные, которые обеспечивает повышенную производительность, а при необходимости дальнейшего увеличения разделительной способности сепараторов предлагается использование после центробежных устройств новых высокоэффективных регулярных насадок.

Литература:

1. Бекиров Т.М. Технология обработка газа и конденсата / Т.М. Бекиров, Г. А. Ланчаков. – М.: Недра, 1999. – 596 с.

2. Лапидус А.Л, Голубева И.А., Жагфаров Ф. Г., Газохимия. Первичная переработка газов. – М.: Нефть и газ, 2004 - 243 с.

3. Прокопов А.В. Современное состояние технологий промысловой подготовки газа газоконденсатных месторождений / А.В. Прокопов и др. // Вести газовой науки. – 2015, №3. – С.100-108.

4. Стуликов Д.А. Совершенствование технологического сепарационного оборудования подготовки газа // Академический журнал Западной Сибири. – 2016. – №2. – С. 26-28.

5. Корякин А.Ю. Опыт модернизации технологического оборудования подготовки газа залежей ачимовской толщи Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения / А.Ю. Корякин, В.Ф. Кобычев, В.В. Александров, И.М. Шигапов, А.И. Кагарманов // Газовая промышленность. – 2019. – Спецвыпуск №1. – С. 64-70.

7. Клюйко В.В. Совершенствование сепарационного оборудования за счет применения новых контактных устройств / В.В. Клюйко, В.З. Минликаев, Г.К. Зиберт, А.Г. Зиберт // Газовая промышленность. – 2016. – №7-8. – С. 56-60.

8. Машины и аппараты химических производств. Реакторы и теплообменники: учебное пособие / С.И. Валеев [и др.]. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2016.-126 с.

УДК 532.73+53.043+617

СВЕРХКРИТИЧЕСКАЯ И ВАКУУМНАЯ ИМПРЕГНАЦИЯ ПОРИСТОГО МАТРИКСА ЛЕКАРСТВЕННЫМ ПРЕПАРАТОМ

Игнатьев Н.В., Гаврилов А.В., Максудов Р.Н., Аляев В.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: 1996ignatev@mail.ru

Целью исследований является определение параметров массопереноса, обеспечивающих получение высокоочищенного композитного материала, включающего костный матрикс и лекарственное средство для замещения дефектов кости. Такие дефекты часто возникают в результате патологического процесса (инфекции, опухоли и др.), причины которого требуют медикаментозного лечения. Поэтому совершенно необходимо насыщение трансплантируемого костного матрикса лекарственными препаратами (антибиотиками, цитостатиками и др.), что позволит создать локальную концентрацию в 100 и 1000 раз большую, чем при системном приеме этих веществ. На этапе проектирования технологии депонирования лекарственного препарата в очищенный костный матрикс (КМ) мы исследуем эффективность двух методов:

- импрегнацию в потоке сверхкритического CO_2, модифицированного полярным со-растворителем в качестве растворителя препарата и транспортирующего потока [1];

- импрегнацию при давлениях ниже атмосферного (вакуумная пропитка) раствором препарата в полярном растворителе [2, 3].

Для пропитки был выбран ванкомицин ($C_{66}H_{75}Cl_2N_9O_{24}$) – антибиотик, разветвленный трициклический гликозилированный пептид с бактерицидной активностью в отношении большинства организмов. Ванкомицин обладает молярной массой 1449,3 г/моль и дипольным моментом 15,8 Дб. Очевидно, диоксид углерода следует модифицировать полярным со-растворителем. Также, необходим энтрейнер для переноса препарата в поровые каналы КМ при вакуумной пропитке. В обоих случаях использовался диметилсульфоксид $(CH_3)_2SO$. Растворимость ванкомицина в ДМСО имеет величину 10,5 г/100 г при 20^0C.

Процесс сверхкритической импрегнации КМ проводился при давлении 300 бар и температуре 40^0C. По окончании эксперимента и «дегазации» образца - выхода остаточного CO_2 и испарения ДМСО из поровых каналов эксперимент повторялся.

Вакуумная импрегнация очищенного КМ раствором «ДМСО – ванкомицин» осуществлялась при показаниях вакуумметра 1 – 0.5 кгс/см^2. После каждой пропитки осуществлялась «дегазация» образца - испарение ДМСО из поровых каналов при атмосферном давлении.

Помимо мониторинга изменения массы образцов с точностью $\pm 10^{-5}$ кг, эффективность импрегнации очищенного КМ оценивалась методом термогравиметрического анализа (ТГА) [4]. Результаты представлены на рисунках 1 и 2. Обнаружено, что большее количество препарата содержится в образце, подвергнутом вакуумной пропитке. Полученные результаты обуславливают необходимость исследований с другими со-растворителями и энтрейнерами (например, этанолом и его водными растворами).

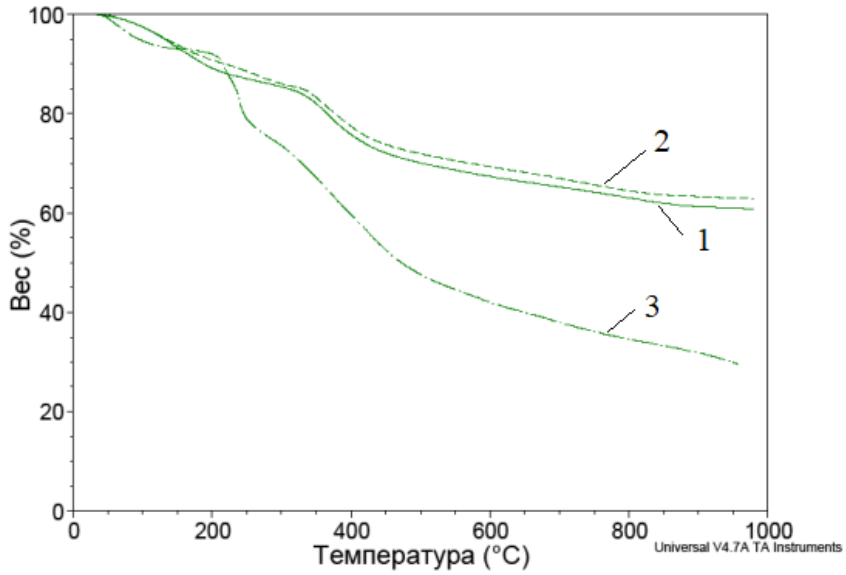


Рис. 1 – Кривые ТГА
1 – очищенный не деминерализованный КМ; 2 – КМ после СК-импрегнации;
3 – ванкомицин эльфа

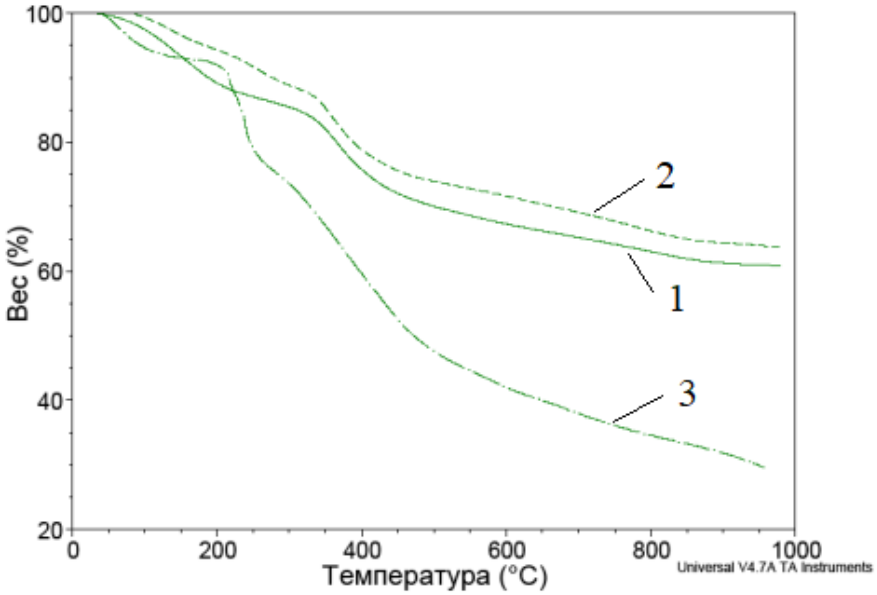


Рис. 2 – Кривые ТГА
1 – очищенный не деминерализованный КМ; 2 – КМ после вакуумной
импрегнации; 3 – ванкомицин эльфа

Литература:

1. Максудов Р.Н., Колсанов В.С., Савельев Р.И., Петров В.А., Аляев В.А., Валиуллин Л.Р., Рагинов И.С., Егоров В.И., Бирюля В.В. Получение высокоочищенного композитного материала для замещения дефектов кости методами сверхкритической очистки и импрегнации // Вестник Казанского технол. ун-та. 2016. № 20. С. 177.

2. Фазуллин А.Р., Игнатьев Н.В., Гаврилов А.В., Максудов Р.Н., Аляев В.А. Исследование процесса вакуумной импрегнации капиллярно-пористых материалов. В сборнике: Вакуумная техника и технология. Десятая Российская студенческая научно-техническая конференция: материалы конференции. Казань, 2021. С. 163-164.

3. Игнатьев Н.В., Аляев В.А., Гаврилов А.В. Установка для импрегнации капиллярно-пористых материалов органическими соединениями при давлениях ниже атмосферного. В книге: Интенсификация тепло-массообменных процессов в химической технологии. Тезисы докладов Седьмой Российской научно-технической студенческая конференции, приуроченной к юбилейной дате 100-летию со дня рождения А.Г. Усманова. 2020. С. 82-84.

4. Ivanova A.V., Danilov V.A., Kolyamshin O.A., Ushmarin N.F., Kol'tsov N.I., Khasanov A.I. The effect of maleinimides on the properties of a rubber compound based on nitrile butadiene rubber (Article) // Int. Polymer Sci. and Tech. 2015. V. 42. Issue 3. P. T19.

УДК 683.878.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ НА МЕДИЦИНСКОЙ МАСКЕ

Алтунин К.В., Идир Н.
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
E-mail: altkonst881@yandex.ru

Доклад посвящен проблеме конденсации на медицинской маске. Показаны результаты экспериментальных исследований.

Цель работы: проведение экспериментального исследования появления конденсата на внутренней поверхности медицинской маски в зимних условиях европейской части России.

Известно, что во время эпидемий инфекционных заболеваний и при контактах с больными основной формой индивидуальной защиты является медицинская маска, которая уменьшает риск заражения инфекциями, передающимися воздушно-капельным путем, при условии соблюдения определенных правил ношения такой маски, главным из которых считается, безусловно, строгий контроль времени ее ношения [1]. В настоящее время с этой целью используются различные медицинские маски, выпускаемые медицинской промышленностью [2].

Конденсация – это теплообменный процесс перехода пара в жидкое состояние. Выделение теплоты при конденсации пара неразрывного связывает этот процесс с теплообменом. Процесс конденсации пара возможен только в докритическом его состоянии. Он может быть осуществлен путем его охлаждения или снижения давления, так, чтобы при вновь достигнутых значениях температуры и давления конденсированная фаза была более устойчивой. Конденсация может происходить как в объеме пара, так и на охлаждаемой поверхности теплообмена. Конденсация насыщенного или перегретого пара на твердой стенке происходит, если ее температура меньше температуры насыщения при данном давлении. При этом на поверхности могут образовываться отдельные капли (капельная конденсация) или сплошная пленка конденсата (пленочная конденсация) [3].

Проведен анализ источников информации по теме исследования, а также патентный поиск [4-9]. Установлено, что основными типами масок для лица, которые были рекомендованы на протяжении всей пандемии COVID-19, являются: тканевые маски; хирургические маски (медицинские маски); сертифицированные маски, закрывающие лицо, считающиеся респираторами с сертификатами, такими как N95 и N99; фильтрующие респираторы FFP с сертификатами, такими

как N95 и N99 и другие респираторы FFP, включая эластомерные респираторы, некоторые из которых также могут рассматриваться как фильтрующие маски.

В ходе анализа источников информации выяснено, что продолжительность ношения маски должна, как правило, составлять не более 2 часов, а при невозможности замены не более 4 часов во избежание самоконтаминации. В результате патентного поиска сделан вывод, что многие изобретатели пренебрегают конденсацией на маске при разработке новых изделий.

Проведены эксперименты при отрицательной температуре окружающей среды. Получены данные по массе конденсата на внутренней поверхности маски при нахождении на улице в зимних условиях европейской части России (г. Казань, Республика Татарстан). На базе полученных данных создана общая таблица результатов исследования, а также построены 2D и 3D графики, где масса конденсата возрастает с увеличением времени опыта и снижением температуры воздуха. Например, на рис. 1 приведен график массы конденсата на внутренней поверхности медицинской маски в зависимости от времени каждого опыта; на рис. 1 приведен трехмерный график изменения массы конденсата при разных температурах наружного воздуха и времени без учета опытных данных при сильном снегопаде. Также в ходе экспериментального исследования выявлено, что обильный снегопад увеличивает массу медицинской маски на несколько процентов.

В результате экспериментов установлено, что максимальная масса конденсата составила 2,53 г. при сухой массе маски, равной 2,21 г. Сделан вывод о меньшем ресурсе среднестатистической медицинской маски.

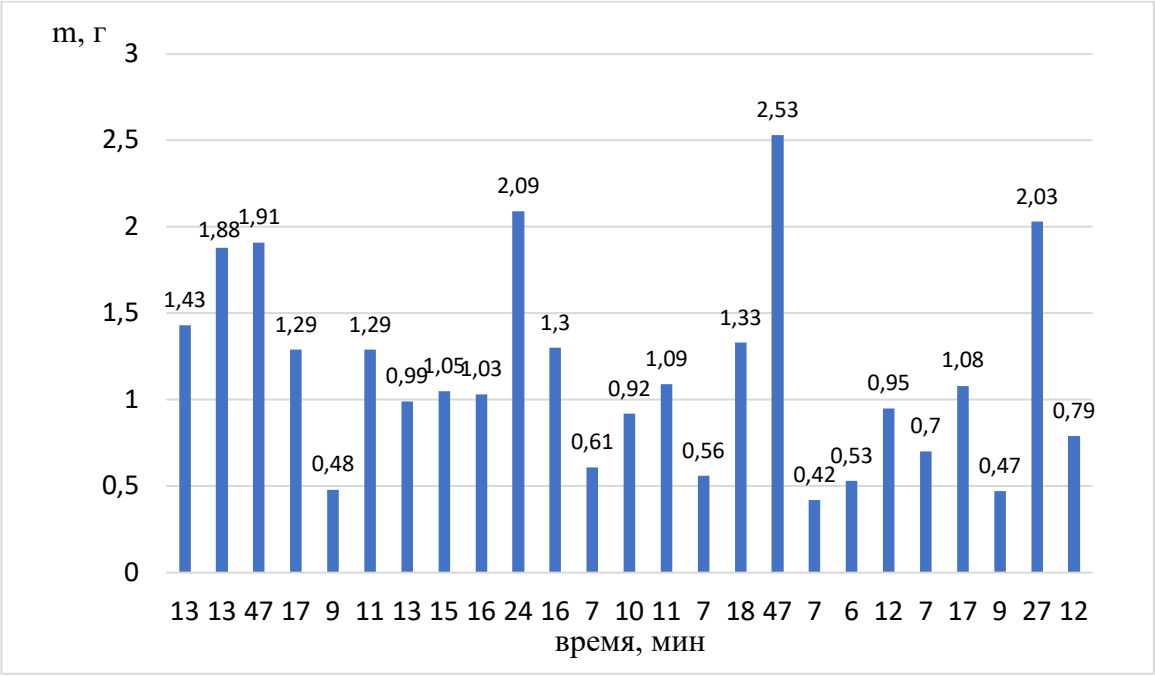


Рис. 1 – Масса конденсата на внутренней поверхности медицинской маски [г] от времени опыта [мин]

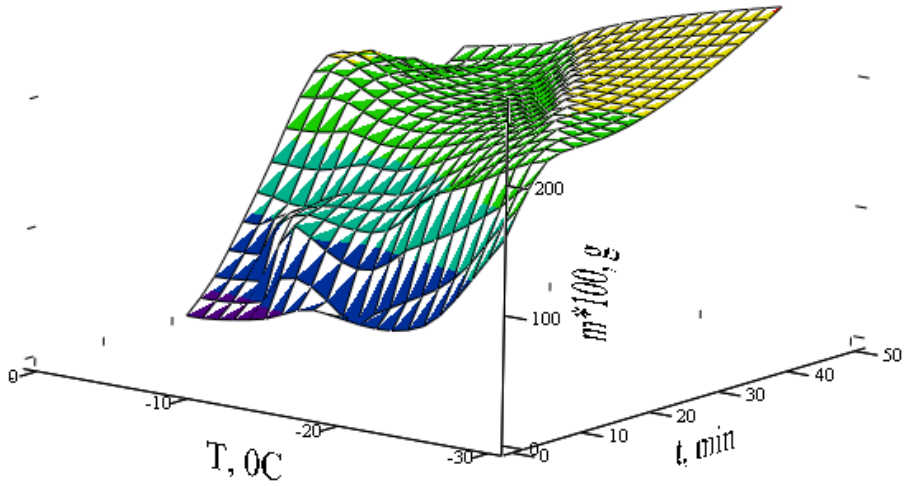


Рис. 2 – Изменение массы конденсата m при разных температурах наружного воздуха T и времени t без учета опытных данных при сильном снегопаде: ось X – время опыта t [мин], ось Y – температура наружного воздуха T [^{0}C], ось Z – масса конденсата на маске [г], умноженная на 100

Литература:

1. Мурашко, В.В. Шуганов Е.Г. Панченко А.В. «Общий уход за больными», 1988. — 224 с.

2. Прокопьев Н.Я., Кашуба Э.А., Комаров А.П., Пичугов Д.Г. Медицинская маска // Техника. Технологии. Инженерия. Международный научный журнал № 2 (08). 2018. – С. 47-50.

3. Савин И.К. Теоретические основы теплотехники (Краткий курс). Ч. II. Теплопередача: Учеб. пособие. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. – 172 с.

4. Хасин И.Л., Кублин О.В. Маска медицинская. Патент РФ на полезную модель №107900. МПК A41D 13/00. Опубл. 10.09.2011 г. Бюл. №25.

5. Кашуба Э.А., Комаров А.П., Пичугов Д.Г., Прокопьев Н.Я. Маска медицинская. Патент РФ на полезную модель №149019. МПК A41D 13/11. Опубл. 20.12.2014 г. Бюл. №35.

6. Подольский В.А., Васильев И.В., Самосват М.А. Маска лицевая антимикробная. Патент РФ на полезную модель №208790. МПК A41D 13/11. Опубл. 13.01.2022 г. Бюл. №2.

7. Михайлов В.В. Защитная маска для лица с фильтром. Патент РФ на изобретение №2761994. МПК A61F 9/04, A62B 18/02, A41D 13/11. Опубл. 14.12.2021 г. Бюл. №35.

8. Enrico Brambilla, Samir S. Ahmad. Ventilation mask with heat and moisture exchange device. US Patent №9878121. Int. Cl.: A61M 16/10, A61M 16/06, A61B 5/097, A61M 16/20. Publ.: 30.01.2018.

9. Russell G. Ward. Cold weather respiratory mask. US Patent №4458679. Int. Cl.: A61M 15/00, A62B 7/00. Publ.: 10.07.1984.

УДК 663.55:633.11

ЭКСТРАГИРОВАНИЕ РОСТКОВ ПШЕНИЦЫ В ЭКСТРАКТОРЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ С РЕЦИКЛ-КАНАЛАМИ

Ильина А.Э., Просин М.В., Бородулин Д.М., Головачева Я.С.
Кемеровский государственный университет,
E-mail: iit@kemsu.ru
mailto:dok@npt.ru

Пророщенные ростки пшеницы это в большинстве случаев побочный продукт мукомольного производства. Но эти самые ростки содержат в себе более 8–14% масел и поэтому имеют большую значимость пищевой и фармацевтической промышленности. Сок из пророщенных росток пшеницы является одним из основных источников токоферольных соединений из всех масел растительного сырья, около 2500 мг/кг. И в особенности содержание α-токоферола, который является примерно 60% от всего токоферола. Пророщенные ростки пшеницы к тому же являются обогащенными неомыляемыми фитостеролами, в частности ситостерола (60–70%) и кампестерола (20–30%), поликозанолов, тиамина, рибофлавина и ниацина. Тетракозанол, гексокозанол и октакозанол это одни из основных компонентов поликозанолов среди всех разновидностей пшеницы. Так же, пророщенные ростки пшеницы насыщены неотъемлемыми ненасыщенными жирными кислотами, и содержат около 80% линолевой (18:2) и линоленовой (18:3) кислот. На сегодняшний день сок из ростков пророщенной пшеницы применяется в роли функциональной добавки к пищевой продукции, а также в фармацевтической и косметической промышленности. Следует отметить, что содержание полиненасыщенных жирных кислот и биоактивных соединений в свою очередь влияет на длительность хранения, потому что вышеприведенные соединения подвергаются окислительным процессам и деградации связей.

Популяризация функционального, натурального и безопасного пищевого сырья сводится к тому, что технологии немеханического воздействия на обрабатываемые материалы стали заменять основные и альтернативные способы экстрагирования растворителем для целевых компонентов в пищевой промышленности [1]. В связи с этим аппаратурное оформление экстракционных процессов преображается, появляются новые конструкции, сочетающие в себе различные способы взаимодействия обрабатываемых сред. Среди ряда конструкций выделяются экстракторы с кислородной обработкой сырья.

На рисунке 1 изображен общий вид экстрактора периодического действия для извлечения целевых компонентов с помощью рецикл-каналов.

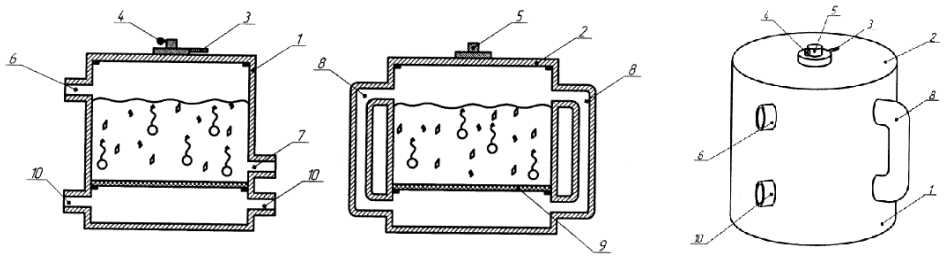


Рисунок 1 – Экстрактор периодического действия для извлечения целевых компонентов с рецикл-каналами

Принцип работы экстрактора заключается в следующем. Обрабатываемый материал и растворитель загружаются в рабочую зону аппарата через патрубок 6. С целью увеличения интенсивности процессов извлечения под избыточным давлением в течение определенного времени подается воздушная смесь через штуцер 10 в газораспределительное устройство 9. Пузырьки кислорода воздуха, передвигаясь в объеме аппарата, приводят смесь в псевдо-ожиженное состояние обрабатываемое сырье, хаотично перемешиваясь в растворителя. Прошедший через обрабатываемую суспензию воздух попадает в два рецикл-канала 8, которые направляют его обратно в газораспределительное устройство, приводя к более интенсивному перемешиванию материала и уменьшению затрачиваемого воздуха для проведения процесса экстрагирования. Избыточная часть воздуха через клапан в крышке 2 выводится из рабочей зоны. Рукоятка 3 предназначена для перекрытия отверстий в крышке для соблюдения технологических режимов. По завершении всего процесса экстрагирования обогащенный экстракт выводится из нижней части цилиндрического корпуса 1, через выгрузной патрубок 7, а отработанная твердая фаза удаляется из аппарата через крышку 2. Высокая эффективность процесса осуществляется за счет обработки кислородной смесью, которая так же приводит положительным окислительным преобразованиям в обрабатываемом материале.

Целью дальнейших исследований будет заключаться в оценке экстракции из пророщенных ростков пшеницы и сравнение ее с другими видами экстрагирования основываясь на показатели извлечения сухих веществ, качественного состава кислот. Помимо этого, отдельно необходимо провести исследование по влиянию температуры на кислотное число, содержание полифенолов и содержание фитостеролов.

Необработанные зародыши пшеницы использовались сорта Wudeli мукомольной группы (Ханьдань, Хэбэй, Китай). Путь получения сока пророщенных ростков пшеницы осуществляется следующим образом: зародыши пшеницы → инактивация ферментов с использованием микроволнового излучения →

обработка с помощью экстрактора периодического действия для извлечения целевых компонентов с рецикл-каналами → обесцвечивание → дистилляция.

Проведение поставленного исследования позволит получить функциональный продукт питания, регулярное употребление которого позволит поддержать здоровье населения на высоком уровне. Низкая себестоимость исходного сырь в сочетании с эффективными процессами экстрагирования позволят снизить стоимость конечного продукта.

Литература:

1. Borodulin, D. M. Comparative analysis of extraction methods in distilled drinks production / D. M. Borodulin, I. Yu. Reznichenko, M. V. Prosin and A. V. Shalev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Vol. 640. – No. 022060. – DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022060

2. Сидорова, А.Э. Постановка задач исследования производства экстрактов из растительного сырья для пищевой и фармацевтической промышленности / А.Э. Сидорова, М.В. Просин, Д.М. Бородулин, А.М. Попов, А.В. Шалев // «Пищевые инновации и биотехнологии». Том 2, 2021. – С. 69-71

3. Просин, М.В. Влияние внутренней структуры растительного сырья на извлечение целевых компонентов экстракторами различных конструкций / М.В. Просин, Д.М. Бородулин, Я.С. Головачева, А.В. Шалев // XVII Всероссийская конференция молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Пищевые технологии и биотехнологии»: Изд-во КНИТУ. – С. 182-193

УДК 536.2.083

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДА НАГРЕТОЙ ПРОВОЛОКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ С ЕГО ПОМОЩЬЮ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА

Исмагилова Г. И., Медяков А. А.
Поволжский государственный технологический университет,
E-mail: gulnazismagilova75@gmail.com

В данной статье рассматривается способ определения коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой проволоки. Также в статье описаны сущность метода нагретой проволоки, устройство и принцип действия лабораторной установки, порядок выполнения работы, представлен протокол результатов измерений и расчетов.

Ключевые слова: теплопроводность, тепловой поток, градиент температуры, плоская и цилиндрическая стенки, коэффициент теплопроводности, стационарный процесс, нестационарный процесс, закон Фурье.

Пусть газ, теплопроводность которых определяется, заполняет цилиндрический объем, образованный двумя коаксиальными цилиндрами (рис. 1).

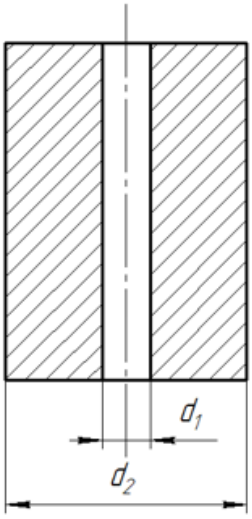


Рис. 1. Коаксиальные цилиндры

В этом случае теплопроводность газа определяется по формуле закона Фурье для цилиндрической стенки:

$$\lambda = -\frac{Q}{2\pi r l} \cdot \frac{dr}{dT},$$

где Q – тепловой поток от более нагретого цилиндра к менее нагретому, l – длина цилиндра, r – радиус свободного пространства между цилиндрами, T – температура газа, λ – коэффицент теплопроводности газа.

Интегрируя это выражение по радиусу от r_1 до r_2 , получаем

$$\lambda = -\frac{\ln(d_1/d_2)}{2\pi rl} \cdot \frac{Q}{(T_1 - T_2)}, \quad (1)$$

где l – длина цилиндров, м; T_1 и T_2 – температуры внутреннего и внешнего цилиндров соответственно, ℃.

В рассматриваемом методе внутренний цилиндр заменяется тонкой металлической проволокой. Расчетная формула при этом не изменяется, а учитываются фактические диаметры проволоки и наружного цилиндра. В ходе эксперимента проволока нагревается электрическим током, тепловой поток направлен перпендикулярно оси проволоки через окружающую ее жидкость (газ) к стенке цилиндра. Для определения коэффициента теплопроводности жидкости (газа) измеряется в процессе эксперимента мощность тока, средние температуры проволоки и стенок цилиндра.

Установка ФПТ-1-3 состоит из блока рабочего элемента РЭ-3 и приборного блока БП-3 с тумблерами включения питающих напряжений (рис. 2).

Тепловой поток в установке создается путем нагрева вольфрамовой проволоки постоянным током. Температура стеклянной трубки, в которой располагается проволока, в процессе эксперимента остается постоянной, так как ее поверхность обдувается потоком воздуха с помощью вентилятора. Для определения температуры проволоки измеряются падение напряжения на ней и протекающий через проволоку электрический ток. Коэффициент теплопроводности определяется из выражения закона Фурье для цилиндрической стенки.

Работа выполнялась в следующем порядке:

1. Подали напряжения питания тумблером СЕТЬ;
2. Включили нагрева вольфрамовой проволоки тумблером НАГРЕВ;
3. Поворотом ручки потенциометра НАГРЕВ по ходу часовой стрелки выставили ток, близкий к максимальному. В первом опыте выставили ток нагрева 200 мА, что соответствует 40 делениям прибора М253 с зеркальной шкалой при верхнем пределе измерения 750 мА.
4. Дождались стационарного теплообмена в блоке РЭ-3 лабораторной установки, который устанавливался в течение 10 мин.
5. Измерили и записали в протокол результатов измерений и расчетов (табл. 1) напряжение на вольфрамовой проволоке, протекающий через нее ток и температуру стеклянной трубки.
6. Для второго и двух последующих опытов повторно выставили напряжение питания близкое к максимальному, повторили выполнение пунктов 4-5. По окончании эксперимента выключили напряжение питания.

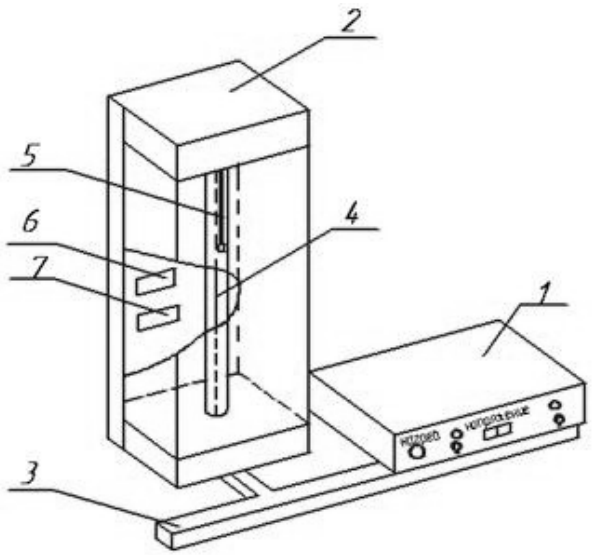


Рис. 2. Устройство установки ФПТ-1-3: 1 – блок питания БП-3,
2 – блок рабочего элемента РЭ-3, 3 – стойка, 4 – вольфрамовая нить,
5 – первичный преобразователь температуры, 6 – цифровой вольтметр М830,
7 – вторичный прибор для измерения температуры ART02184

Обработка результатов эксперимента проводилась в следующем порядке:

1. Определение температуры вольфрамовой проволоки в нагретом состоянии:

$$R_t = U/I = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_{\text{п}}), \text{Ом}.$$

Следовательно,

$$t_{\text{п}} = \frac{\left[\frac{U}{I \cdot R_0} - 1\right]}{\alpha}, ^{\circ}\text{C}.$$

2. Определение теплового потока через цилиндрический слой воздуха в стеклянной трубке

$$Q = U \cdot I, \text{Вт}.$$

3. Определение коэффициента теплопроводности воздуха по формуле (1).

4. Вычисление среднего арифметического значения λ по результатам измерений в заданном числе опытов.

5. Оформление протокола.

Таким образом, подробно изучив способ определения коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой проволоки, рассмотрев сущность метода нагретой проволоки, устройство и принцип действия лабораторной установки мы получили экспериментальное значение коэффициента теплопроводности воздуха $\lambda = 0{,}035\ \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, отклонение от табличного значения составило 37,1%, что связано с погрешностью приборов и измерений.

Таблица 1 Протокол результатов измерений и расчетов

№	Наименование и обозначение параметра	Размерность	Числовые значения в опытах			
			№1	№2	№3	№4
1	Напряжение на вольфрамовой проволоке, U	В	2,75	2,35	2,18	1,82
2	Сила тока, протекающего через проволоку, I	А	0,2	0,185	0,165	0,155
3	Температура воздуха, $t_{\text{В}}$	°С	22	23	24	24
4	Внутренний диаметр стеклянной трубки, D	м	0,026			
5	Диаметр проволоки, d	м	0,00053			
6	Длина проволоки, l	м	0,402			
7	Температурный коэффициент сопротивления вольфрама, α	1/К	0,00051			
8	Эл. сопротивление проволоки при 20^0С, R_0	Ом	10			
9	Температура проволоки, $t_{\text{п}}$	°С	73,53	52,99	62,98	34,16
10	Полный тепловой поток, Q	Вт	0,55	0,43	0,36	0,28
11	Коэффициент теплопроводности воздуха, λ	Вт/(м·К)	0,026	0,034	0,022	0,057
12	Среднее значение λ	Вт/(м·К)	0,035			
13	Среднее значение $t_{\text{В}}$	°С	23,25			

Литература:

1. Цветков Ф. Ф., Григорьев Б. А. Тепломассообмен: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2005. – 550 с.

УДК 685.34.082

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РЕЦИКЛИНГА ПЕНОПОЛИУРЕТАНА

Камашев Н.Ю., Осипов Э.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: kamashev.98@list.ru

Рост производства и потребления полимеров и материалов на их основе обуславливает постоянное увеличение технологически неизбежных отходов производства и изделий, вышедших из эксплуатации. Воздействие их на окружающую среду стало причиной различных экологических проблем. Традиционные способы утилизации полимерных отходов – сжигание и депонирование, экономически невыгодны и опасны с точки зрения загрязнения [1]. В то же время снижение природных ресурсов, и как следствие, их удорожание и дефицит диктуют настоятельную необходимость использования вторичного сырья.

Наиболее эффективным путем утилизации отходов является их вторичное использование, к которому, в частности, относится рециклинг [2].

Понятие рециклинг применяется к процессам многократной переработки отходов с целью их полного или частичного возврата к началу производственного цикла.



Рис.1. Направления рециклинга полимерных отходов

Каждое из указанных направлений характеризуется своими преимуществами и недостатками, которые во многом связаны не только с особенностями самих методов, но и зависят от уровня развития производства, поэтому при выборе метода следует исходить из комплекса технико-экономических, сырьевых и экологических факторов.

Наиболее рациональным путем переработки отходов пенополиуретана является химический рециклинг методом алкоголиза [2]. Но на данный момент

процесс химического рециклинга проводится только в лабораторных условиях. В принципиальную лабораторную схему входит круглодонная четырехгорлая колба емкостью 100 мл, снабженная мешалкой, термометром и обратным холодильником, четвертое горло используется для введения крошки пенополиуретана. Процесс проводится методом перемешивания измельченного пенополиуретана и растворителя в условиях повышенных температур. Целью работы является разработка промышленной схемы рециклинга пенополиуретана, а также определение аппаратурно-технологической компоновки процесса.

Технологическая схема рециклинга пенополиуретана

Анализ работ [1-2] и общепринятых схем рециклинга позволил разработать следующую схему производства, суть которой описана ниже.

Технологическая схема рециклинга пенополиуретана представлена на рис. 2.

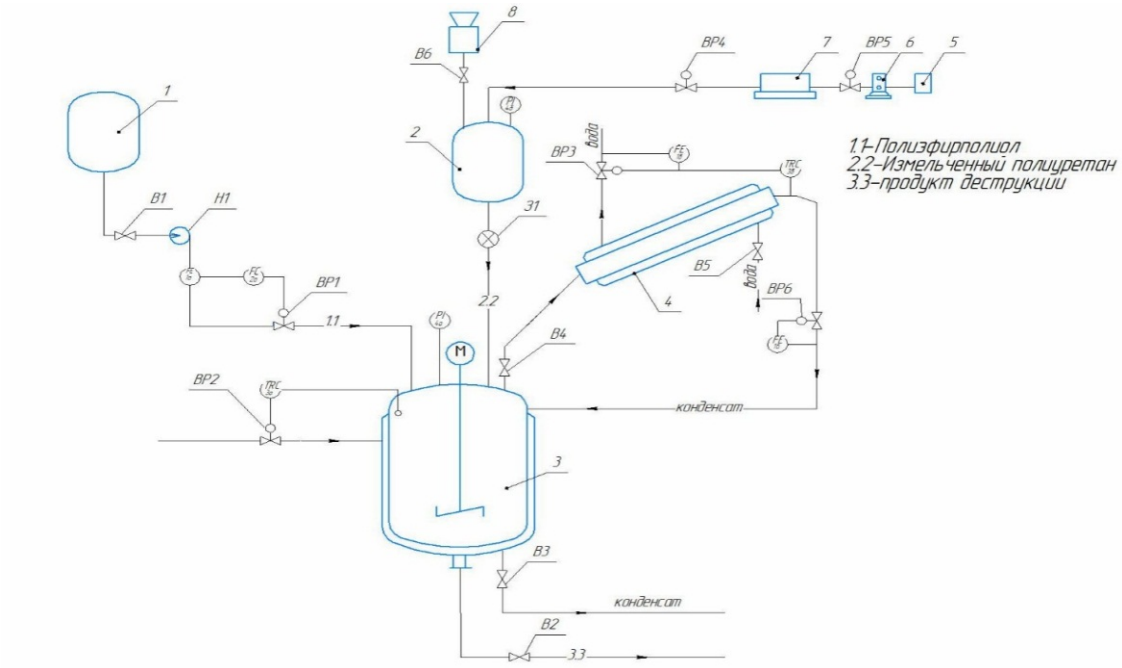


Рис.2. Технологическая схема рециклинга пенополиуретана:
1-емкость с растворителем, 2 - емкость с крошкой пенополиуретана,
3 – реактор с перемешивающим устройством, 4 - теплообменник (конденсатор),
5- фильтр, 6 – компрессор, 7 – воздухозаборник, 8-измельчитель,
В1-В6 – вентиль запорный, ВР1-ВР6 – вентиль регулирующий

В измельчитель 8 подается поролон, в котором измельчается в крошку и с помощью встроенного пневмотранспорта подается в емкость 2. Затем из компрессора 6 подается воздух и определенное количество крошки сбрасывается в реактор. Из емкости 1 подается растворитель в реактор 3. Перегретый пар поступает в рубашку аппарата, тем самым нагревает растворитель. Включается перемешивающее устройство в реакторе , процесс длится 3-4 часа при температуре

(180-200) °С, при которой растворитель частично испаряется и поступает в конденсатор 4, где конденсируется и возвращается в реактор.

Процесс предусмотрен для производственных отходов, а также для непригодных к использованию пенополиуретановых матрасов, без каких-либо органических загрязнений и прочих примесей и рассчитан, в основном, на крупных производителей блочного ППУ, которые могут перерабатывать собственные отходы и возвращать восстановленный полиол в свое производство. Измельченные отходы полиуретана, растворяются в смеси простого полиэфира (как правило, это базисный полиэфир, из которого была произведена исходная пена. Для данного процесса отходы должны быть рассортированы по типам и очищены от каких-либо механических включений (металл, бумага, дерево и т. д.)

В процессе определения компоновки схемы были внесены следующие предложения по конструкции аппаратов:

1. Чтобы при сбрасывании крошки в реактор воздух не создавал давления установить в реактор штуцер с фильтром и клапаном, для вывода излишек воздуха.

2. Выбрать измельчитель встроенным в реактор с пневмотранспортом, а скорость подачи измельченного пенополиуретана установить в соответствии со скоростью его растворения

3. Для нагрева растворителя в реакторе и поддержания необходимой температуры в ходе реакции использовать вместо рубашки ТЭН (электронагреватель).

По предложенной технологической схеме становится возможной определение компоновки оборудования и подбор стандартизированных конструкций. Нестандартным оборудованием в данной схеме является реактор, поэтому необходимо провести дополнительные исследования по его конструированию и расчету. Остальное оборудование представляется принять стандартизированным и выбрать его по каталогам заводов-изготовителей.

Вторичное использование полиолов и производство на их основе пенополиуретанов можно рассматривать как «замкнуть круг». Данный способ имеет приоритетное значение для решения вопросов вторичного потребления сырья, а также для решения вопросов экологической безопасности окружающей среды.

Литература:

1. Бакирова, И. Н. Получение, свойства и применение продуктов химической деструкции сетчатых полиуретанов: специальность 02.00.06 "Высокомолекулярные соединения" : диссертация на соискание ученой степени доктора химических наук / Бакирова Индира Наилевна. – Казань, 2004. – 335 с.

2. Бакирова И.Н. Лабораторный практикум по полимерным материалам: учебное пособие/ И.Н Бакирова, А.М. Кочнев; М-во образ. и науки России, Казанский нац. исслед. технол. ун-т. — Казань: Изд-во КНИТУ,2013-38 с.

УДК 536.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИПРОПИЛЕНА В СРЕДЕ СУБ- И СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЫ

Каримов Т.М., Загреев И.Р., Захаров А.С., Гильмутдинов И.И., Сабирзянов А.Н.

Казанский национальный исследовательский технологический университет,

E-mail: temyr-96@mail.ru

На сегодняшний день ключевой проблемой является переработка полипропилена и, прежде всего, переработка полипропиленовых материалов, составляющих большую часть твердых бытовых отходов. В промышленности различают термическую и химическую переработку полипропиленовых отходов. В данной работе представлен альтернативный метод переработки полипропилена в среде суб- и сверхкритической воды. [1] Переработка полипропилена в среде суб- и сверхкритической воды является экологически чистым методом, менее энергетически затратным и мало стадийным процессом по сравнению с традиционными методами. При контакте полипропилена с суб- и сверхкритической водой, осуществляется реакция гидролиза, в результате которой полимеры превращаются в мономеры. [2]

Схема экспериментальной установки по переработки полипропилена в среде Суб- и сверхкритической воды представлена на рисунке 1.

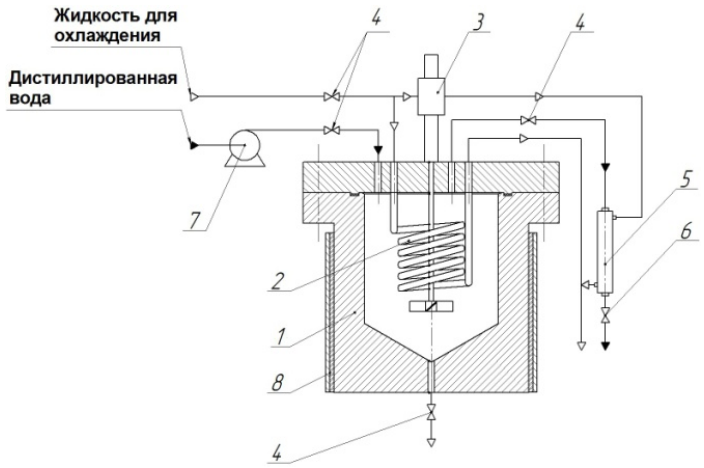


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки для проведения реакции гидролиза полипропилена в среде суб- и сверхкритической воды: 1- реактор, 2- охлаждающий змеевик, 3- магнитная мешалка, 4- клапан, 5- теплообменник для охлаждения, 6- регулятор обратного давления, 7- насос, 8- нагревательная рубашка

Основной элемент установки - это реактор 1, представляющий собой толстостенный сосуд выдерживающий давление до P=400 бар и температуру до T=430℃, выполненный из материала Hastelloy C-276, объемом V=1000 мл. Регулирование температуры осуществляется с помощью нагревательной рубашки 8 и охлаждающего змеевика 2. Также предусмотрена система охлаждения привода мешалки 3 и выходящего потока, с помощью теплообменника 5.

Полипропилен загружаются в реактор, предварительно заливается вода объемом V=330 мл. Далее происходит нагревания реактора до температуры T=415 ^{0}C. При достижении заданной температуры начинается отсчет времени τ=1ч. Конечное давление зависит от количества залитой воды и от температуры реакции. Охлаждение происходит за счет охлаждающего змеевика. После охлаждения осуществляется отбор газовых продуктов реакции. Далее происходит разгерметизация реактора и отбор жидких и твердых продуктов реакции.

Газовые продукты реакции исследуются на газовом хроматографе на определение качественного состава полученных продуктов.

Результаты исследования газовых продуктов на хроматографе, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Состав газовых продуктов идентифицированных на газовом хроматографе

№	Идентификация вещества	Концентрация, % масс
1.	1-Пропан, 2-метил	19,5
2.	Пентан	18,2
3.	Пропан	15,4
4.	2-Пентан, 2-метил	9,8
5.	1-Пентан, 2-метил	7,3
6.	2-Пентан	6,6
7.	Изобунтан	6,2
8.	Циклопентан, 1,1-Диметил	4,5
9.	Циклобутан, метил	3,7
10.	Бутан, 2-метил	2,1
11.	Циклопентан	2,4
12.	1-Пентан	2,2
13.	1-Бутилен	2,1

Для анализа жидких проб проводилась экстракция изооктаном. Результаты хроматографического анализа не выявили в экстракте дополнительных соединений кроме воды. Твердая фаза исследовалась на дифференциальном сканирующем калориметре ДСК-500. На котором исследовались фазовые переходы исходных образцов и образцов после взаимодействия со сверхкритической водой. Результаты дифференциально сканирующего калориметра (ДСК) представлены на рисунке 2.

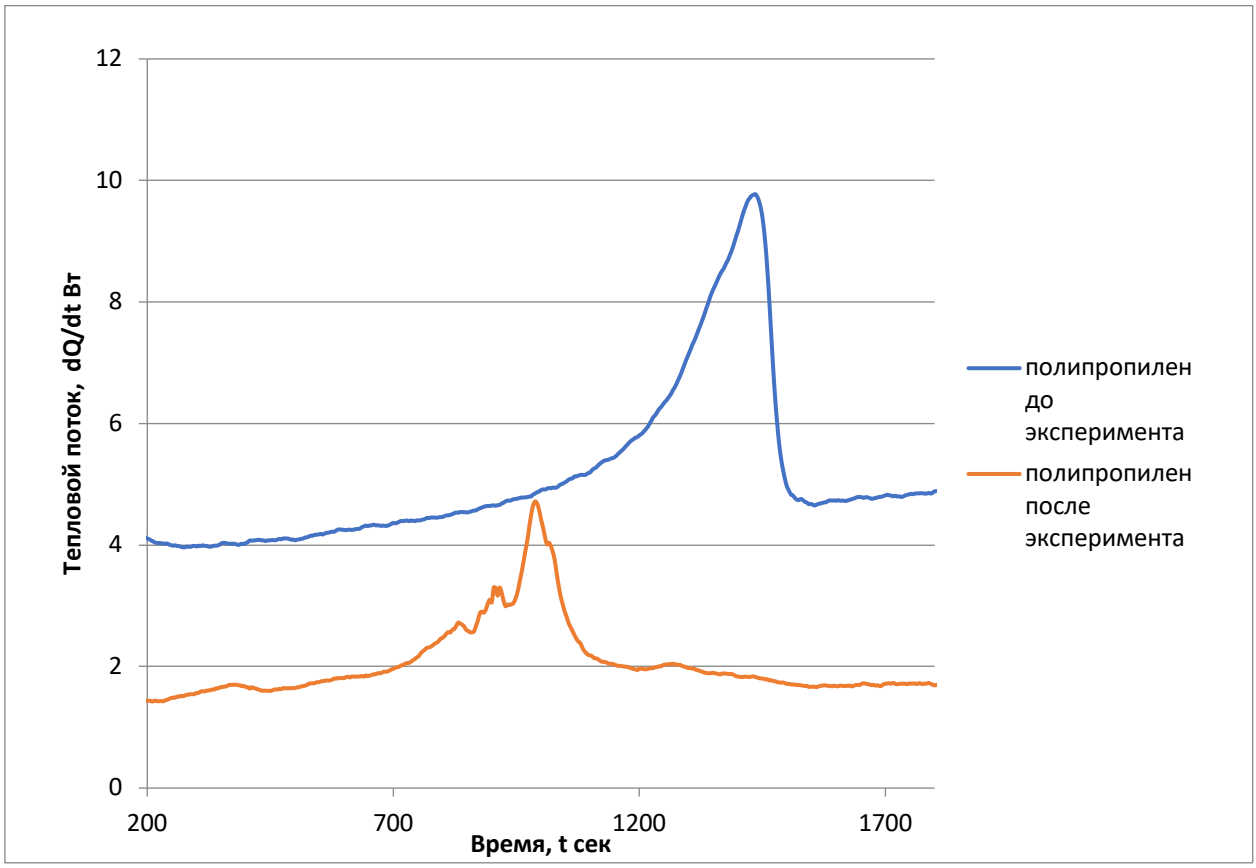


Рисунок 2. Экспериментальные кривые ДСК твердой фазы полипропилена

По экспериментальным кривым ДСК была определена температура плавления полипропилена (до эксперимента) T_1= 249 ^{0}C, и после взаимодействия со сверхкритической водой T_2= 219 ^{0}C, также по экспериментальным пикам была рассчитана энтальпия плавления полипропилена (до эксперимента) H=72,42 Дж/г, и энтальпия плавления полипропилена после взаимодействия со сверхкритической водой H=38,7 Дж/г.

В данной работе проводилось экспериментальное исследование процесса переработки полипропилена в среде суб- и сверхкритической воды при температурах T=415 ^{0}C и времени реакции τ=1ч. В результате реакции гидролиза образовались газовые продукты реакции. Аналитическим исследованиям были подвержены газовые продукты реакции. Анализ газообразных соединений представлен в таблице 1. Анализ жидких проб не выявил образование новых соединений. Скорее всего это связано с длительностью проведения реакции, в ходе которой

образовавшиеся жидкие продукты перешли в газовую фазу. Твердые фаза исследовалась на дифференциальном сканирующем калориметре. Была определена температура плавления и энтальпия плавления образцов.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Катализ в нефтепереработке и нефтегазохимии», соглашение № 075-00315-20-01 от 04.06.2020 г.

«Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» Казанского национального исследовательского технологического университета при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России в рамках гранта № 075-15-2021-699»

Литература:

1. Celine W. S. Yeung Y.Q. Polyolefins and Polystyrene as Chemical Resources for a Sustainable Future: Challenges, Advances, and Prospects. ACS Materials Letters 2021, 3 (12) , 1660-1676

2. Joshua C.W., Andrew P.D. 100th Anniversary of Macromolecular Science Viewpoint: Toward Catalytic Chemical Recycling of Waste (and Future) Plastics. ACS Macro Letters 2020, *9* (11) , 1494-1506.

УДК 621.01

БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Каримуллин И.Ф., Закиров И.Р., Мухаметзянова А.Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: asia@kstu.ru

Важнейшей составляющей научных исследований в химической технологии является эксперимент, в основе которого лежит научно-поставленный опыт с точно учитываемыми и управляемыми условиями. Основной целью эксперимента является выявление свойств исследуемых объектов, проверка справедливости гипотез и на этой основе широкое и глубокое изучение протекающих процессов. Познавательная роль эксперимента велика не только в том, что он дает ответы на ранее поставленные вопросы, но и в том, что в ходе его осуществления возникают новые проблемы, решение которых требует проведения новых опытов и создания новых экспериментальных установок и изготовления экспериментальных образцов, например, таких как контактные устройства для тепло-масообменных колонн, диафрагмы, сопла и др.

В обеспечении научного эксперимента можно отметить ряд современных технологий, положительно влияющих на качество, сроки и стоимость проводимого эксперимента:

- это CAD технологии трехмерного моделирования, которые позволяют уже на стадии эскизного проектирования задавать геометрические параметры будущей конструкции и оперативно ее перестраивать;

- это технологии быстрого прототипирования и 3D печати, позволяющие в сжатые сроки выпустить натурный лабораторный образец по CAD модели.

Технологии быстрого прототипирования деталей позволяют на основе CAD модели изготовить экспериментальный образец с высокой точностью, исследовать его и внести необходимые изменения в конструкцию. Быстрое прототипирование (Rapid prototyping) подразумевает аддитивный (additive – «посредством добавления») способ получения изделия, в противоположность «удалению» материала при механообработке. Методы прототипирования подразумевают послойное построение с соединением слоев (склеиванием, спеканием, свариванием).

На рис.1 представлена блок-схема изготовления прототипа.

Процессы быстрого прототипирования или, иначе, 3D-печати, как правило, состоят из трех шагов: формирование поперечных сечений изготавливаемого объекта, послойное наложение этих сечений и комбинирование слоев.

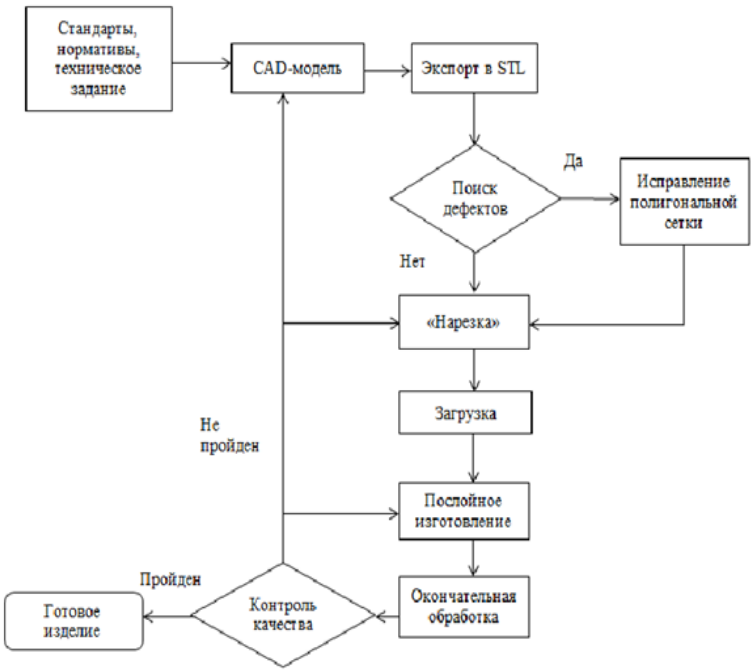


Рис.1. Блок-схема изготовления прототипа

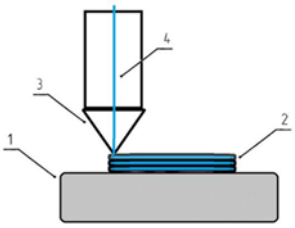


Рис.2. Процесс изготовления детали методом послойного наплавления (FDM): 1 – нагревательная платформа, 2 – деталь в процессе печати, 3 – экструдер, 4 – нить пластика

Наиболее доступной и эффективной по технико-экономическим показателям является прототипирование методом послойного наплавления (Fused deposition modeling (FDM). Технология FDM подразумевает создание трехмерных объектов за счет последовательного нанесения слоев материала, повторяющих контуры цифровой модели. Как правило, в качестве материалов для печати выступают термопластичные полимеры различных видов, поставляемые в виде катушек нитей или прутьев.

Производственный цикл начинается с обработки трехмерной цифровой модели. Модель в формате STL делится на слои и ориентируется наиболее подходящим образом для печати. При необходимости генерируются поддерживающие структуры, необходимые для печати нависающих элементов. Некоторые устройства позволяют использовать разные материалы во время одного производственного цикла. Например, возможна печать модели из одного материала с печатью опор из другого, легкорастворимого материала, что позволяет с легкостью удалять поддерживающие структуры после завершения процесса печати. Альтернативно, возможна печать разными цветами одного и того же вида пластика при создании единой модели.

Изделие, или «модель», производится выдавливанием («экструзией») и нанесением микрокапель расплавленного термопластика с формированием последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования.

Пластиковая нить разматывается с катушки и расплавляется в экструдере – устройстве, оснащенном механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для плавки материала и соплом, через которое осуществляется

непосредственно экструзия. Нагревательный элемент служит для нагревания сопла, которое, в свою очередь, плавит пластиковую нить и подает расплавленный материал на строящуюся модель. Как правило, верхняя часть сопла, наоборот, охлаждается с помощью вентилятора для создания резкого градиента температур, необходимого для обеспечения плавной подачи материала. Диаметр сопла может варьироваться от микрометрических до сантиметровых и подбирается под модель экструдера и необходимую детализацию изделия.

Экструдер перемещается в горизонтальной и вертикальной плоскостях под контролем алгоритмов, аналогичных используемым в станках с числовым программным управлением. Сопло перемещается по траектории, заданной CAD системой. Модель строится слой за слоем, снизу-вверх. Как правило, экструдер (также называемый «печатной головкой») приводится в движение пошаговыми моторами или сервоприводами. Наиболее популярной системой координат, применяемой в FDM, является декартова система, построенная на прямоугольном трехмерном пространстве с осями X, Y, Z.

В качестве расходных материалов доступны всевозможные термопластики и композиты, включая ABS, PLA, поликарбонаты, полиамиды, полистирол, лигнин и многие другие. Как правило, различные материалы предоставляют выбор баланса между определенными прочностными и температурными характеристиками.

Моделирование методом послойного наплавления (FDM) применяется для быстрого прототипирования и быстрого производства. Быстрое прототипирование позволяет уменьшить стоимость отдельного эксперимента; сократить общее время проектирования за счет отработки серии конструкторских решений модельного эксперимента; повысить точность расчетных исследований.

Кафедра инженерной компьютерной графики и автоматизированного проектирования (ИКГАП) КНИТУ оснащена аппаратными и программными средствами проектирования и трехмерного моделирования, важнейшей стадией которого является создание промышленного прототипа, т.е. опытного образца (серии образцов), представляющего собой полноразмерную, полностью функционирующую модель, демонстрирующую работоспособность идеи (принципа) и реализованную в конкретном изделии. Промышленный прототип обладает всеми основными свойствами конечного продукта, он завершает этап технического проектирования и используется для отработки технологических условий промышленного производства на стадии рабочего проектирования.

Студенты, изучая дисциплины графического цикла на кафедре ИКГАП, знакомятся с особенностями проектирования машиностроительного изделия, процессом прототипирования. Кроме базовых знаний, необходимых для построения моделей деталей и сборок, выполнения рабочих и сборочных чертежей, студенты

получают также навыки 3D печати. Прототипирование помогает студентам при создании первых же моделей получить представление о том, какие воздействия испытывают детали и изделие в целом во время работы, а навыки использования профессиональных программ перерастают в навыки проектирования и экспериментирования. Знание всех возможностей CAD систем обеспечит ее сквозное использование в дальнейшем на более высоком уровне (оптимизация параметров механизма, моделирование по заданным условиям, решение других проектных задач) при изучении смежных дисциплин и курсов, прежде всего деталей машин, теории машин и механизмов, процессов и аппаратов химической технологии и др.

УДК 621.565.93/.95

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ПСВ-125 ЗА СЧЕТ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА

Католиченко В.С., Нуждин А.В.
Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
E-mail: a.nugdin@yandex.ru

Одной из основных проблем, стоящих перед отечественной теплоэнергетикой, является повышение энергетической эффективности используемого технологического оборудования. Вопросы повышения эффективности работы промышленных теплообменных аппаратов и установок и уменьшения удельных расходов тепла имеют первостепенное значение для современной теплоэнергетики и промышленности.

Подогреватели сетевой воды типа ПСВ-125 устанавливаются в схеме теплоснабжения и предназначены для подогрева сетевой воды на тепловых электростанциях паром из отборов турбин, а в отопительно-производственных и отопительных котельных – паром котлов низкого давления.

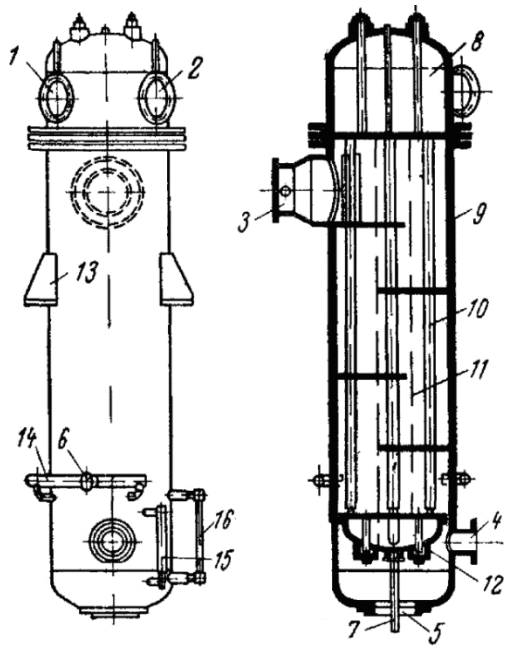


Рисунок 1. Конструкция подогревателя сетевой воды ПСВ-125

Подогреватель сетевой воды представляет собой кожухотрубный теплообменник вертикального типа, основными узлами которого являются корпус, трубная система, верхняя и нижняя (плавающая) водяные камеры.

Основными деталями ПСВ-125 являются [1]: 1 и 2 – патрубки верхней водяной камеры, 3 – патрубок подачи пара, 4 – патрубок отвода газовоздушной смеси, 5 – патрубок отвода конденсата, 6 – патрубок отвода неконденсирующихся газов, 7 – слив воды из трубной системы, 8 – верхняя водяная камера, 9 – корпус, 10 – каркас трубной системы, 11 – трубки латунные, 12 – нижняя водяная камера, 13 – опоры подогревателя, 14 – кольцо для отсоса воздуха, 15 – уравнительный сосуд, 15 – водоуказательное стекло.

Подогреватели сетевой воды типа ПСВ были спроектированы более 60 лет назад по единой конструктивной схеме, которая до настоящего времени не претерпела принципиальных изменений [2]. Показатели тепловой эффективности таких аппаратов не соответствуют современному техническому уровню.

Анализ литературы [3-4] показал, что в отечественной и зарубежной практике для интенсификации теплообмена наиболее широко распространены пассивные методы, которые не требуют подвода дополнительной энергии для их работы.

Для повышения эффективности теплообмена в подогревателе ПСВ-125 выбираем трубки с поперечной кольцевой накаткой.

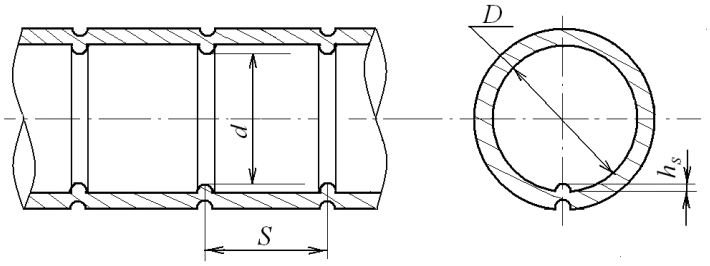


Рисунок 2. Труба с поперечной кольцевой накаткой

Расчет выполнялся для стандартных трубок подогревателя ПВС-125. Наружный диаметр трубки $D_н$ = 0,019 м, внутренний диаметр - D = 0,017 м. Внутренний диаметр накатки d = 0,0166 м с поперечным шагом накатки s = 0,005 м. Высота накатки $h_н$ = 0,0002 м, относительный шаг накатки $s_{н.о}$ = 0,29, относительная высота выступа накатки $h_{н.о}$ = 0,98.

Расчетный коэффициент теплоотдачи от стенок трубок без поперечных канавок к воде составляет $\alpha_{вн}$ = 9337 Вт/м^2·К, а коэффициент теплопередачи - $k_р$ = 3166 Вт/м^2·К.

Расчетный коэффициент теплоотдачи от стенок трубок с поперечными канавками к воде определялся по формуле [4]

$$\alpha_{вн.н} = \alpha_{вн} \cdot \left[\left(1 + \frac{lg(Re) - 4{,}6}{7{,}45} \right) \cdot \left(\frac{1{,}14 - 0{,}28 \cdot \sqrt{1 - h_{н.о}}}{1{,}14} \right) \cdot e^{\frac{9 \cdot (1 - h_{н.о})}{S_{н.о}^{0{,}58}}} \right]$$

где Re – критерий Рейнольдса для воды в трубках с накаткой.

Расчетный коэффициент теплоотдачи от стенок трубок с поперечными канавками к воде составил $\alpha_{вн.н} = 14351$ Вт/м^2·К, а расчетный коэффициент теплопередачи - $k_{р.н} = 3833$ Вт/м^2·К. Увеличение коэффициента теплоотдачи от внутренней поверхности трубки к воде после нанесения накатки составило 1,54. Коэффициент теплопередачи увеличился в 1,21 раза.

Выполнение на наружной поверхности трубок поперечной кольцевой накатки вызывает повышение их гидравлического сопротивления [3, 4]. Расчетный коэффициент потерь давления по длине трубок без поперечных кольцевых канавок составляет $\xi_0 = 0{,}0188$.

Расчетный коэффициент потерь давления по длине трубок с поперечными канавками к воде определялся по формуле [4]

$$\xi_н = \xi_0 \cdot \left[\left(1 + \frac{100\left(lg(Re) - 4{,}6\right) \cdot \left(1 - s_{н.о}\right)^{1{,}65}}{e^{S_{н.о}{}^{0{,}3}}} \right) \cdot e^{\frac{25 \cdot \left(1 - h_{н.о}\right)^{1{,}32}}{S_{н.о}{}^{0{,}75}}} \right]$$

Расчетный коэффициент потерь давления по длине трубок с поперечными канавками к воде составил $\xi_н = 0{,}03$. Увеличение коэффициента потерь давления по длине трубок составило 1,6. Коэффициент теплопередачи увеличился в 1,21 раза. Это вызвало увеличение потерь давления по длине в подогревателе с поперечной накаткой трубок на 12 Па.

В дальнейшем было проведено исследование влияние на интенсивность теплообмена изменения внутреннего диаметра накатки и ее поперечного шага.

Результаты расчета коэффициента теплопередачи подогревателя сетевой воды ПСВ-125 с трубками с поперечной кольцевой накаткой при изменении внутреннего диаметра накатки от d = 0,0164 м до d = 0,013 м с шагом 0,2 мм при постоянном поперечном шаге накатки s = 0,02 м приведены на рисунке 3.

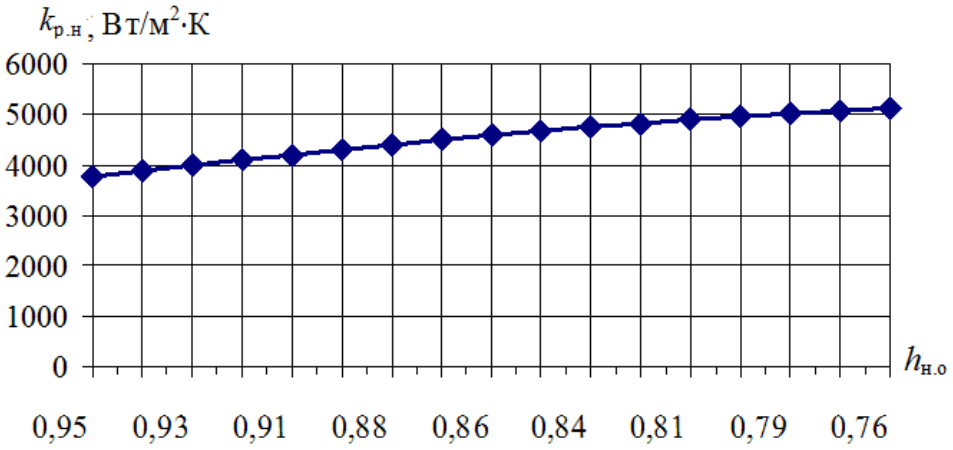


Рисунок 3. Зависимость коэффициента теплопередачи от внутреннего диаметра накатки при постоянном поперечном шаге накатки

На рисунке 3 видно, что при уменьшении внутреннего диаметра накатки происходит увеличению коэффициента теплопередачи подогревателя. Наибольшее значение $k_{р.н}$ = 5131 Вт/м^{2}К коэффициент теплопередачи достигает при отношении диаметра накатки к внутреннему диаметру трубки 0,76. С другой стороны увеличение внутреннего диаметра накатки приводит к увеличению потерь по длине гидравлической части подогревателя, который достигли 1200 Па при $h_{н.о}$ = 0,76.

Результаты расчета коэффициента теплопередачи подогревателя сетевой воды ПСВ-125 с трубками с поперечной кольцевой накаткой при изменении поперечного шага накатки от s = 0,0075 м до s = 0,05 м с шагом 2,5 мм при постоянном внутреннем диаметре накатки d = 0,015 м представлены на рисунке 4.

На рисунке 4 видно, при увеличении поперечного шага накатки происходит уменьшение коэффициента теплопередачи подогревателя. Минимальное значение $k_{р.н}$ = 3945 Вт/м^{2}К коэффициент теплопередачи достигает при отношении шага накатки к внутреннему диаметру трубки 2,94.

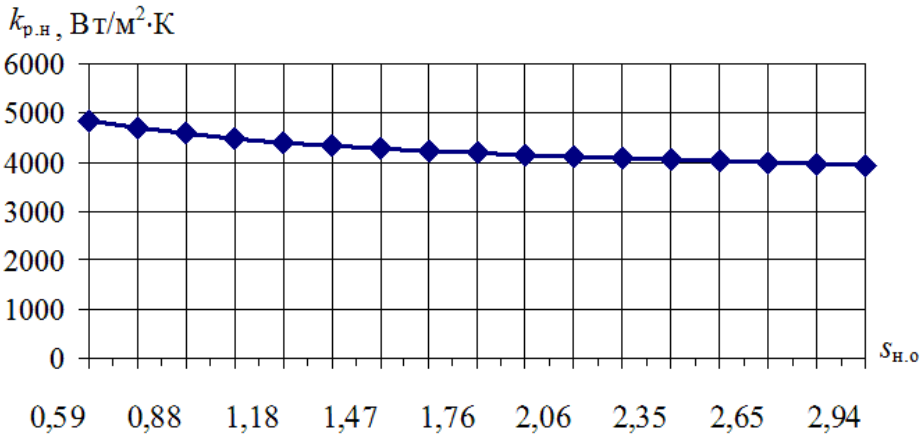


Рисунок 4. Зависимость коэффициента теплопередачи от поперечного шага накатки при постоянном внутреннем диаметре накатки

Проведенные расчеты позволили установить влияние внутреннего диаметра поперечной кольцевой накатки и ее продольного шага на интенсификацию теплообмена в подогревателе сетевой воды ПСВ-125 и повышение его энергетической эффективности. Их результаты могут быть использованы при проектировании типовых подогревателей сетевой воды и при замене трубного пучка в работающих подогревателях в ходе ремонта и модернизации.

Литература:

1. Левин Б.И., Шубин Е.П. Теплообменные аппараты систем теплоснабжения. М., Энергия, 1965. - 257 с.

2. Теплообменное оборудование для промышленных энергоустановок и систем теплоснабжения. Промышленный каталог 04-04. М.: ФГУП ВНИИАМ, НПО ЦКТИ, 2004. – 115 с.

3. Интенсификация теплообмена: учеб. пособие / [В.Н. Белозерцев и др.]. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. – 208 с.

4. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. Учебно-справочное пособие. – М.: «Теплотехник», 2011. – 335 с.

УДК 66.066

МОДУЛЬ ФИЛЬТРУЮЩЕЙ ЦЕНТРИФУГИ ДЛЯ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ГРУНТОВ

Клементьева А.Ю., Лашков В.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет
E-mail: lashkov_dm@kstu.ru

При добыче нефти, ее транспортировке и переработке образуется большое количество нефтезагрязненных отходов [1], значительную часть которых составляют нефтесодержащие грунты [2], которые можно рассматривать как вторичный источник углеводородных ресурсов. Проведенный анализ литературных источников позволил установить, что для обезвреживания (излечения целевых компонентов) нефтесодержащих грунтов нашли применение самые различные технологии, в том числе, основанные на методе экстракции углеводородов нефти низкокипящими растворителями, с последующим обезвоживанием в центробежном поле.

В соответствии с методом экстракции процесс осуществляется по многомодульной схеме. В первом модуле нефтесодержащий грунт промывается товарной нефтью или некондиционными углеводородами, а во втором - метиленхлоридом. Отделение твердой фазы и жидкостей в модулях осуществляется в фильтрующих центрифугах, в которых последовательно протекают несколько стадий: образования осадка, его уплотнения и механическое обезвоживание. Кроме того, анализ схемы центробежного аппарата [3], в котором фильтрующую поверхность образуют транспортеры с движущимися перфорированными лентами, позволил выявить принципиальную возможность объединения процессов промывки нефтезагрязненных грунтов и разделения фаз, осуществляемых в разных модулях метода экстракции.

Для разработки варианта многосекционной фильтрующей центрифуги, совмещающего стадии двукратной промывки и механического обезвоживания за определяющие положения были приняты следующие технические условия:

- обеспечение непрерывной регенерации фильтрующей поверхности, обеспечивающей высокую разделительную способность в течение всего процесса обезвоживания;

- совмещение различных стадий в одном аппарате с целью получения конечного продукта с заданными характеристиками.

По результатам проведенных исследований в CAD системе Компас 3-D с интегрированной CAE системой APM WinMachine спроектирован модуль многосекционной центрифуги (рис.1). Система APM WinMachine позволяет производить проектные и проверочные расчеты на прочность механических передач

[4], отдельных узлов и деталей машин [5], а также инженерный анализ конструкции с целью выбора оптимального варианта решения задачи.

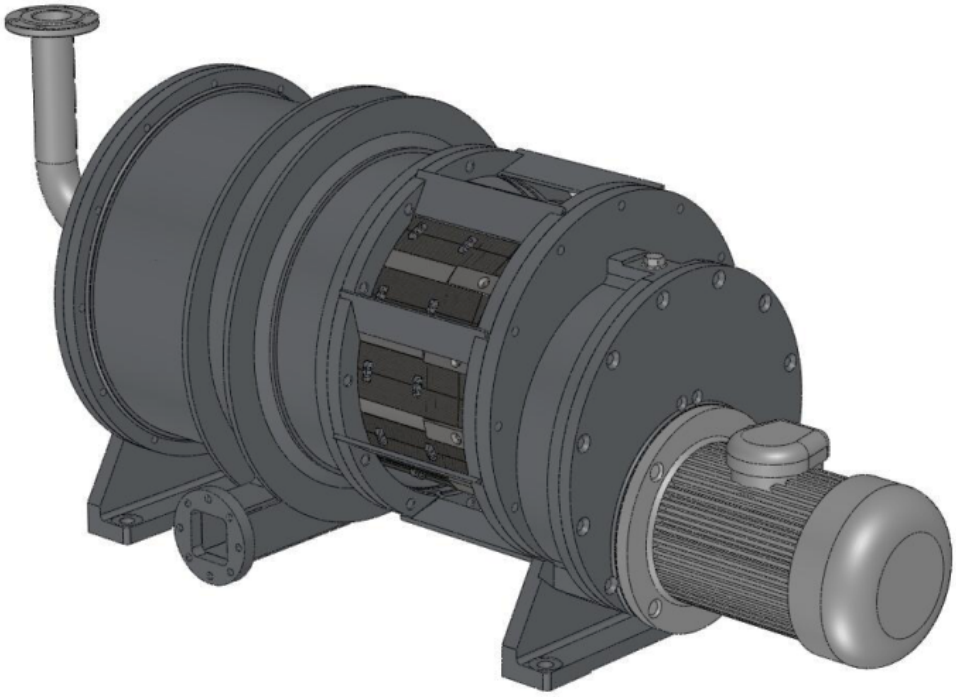
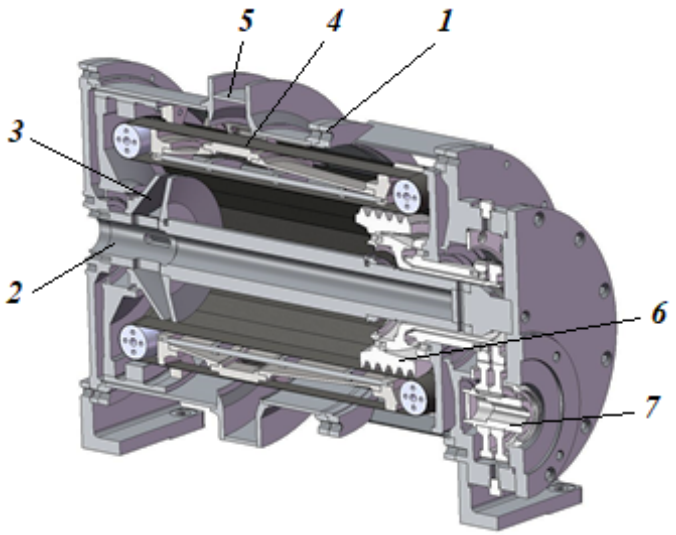
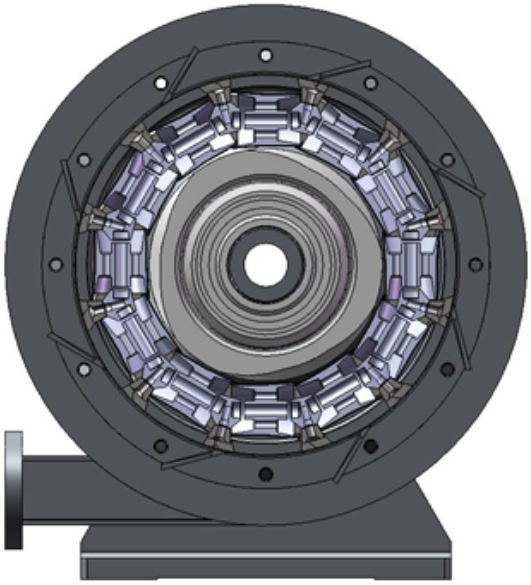


Рис. 1. Конструкция многозонной фильтрующей центрифуги

Фильтрующая центрифуга представляет собой массообменный центробежный аппарат, состоящий из корпуса 1, питающей трубы 2, загрузочного устройства 3, ленточных перфорированных транспортеров 4, разгрузочного устройства 5, приводного механизма транспортеров 6, приводного механизма ротора 7. Центрифуга может быть разделена по длине на требуемое число зон контакта фаз с дополнительными коаксиальными питающими трубами, загрузочными устройствами исходной суспензии, жидких промывных реагентов и, если необходимо, теплоносителя в соответствующую зону, разгрузочными устройствами жидких реагентов и теплоносителя из контактных зон, а также обезвоженной и обеззараженной твердой фазы. Жидкие компоненты циркулируют в замкнутом цикле. Осаждение твердой фазы и ее перемещение по длине установки из зоны в зону осуществляется непрерывной движущейся фильтрующей лентой транспортеров (рис.2, а и б). Транспортеры, размещенные по окружности, образуют ротор центрифуги в виде торовой фильтрующей поверхности без разрывов, а перемещение ленты обеспечивается взаимодействием упоров ленты с винтовой линией приводного механизма. Вращение ротору передается от электродвигателя через косозубую цилиндрическую передачу.



а



б

Рис. 2. Модуль фильтрующей центрифуги: а - продольный разрез;
б - поперечный разрез

Принцип работы фильтрующей центрифуги заключается в следующем. При вращающемся роторе по питающей трубе подается нефтезагрязненный грунт, промытый товарной нефтью или некондиционными углеводородами, который центробежными силами отбрасывается на внутреннюю поверхность движущейся фильтрующей ленты. Осадок тонким слоем распределяется на ленте, которая перемещается вдоль аппарата в следующую зону, а промывная жидкость отводится в разгрузочное устройство. В следующей зоне по питающей трубе подается метиленхлорид, в результате взаимодействия которого с тонкодисперсным осадком осуществляется окончательная промывка. Скорость движения фильтрующей ленты задает время пребывания слоя дисперсного осадка в зонах

контакта.

При перемещении промытого грунта на внешнюю поверхность транспортеров обеспечивается его выгрузка и очистка фильтрующей поверхности.

Литература:

1. Мухтаров Я.С. и др. Анализ источников образования нефтесодержащих отходов // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2012. Т.15. №17. С. 220-223.

2. Мухтаров Я.С. и др. Моделирование процесса обращения с нефтезагрязненными грунтами // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2012. Т.15. №11. С. 201-204.

3. А.с. 964391 СССР, МКИ F 26 B 17/18. Сушилка для суспензий / Ю.Г. Вавилов и др. (СССР). – № 2947394/24-06; заявл. 30.06.80, опубл. 07.10.82, Бюл. №37 – 4 с.

4. Каратаев О.Р. и др. Расчет параметров цепных передач в модуле АРМ TRANS // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2016. Т.19. №12. С. 140-142.

5. Лашков В.А. и др. Расчет прочности валов машин с помощью расчетно-графического модуля АРМ SHAFT // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2016. Т.19. №7. С. 94-96.

УДК 514.18:004.9(075)

ТЕХНОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ

Клочков И.А., Смирнова Л.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: klochkov.2003@mail.ru

Сегодня знания, умения и навыки владения 3D-технологиями автоматизированного проектирования и управления электронным документооборотом [1] выдвигаются в число основных компетенций инновационного инженерного образования. Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) или CAD-системы позволяют создавать электронные 3D-модели деталей, сборочных единиц и имеют все необходимые инструменты для получения конструкторских документов и прототипов изделий на основе этих моделей. Согласно концепции комплексной автоматизации жизненного цикла изделия, объемная геометрическая модель сборки является основой электронного описания изделия, которое непрерывно дополняется в процессе решения производственно–технологических задач [2].

При изучении общепрофессиональной дисциплины «Инженерная и компьютерная графика» одним из важных разделов является разработка конструкторской документации на сборочные узлы.

Под сборкой в САПР принято понимать электронную геометрическую модель изделия или сборочной единицы, состоящей из двух или более компонентов, собранных вместе соответственно их рабочему положению. Фактически, сборка представляет собой некоторую иерархическую структуру, на разных уровнях которой находятся компоненты – подсборки или детали. Компонентом сборки может быть твердотельная или листовая деталь, вставленная в сборку или созданная в контексте сборки, собственное тело или тела, принадлежащие документу сборки, трехмерный библиотечный элемент, деталь или поверхность, импортированные из другой системы трехмерного моделирования с помощью одного из обменных форматов, а также другая сборка. Компоненты сборки связаны с файлом сборки.

Процесс создания сборочной единицы состоит в последовательном добавлении в сборку созданных ранее и сохраненных компонентов. В настоящее время существует два способа проектирования электронных сборочных моделей:

– сборка «снизу вверх», когда в создаваемую модель вставляются ранее созданные компоненты. Вначале проектируются самые мелкие детали в иерархии сборки (нижний уровень), а затем состоящие из них сборочные единицы. Сборка «снизу вверх» осуществляется посредством привязки деталей друг к другу. До

последнего времени такой способ организации процесса проектирования сборок доминировал, что связано прежде всего с тем, что программные инструменты для этого были раньше реализованы в системах проектирования.

– сборка «сверху вниз» выполняется по принципу «от общего к частному» – вначале проектируется сборка в целом, наиболее важные компоненты (верхний уровень), а в дальнейшем состав сборки уточняется и определяется конструкция всех составных частей. детали. В этом случае ассоциативные связи между компонентами возникают непосредственно в процессе построения, а при редактировании одних компонентов другие перестраиваются автоматически. Такой порядок проектирования предпочтителен по сравнению с проектированием «снизу вверх». Он позволяет автоматически определять параметры и форму взаимосвязанных компонентов и создавать параметрические модели типовых изделий.

В большинстве случаев для разработки электронной модели сборочной единицы (ЭМСЕ) используется смешанный способ проектирования, при котором попеременно выполняется проектирование «сверху вниз» (нисходящее) и «снизу вверх» (восходящее).

В связи со спецификой решаемых задач моделирование сборочных единиц выполняется не обычными средствами геометрического моделирования, а специальным функционалом САПР, предназначенным для проектирования именно сборок. Средства моделирования сборок, реализованные в современных САПР, дают возможность в интерактивном режиме, с использованием наглядных динамических изображений всех компонент, проектировать и виртуально управлять последовательностью и параметрами процесса сборки изделия.

Составные части сборочной единицы должны быть сориентированы друг относительно друга, что означает их определенное положение и наличие определенных степеней свободы. Связь устанавливает зависимость между взаимным положением компонентов, например такие, как совпадение – два элемента различных компонентов занимают одно и то же положение; соосность – связь, означающая совпадение осей элементов вращения двух различных компонентов; зазор – связь при которой между элементами двух различных компонентов должно быть определенное расстояние; параллельность и перпендикулярность – связи, означающие, что два различных компонента сориентированы таким образом, что их элементы являются параллельными или перпендикулярными и др.. В сопряжении могут участвовать грани, ребра, вершины, графические объекты в эскизах, а также вспомогательные элементы разных компонентов. В сборке, составленной с использованием сопряжений, необходимо зафиксировать в пространстве хотя бы один компонент, с которым будут прямо или опосредованно сопрягаться остальные детали и узлы. Наложенные сопряжения можно классифицировать как параметрические связи ограничения, позволяющие автоматически

изменять пространственное положение деталей в сборке. В случае противоречия наложенных сопряжений выдается сообщение об ошибке.

Результатом моделирования сборочной единицы является ее электронная модель. Согласно ГОСТ 2.057–2014 ЭМСЕ должна давать представление о расположении и взаимной связи составных частей, соединяемых в сборочную единицу, и содержать необходимую и достаточную информацию для осуществления ее сборки и контроля. В ЭМСЕ не хранятся сведения о геометрии каждой составной части, а дается лишь указание (ссылка) на ее электронную модель.

Важным моментом при моделировании сборки является ее анализ с целью устранения возможных ошибок, допущенных при проектировании. Для этого в системах моделирования сборок предусмотрены различные средства анализа ЭМСЕ. Так, посредством анализа виртуальной модели сборки можно определить возможную «нестыковку» в размерах и форме деталей, проверить сопряжения и взаимопересечения деталей сборки, оптимизировать технологию сборки и конструкцию изделия, что позволит значительно сэкономить на стоимости изготовления физического прототипа. Самая эффектная функция, доступная пользователю в процессе моделирования сборки, когда модель изделия разъединяется на составные части – детали и узлы, входящие в сборку. Динамическое разнесение позволяет облегчить восприятие компьютерной сборки при просмотре 3D-модели, состоящей из собранных деталей и узлов. Разнесение удобно для пояснения принципа действия машин и анализа состава изделия.

Функция параметризации сборок реализованные в системах моделирования предоставляют возможность в интерактивном режиме не только задавать параметрические связи и ограничения, но и вводить проектные переменные и составлять для них практически неограниченный набор аналитических соотношений и формул. Ассоциативная связь между деталями приводит к тому, что при изменении одной детали остальные детали, связанные с ней, автоматически перемещаются или даже меняют свою геометрию. Например, если изменяется диаметр вала, то меняется и размер подшипника, который должен быть надет на этот вал. В состав подсистем геометрического моделирования лучших машиностроительных САПР обычно входит целый арсенал для создания параметризированных сборок.

Наличие полноценной объемной геометрической модели, созданной на начальных этапах проектирования (в CAD-системах), позволяет в дальнейшем имитировать функционирование (в CAE-системах) и технологию производства изделия (в CAM-системах), оперативно создавать технологическую (в CAPP-системах) и эксплуатационную документацию (ИЭТР).

В учебном процессе создаются, как правило, следующие конструкторские документы: сборочные чертежи, рабочие чертежи деталей и спецификация,

основным источником для которых являются электронные модели изделий. Для практической реализации этого раздела используются учебные задания проектной направленности. На основании технического задания (ТЗ) студенты, работая в команде, выполняют по альбомам сборочных чертежей предложенные проектно-направленные задания и учебные проекты. В CAD-системе, используя методы геометрического моделирования, создаются виртуальные 3D-модели деталей и сборочных единиц. Для создания моделей деталей и сборочной единицы применяются алгоритмы твердотельного моделирования. Создание сборочной единицы выполняется способами сборки, предусмотренными в системе. Как правило, реализуется комбинированный способ сборки – из отдельных деталей, и деталей, созданных в контексте самой сборки. При выполнении этих заданий студент может использовать библиотеки стандартных компонентов, справочную информацию электронных ресурсов. После формирования сборочной единицы студент выполняет анализ сборки – разнесение сборки, с целью определения нежелательных пересечений и касаний компонентов сборки, что позволяет на ранних этапах проектирования оперативно провести необходимые изменения. На основании полученных моделей создаются и оформляются в соответствии с ЕСКД или ISO ассоциативные чертежи (рис. 1).

Наиболее продвинутые студенты создают видеоролики с воспроизведением принципа действия проектируемого изделия.

Выполненная работа демонстрирует достигнутый уровень сформированности у студентов проектно-конструкторских компетенций как совокупности освоенных знаний, практических умений, уровня владения инструментарием CAD-систем и личностных качеств.

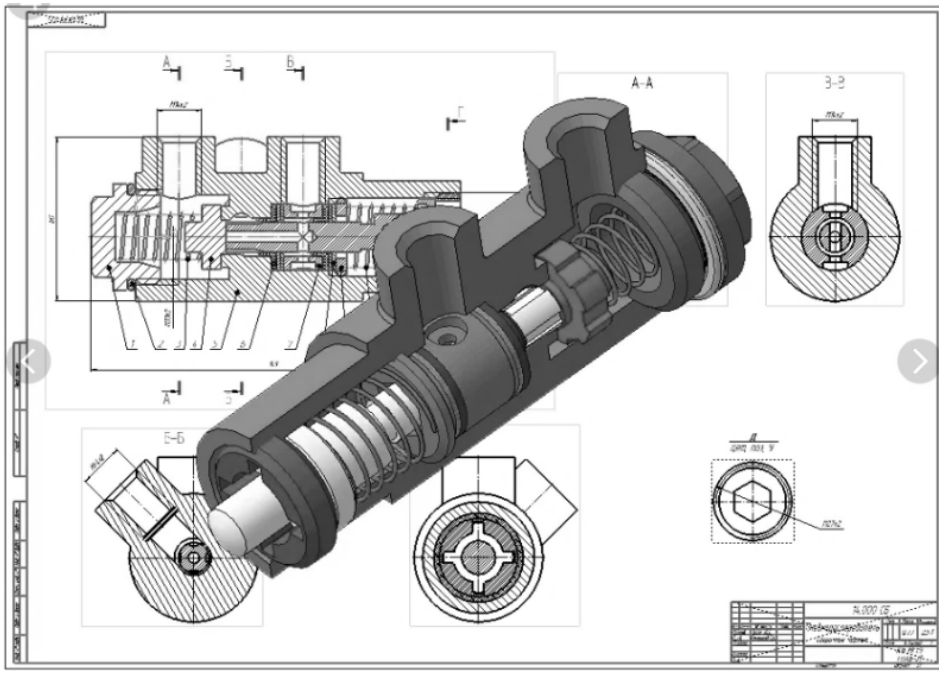


Рис. 1

Литература:

1. Государственный образовательный стандарт третьего поколения подготовки бакалавров по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» (уровень бакалавриата)» 2015 г.

2. А. И. Боровков Современное инженерное образование: учеб. пособие / А.И. Боровков [и др.]. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 80 с.3.

УДК 621.565

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ СНЕГООБРАЗНОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Коновальчук М.А., Долгов С.С.
Кемеровский государственный университет,
E-mail: misha_konovalchuk@mail.ru

Сухой лед – внешне похож на водяной лед, двуокись углерода в твердом состоянии (CO2), при стандартных условия (атмосферное давление и комнатной температуре), минует жидкую фазу переходя в углекислый газ.

Его физическая плотность в нормальном состоянии равна 1561 кг на кубический метр. Его температура сублимации равняется 78,5 градусов Цельсия, так же сухой лед в твердом состоянии имеет характерный белый цвет. Кристалическая форма диоксида углерода имеет практически правильный куб. При нормальных значениях температуры и давлении выше нормы диоксид углерода переходит в жидкость. Но при атмосферном давлении такой газ не имеет жидкого агрегатного состоянии, жидкое состояние он пропускает переходя из твердого вещества сразу в газообразное. [1]

Для производства такого вещества как сухой лед применяют углекислотные установки, так называемые «генераторы сухого льда». В таких генераторах сухой лед приобретает определенную форму. В конечном итоге получается палочкообразные гранулы, чем-то напоминающие детские мелки. При производстве сухого льда очень востребованы пеллетайзеры, в них попадают углекислоты в жидком виде, после определёнными порциями сухой лёд попадает в специальные камеры. В такой камере часть вещества преобразуется в газ, а то что осталось, начинает принимать кристаллическую форму. И получается так называемый углекислотный снег, который в последствии сжимают и пропускают через экструзионную матрицу. А на выходе мы и получаем так называемые палочкообразные гранулы. [2]

Если затрагивать техническую часть такого производства, то оно не является высоко сложным. Но при таком производстве испарение диоксида углерода может доходить до 50% от всего изначального значения, а это значит, что половина сырья просто теряется. Чтобы избежать этого применятся система рекуперации. За счет данной системы КПД такого производства значительно увеличивается и следовательно себестоимость продукта снижается. Форма гранул в таком производстве нужна для того, чтобы облегчить применение сухого льда в различных отраслях, таких как: сфера общественного питания, грузоперевозки или сельская промышленность. [3]

Сухой лед для охлаждения пользуется большой популярностью, потому что затраты на его хранение оборудование в несколько раз ниже, чем у других способов охлаждения чего-либо. Поэтому невысокая цена и эффективность можно сказать синонимы сухого льда.

С целью изучения процесса получения снегообразного диоксида углерода и исследования его структуры были проведены исследования.

Снегообразный диоксид углерода получали, используя «Пеллетайзер А120Р» внешний вид которого представлен на рисунке 1.



Рис. 1 – Внешний вид пеллетайзера А120Р

Представленный пеллетайзер полностью автоматизирован, поэтому для производства сухого льда при помощи данного аппарата было очень удобным. Данным пеллетайзер был изготовлен для производства гранул, чтобы использовать их для отчистки поверхностей под давлением. Данный аппарат имеет производительность 120 кг в час, чего вполне достаточно для выполнения отчистки. Такой пеллетайзер весит 360 кг, поэтому он не очень мобилен. Конечную форму гранул можно задавать в зависимости от задачи, значение варьируется от 1,7 мм до 16 мм. Размеры данного пеллетайзера 1320х700х1439 мм. [4]

Подключенная к пеллетайзеру герметичная камера позволяет наблюдать границы раздела фаз, отслеживать состояние фазовых переходов, при воздействии на полученный CO_2 различных температур. Манометр дает возможность наблюдать за разницей теоретического давления и практического, что позволяет с высокой точностью осуществлять построение цикла процесса на диаграмме давление-температура. В данной камере можно производить исследование углекислоты при достижении тройной точки, а также процесс кристаллизации, путем влияния на диоксид углерода внешних факторов при температуре -75°С. На рисунке 2 представлен получаемый в установке снегообразный диоксид углерода.



Рис. 2 – Снегообразный диоксид углерода

Согласно диаграмме углекислого газа в координатах давление-температура, понижая температуру, состояние газа изменяется по линии раздела жидкой и паровой фазы, при достижении -50°С и давления около 5 бар происходит интенсивное кипение и замораживание CO_2. При влиянии более низких температур таких как −75°С, начинается уже полная кристализация уже сжиженного газа, визуально похож на обычный водный лед.

Литература:

1. The design of the device for the solid carbon dioxide production Neverov E.N., Korotkiy I.A., Rasshchepkin A.N., Ibragimov M.I., Grinyuk A.N. В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Сер. "International Conference on Production and Processing of Agricultural Raw Materials - Equipment and Facilites of Agricultural Processing" 2021. С. 072022.
2. Studying the sublimation of carbon dioxide Neverov E.N., Korotkiy I.A., Korotkaya E.V., Rasshchepkin A.N. Periodico Tche Quimica. 2021. Т. 18. № 37. С. 1-12.
3. Исследование параметров процесса теплообмена при сублимации диоксида углерода Неверов Е.Н., Короткий И.А., Плотников И.Б., Коротких П.С., Кожаев А.А. Вестник КрасГАУ. 2020. № 6 (159). С. 215-222.
4. Официальный производитель в РФ [Электронный ресурс]. Режим доступа - https://www.acdco2.ru/ - Дата обращения: 25.03.2022.

УДК 536.24

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ В ТРУБАХ

Косов В.А., Печенегов Ю.Я.
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
E-mail: Vitya.Kosov.03@bk.ru

К числу наиболее технологичных и простых в реализации способов интенсификации теплообмена в трубчатых теплообменных аппаратах относится закручивание потока теплоносителя с помощью вставляемых в трубы скрученных лент и проволочных спиралей (рис. 1). Имеющиеся в литературе данные показывают, что наибольшая эффективность интенсификации теплообмена в трубах с закручивающими вставками достигается при течении теплоносителей в интервале изменения чисел Рейнольдса $Re = 2 \cdot 10^3 \ldots 10^4$.

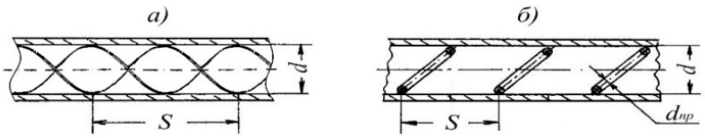


Рис. 1. Трубы со скрученной лентой (*а*) и проволочной спиралью (*б*)

В настоящей работе приведены результаты выполненного нами сравнительного анализа теплогидравлической эффективности теплообмена в трубах со вставленными проволочными спиралями и скрученными лентами. В качестве характеристики теплогидравлической эффективности теплообмена использован фактор аналогии Рейнольдса [1]

$$\eta = \left. \frac{\alpha/\alpha_o}{\xi/\xi_o} \right|_{Re=idem}, \qquad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; ξ - коэффициент гидравлического сопротивления; индекс «о» показывает, что параметр для гладкой трубы, без вставок.

Для области ламинарного режима движения с макровихрями ($Re \le 1{,}5 \cdot 10^4$) фактор аналогии Рейнольдса закрученных потоков описывается единой для всех закручивателей зависимостью [1]

$$\eta = \left(\xi/\xi_o\right)^{-0{,}36}, \qquad (2)$$

которая позволяет по данным о гидравлическом сопротивлении оценить теплогидравлическую эффективность интенсификации теплообмена тем или иным способом.

Для труб с вставленными проволочными спиралями в [2] получено эмпирическое уравнение

$$\xi = \frac{530}{\mathrm{Re}^{0,36}}\left(\frac{d_{\text{пр}}}{d}\right)^{1,4} \exp\left[-\left(\frac{s}{d}\right)^{0,65}\right], \qquad (3)$$

обобщающее опытные данные в интервалах изменения s/d = 0,71…4,1 и $d_{\text{пр}}/d$ = 0,05…0,171. В уравнении (3) число Рейнольдса Re = wd/ν определено по среднерасходной скорости w потока, отнесенной к площади диаметрального сечения трубы диаметром d; ν - кинематический коэффициент вязкости теплоносителя при средней его температуре; $d_{\text{пр}}$ и s - соответственно диаметр проволоки и шаг спирали (см. рис.1, *а, б*).

Используя уравнение (3), закон Блазиуса для гладкой трубы

$$\xi_{\circ} = 0{,}3164\mathrm{Re}^{-0,25} \qquad (4)$$

и зависимость (2), для фактора аналогии Рейнольдса потоков, закрученных с помощью проволочной спирали, получим

$$\eta = 0{,}069\mathrm{Re}^{0,04}\left(\frac{d_{\text{пр}}}{d}\right)^{-0,5} \exp\left[0{,}36\left(\frac{s}{d}\right)^{0,65}\right]. \qquad (5)$$

Результаты расчётов по уравнению (5) приведены на рис.2. Видно, что влияние числа Рейнольдса на η в области ламинарного течения теплоносителя с макровихрями мало. С ростом относительного шага проволочной спирали s/d параметр η увеличивается, а с ростом $d_{\text{пр}}/d$, наоборот, уменьшается.

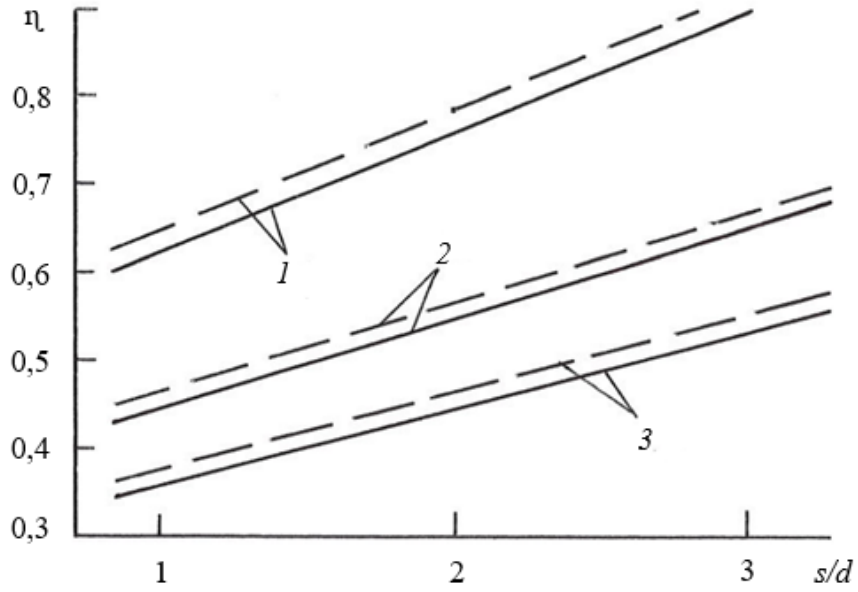


Рис. 2. Зависимость η от s/d в трубах с проволочными вставками:
——— - Re = $5\cdot10^3$;– – – - Re = 10^4; 1 - $d_{\text{пр}}/d$ = 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,15

Для коэффициента гидравлического сопротивления закрученных потоков в трубах с вставленными скрученными лентами в [3] на основании выполненных экспериментов и обобщения данных других авторов получено универсальное уравнение

$$\xi = 0{,}82\mathrm{Re}_э^{-0{,}35}\left[1{,}05 - 7{,}5\frac{d}{s} + 110\left(\frac{d}{s}\right)^2\right], \qquad (6)$$

справедливое в интервалах изменения $\mathrm{Re}_э = 5\cdot10^3\ldots1{,}5\cdot10^4$ и $s/d = 5\ldots\infty$ (шаг s соответствует повороту ленты на 360°; см. рис. 1, а).

Число $\mathrm{Re}_э$ в формуле (6) определено по эквивалентному диаметру канала, образуемого лентой толщиной δ и полуокружностью стенки трубы,

$$d_э = d(\pi d - 4\delta)/[\pi d + 2(d - \delta)], \qquad (7)$$

и по среднерасходной скорости w потока, отнесенной к площади поперечного сечения трубы. Обычно $\delta \ll d$ и в формуле (7) можно принять $\delta \cong 0$.

Переходя от $\mathrm{Re}_э$ в уравнении (6) к Re с учетом связи между $d_э$ и d по выражению (7), где принято $\delta = 0$, при совместном рассмотрении зависимостей (6), (4) и (2), для фактора аналогии Рейнольдса потоков закрученных с помощью скрученной ленты получим

$$\eta = 0{,}667\mathrm{Re}^{0{,}036}\left[1{,}05 - \frac{7{,}5d}{s} + 110\left(\frac{d}{s}\right)^2\right]^{-0{,}36}. \qquad (8)$$

Результаты расчётов по уравнению (8) приведены на рис.3. Видно, что, как и в случае со вставленной в трубу проволочной спиралью, влияние числа Re на η слабое. С ростом шага скрутки ленты величина η увеличивается и особенно сильно в области $s/d = 5\ldots20$.

Сравнение графиков на рис.2 и 3 позволяет сделать следующие выводы. Теплогидравлическая эффективность интенсифицированного теплообмена потоков в трубах со вставленными проволочными спиралями и скрученными лентами при рассмотренных диапазонах изменения их геометрических параметров (относительные диаметры проволоки и шага скрутки спиралей и лент) примерно одинаковая.

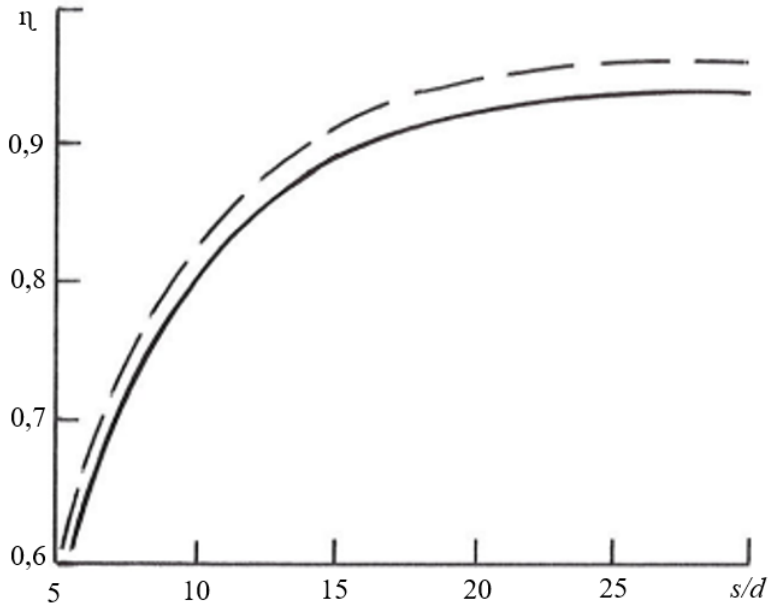


Рис. 3. Зависимость η от s/d в трубах со скрученными лентами: ——— - Re = $5\cdot10^3$; – – - - Re = 10^4

Выбор того или иного способа закручивания потока теплоносителя с целью интенсификации теплообмена будет зависеть от конкретных условий его применения и технологичности реализации.

Литература:

1. Печенегов Ю.Я. Теплогидравлическая и экономическая эффективность интенсификации теплообмена путем закрутки потока в трубах // Промышленная энергетика, 2017, №6. С. 18-22.

2. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.

3. Печенегов Ю.Я. Гидравлическое сопротивление потоков в трубах с вставленными прямой и скрученной лентами // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020, №8. С. 7-10.

УДК 66.081.6

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРВАПОРАЦИОННОГО МЕМБРАННОГО МОДУЛЯ

Латыпов Д.Р., Фазлыев А.Р., Клинов А.В., Малыгин А.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: slam-74@mail.ru

Разделение многокомпонентных смесей один из самых распространенных процессов в химической и нефтехимической промышленностях. Существует множество процессов разделения позволяющих разделить смеси на отдельные компоненты. Одним из таких процессов разделения смесей является мембранное разделение, а именно, процесс первапорации.

Первапорация - мембранный процесс разделения гомогенных жидких смесей непористой мембраной, с одной стороны которой жидкая смесь взаимодействует с селективной поверхностью мембраны с одновременным созданием паровой фазы с другой. Движущей силой процесса первапорации является разность химических потенциалов. Компонент жидкой смеси, имеющий сродство с материалом селективного слоя мембраны, удаляется путём избирательного растворения с противоположной стороны в виде паровой фазы. Концентрированная исходная смесь называется ретентатом, а пары, прошедшие через мембрану пермеатом. Целевым может быть, как ретентат, так и пермеат.

Одним из основных компонентов первапорационной установки является мембранный модуль от конструкции, которого зависит эффективное перемещение разделяемой жидкости для предотвращения концентрационной поляризации возникающий у поверхности селективного слоя мембраны, способная снизить эффективность разделения. В связи с этим нахождение гидродинамических характеристик потока жидкости в них является основной задачей.

В работе было исследовано поведение потока жидкости (сырья), значения средней скорости и давления внутри мембранного модуля экспериментальной первапорационной установки и его модернизированной версии, предложенной в целях улучшения показателей потока. Подробное описание и схема экспериментальной установки описано в предыдущей работе [1].

При помощи программы Ansys Fluent определялось значений поля скорости у поверхности мембраны при разных расходах (82,5 кг/ч и 165 кг/ч – расход сырья в экспериментальной установке) без учёта мембранного разделения, т.е. переход жидкости через мембрану; получение значений перепада давлений; определение застойных зон, если таковы имеются; выявление недостатков конструкции.

На рис.1 представлен мембранный модуль, состоящий из крышки 1 и корпуса 2, в которой происходит процесс первапорационного разделения. Между крышкой и корпусом располагается полимерная мембрана 3, которая фиксируется герметично и неподвижно. На крышке имеются патрубки 4 и 5 для подвода и отвода сырья и отверстия для крепёжных изделий. Вовнутрь корпуса со стороны крышки вставляются опорные элементы 6, которые придают механическую прочность полимерной мембране.

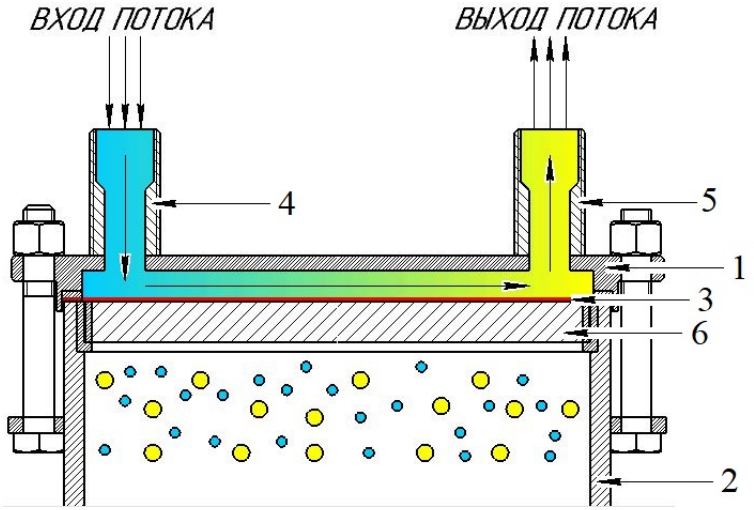


Рис. 1. Мембранный модуль экспериментальной первапорационной установки

Поток сырья (обозначено синим цветом) поступает по входному патрубку крышки, направленному перпендикулярно к поверхности мембраны (обозначено красной линией). Затем поток движется параллельно к поверхности мембраны. Контактируя с селективным слоем мембраны, и выходит из мембранного модуля через выходной патрубок. Внутри корпуса мембранного модуля образуются пары, прошедшие через мембрану.

На рис.2. представлен эскиз модернизированной крышки мембранного модуля со спиральными направляющими с шагом 5.5 мм. Поток сырья поступает в периферию крышки и далее движется по спирали к центру, откуда выходит (выход потока в центре крышки модуля). Расстояние от поверхности мембраны до внешней поверхности спирали равно 2 мм. На входе имеется пластина, направляющий поток по спирали параллельно к мембране. Без нее большая часть потока устремится к выходу через зазор, нарушив спиральное движение.

Для расчёта действующей крышки (ДК) в программе Ansys Fluent геометрия потока была упрощена, изменены потоки во входе и на выходе. Вход сделан в виде круглого отверстия с глубиной 1 мм, а выход в виде цилиндра с высотой 1 мм. В гидродинамическом расчёте модернизированной крышки (МК) пластина направляющая поток по спирали отсутствует в целях упрощения. Также была упрощена модель потока, изменены потоки во входе и выходе. Вход сделан в виде патрубка, входящей перпендикулярно к пластине, выход в виде патрубка с

высотой 1 мм. Для расчета была выбрана модель турбулентности Standart k-omega, предназначеная для моделирования турбулентных потоков. Указывается свойства водно-этиловой смеси с содержанием 85%-ого этанола при 40 ^{0}C. Диапазон скорости выбран от 0 м/с до 1 м/с.

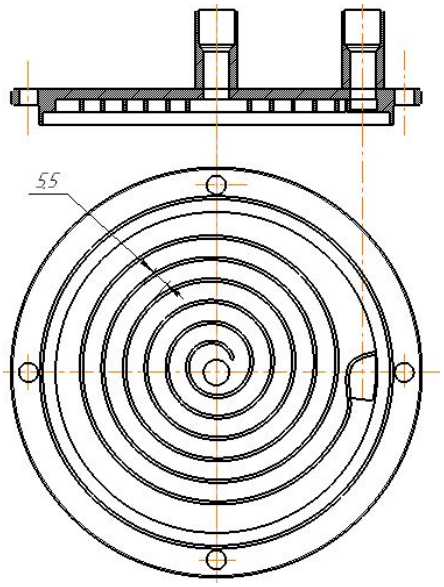


Рис.2. Эскиз крышки мембранного модуля в модернизированном исполнении со спиральными направляющими с шагом 5.5 мм.

На рис.3 представлены данные контуров скорости для ДК мембранного модуля при разных расходах сырья вблизи (0.1 мм) мембраны из них следует, что максимальная скорость в модуле экспериментальной установки вблизи мембраны достигается в зоне входа, и эта область расширяется с увеличением расхода. При расходе 82.5 кг/ч поле скорости наблюдается только в зоне входа, в остальных же областях мембраны скорость равна нулю. При 165 кг/ч (расход сырья в экспериментальной установке) поле скорости во входе расширяется и образуется поле скорости у стенок и на выходе. В боковых же частях присутствуют зоны нулевой скорости. Таким образом, на поверхности мембраны, судя по контурам скорости вблизи мембраны, образуется большая область низкой скорости. Эта область сужается с увеличением расхода сырья, однако не исчезает вовсе.

На рис.4 представлены данные контуров скорости для МК мембранного модуля при разных расходах сырья вблизи (0.1 мм) мембраны из них следует, что при расходе сырья 82.5 кг/ч выделяются зоны скорости у стенок и в центре модуля. При 165 кг/ч эта зона расширяется, а также происходит равномерное распределение скорости потока по поверхности мембраны. Максимальные скорости движения потока возникают у стенок, и по мере движения по спирали скорость снижается и ближе к центру вновь повышается. Мембранный модуль показал положительные результаты скорости и давления.

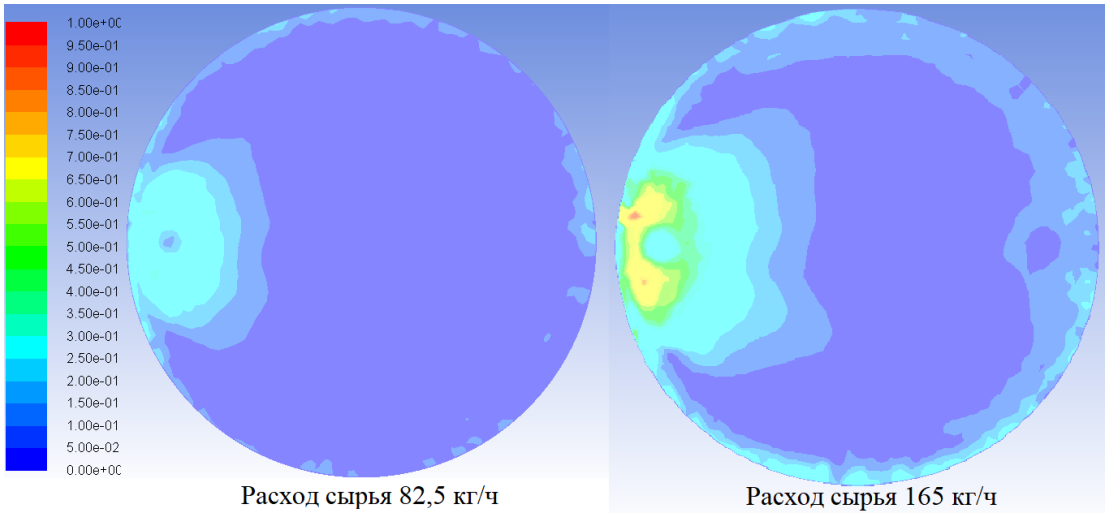
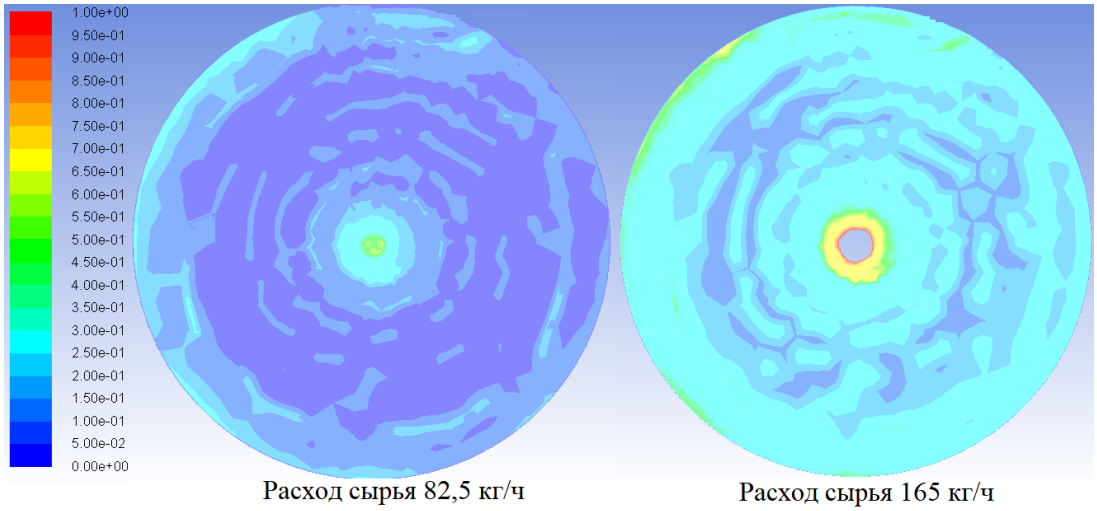


Рис.3. Данные контуров скорости при разных расходах сырья вблизи (0.1 мм)



мембраны для ДК мембранного модуля.

Рис.4. Данные контуров скорости при разных расходах сырья вблизи (0.1 мм) мембраны для МК мембранного модуля.

В таблице 1 представлена информация о значениях средней скорости, а также давления на входе и выходе для ДК и МК мембранного модуля.

Вид крышки	**Расход сырья 82,5 кг/ч**		**Расход сырья 165 кг/ч**	
	Ср. скорость потока, м/с	Перепад давления, Па	Ср. скорость потока, м/с	Перепад давления, Па
Действующая	0,0137	274	0,0276	1078
Модернизированная	0,0693	476	0,230	2154

Из таблицы 1 следует, что скорость у поверхности мембраны МК мембранного модуля выше в 8 раз, в сравнении с ДК. Также спиральный элемент равномерно распределяет поле скорости по всей площади поверхности мембраны в сравнении с ДК мембранного модуля.

Были исследованы гидродинамические характеристики потока сырья над поверхностью мембраны внутри ДК и МК мембранного модуля экспериментальной первапорационной установки. Выявлен недостаток ДК мембранного модуля, заключающийся в присутствии больших зон с нулевой скоростью вблизи у поверхности мембраны, а также большие завихрения потока в боковых частях крышки. Благодаря использованию МК мембранного модуля скорость потока сырья у поверхности мембраны увеличена в 8 раз, что позволяет уменьшить влияние на процесс мембранного разделения внешнего массобмена, связанного с концентрационной поляризацией вблизи поверхности мембраны.

Литература:

1. Klinov A. V., Akberov R. R., Fazlyev A. R., Farakhov M. I.; Experimental investigation and modeling through using the solution-diffusion concept of pervaporation dehydration of ethanol and isopropanol by ceramic membranes HybSi: Journal of Membrane Science 524, 2017, p. 321-333.

УДК 66.081.6

ОБЕЗВОЖИВАНИЕ ИЗОПРОПАНОЛА С ПОМОЩЬЮ ПОЛИМЕРНЫХ ПЕРВАПОРАЦИОННЫХ МЕМБРАН

Латыпов Д.Р., Фазлыев А.Р., Клинов А.В., Давлетбаева И.М., Сазонов О.О.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: slam-74@mail.ru

Изопропиловый спирт (ИПС) имеет широкую область применения благодаря своим уникальным свойствам, одним из них является возможность смешиваться с водой и органическими растворителями во всех соотношениях. Применяют ИПС для производства ацетона, эфиров и других органических продуктов, как растворитель в лакокрасочной, парфюмерно-косметической и фармацевтической промышленности, как экстрагент масел, природных смол, натуральных латексов, антиобледенитель и антифриз [1]. Широкий спектр применения и увеличение объемов производства стимулируют к модернизации уже существующих методов очистки и регенерации ИПС, а также к разработке новых процессов. Основной проблемой при выделении ИПС из смеси изопропанол-вода является образование азеотропной смеси, состоящей из 87,4 мас.% ИПС и 12,6 мас.% воды.

Разделение азеотропных, близкокипящих и термонестабильных смесей требует применения энергоемких процессов таких как: экстрактивная, азеотропная и вакуумная ректификации. Процессы мембранного разделения предлагают более экономичные альтернативы традиционным энергоемким процессам разделения.

Первапорация — это один из процессов мембранного разделения, в котором жидкость при атмосферном давлении контактирует с поверхностью мембраны, компоненты смеси в определенном соотношении сорбируются на ней, проходят через мембрану, а на противоположной стороне мембраны пермеат удаляется в виде паров с низким парциальным давлением. Схематично процесс разделения изображен на рис.1.

Основными сепарационными характеристиками процесса являются поток через мембрану и коэффициент разделения. Данные характеристики зависят от свойств мембраны, которые изготавливаются из полимеров имеющих сродство с одним из компонентов разделяемой смеси. Первапорационные мембраны разработаны из нескольких сотен видов полимерных материалов [2]. Для улучшения свойств мембраны проводятся эксперименты по улучшению её характеристик путем прививки гидрофильных частиц на подложку, синтезу новых гидрофильных полимеров, смешивания и сшивки полимеров.

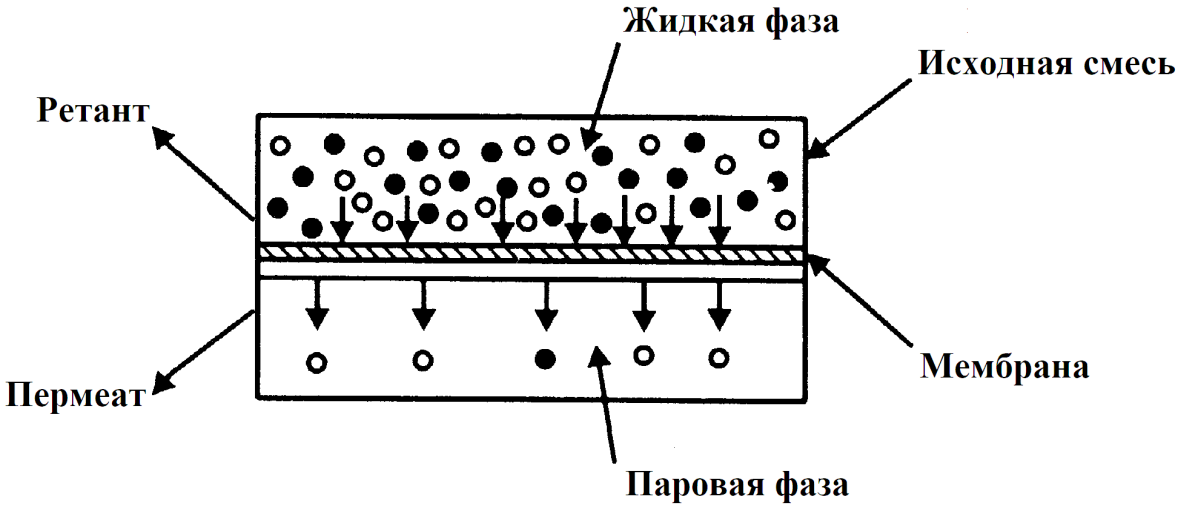


Рис.1. Процесс мембранного разделения

В качестве первапорационных мембран для разделения смеси ИПС/вода применялись мембраны полученные с помощью полиуретановых фосфорорганических иономеров на основе аминоэфиров орто-фосфорной кислоты (АЭФК) с использованием полиэтиленгликоля (ПЭГ). Для оценки сепарационных характеристик были изготовлены 4 мембраны с различным содержанием молей ортофосфорной кислоты (ОФК) 3, 4, 5, 6. Выбор данного материала в качестве мембраны связан с тем, что полиуретан обладает химической стойкостью, хорошими механическими свойствами и возможностью модификации структуры полимера.

Экспериментальные исследования проводились для смеси ИПС/вода при концентрации 85 мас.% ИПС и 15 мас.% воды в модельной смеси, при температуре 40 °С/ 60 °С и глубине вакуума 20 мм ртутного столба. Модельную смесь ИПС/вода готовили из деминерализованной воды (удельная электропроводность 5 мкСм/см), полученной на установке Osmodemi 12 (ERREDUE SPA, Ливорно, Италия), и обезвоженного ИПС с содержанием основного компонента 99,8 мас.%. Схема экспериментальной установки первапорации, используемой для изучения разделительных характеристик полимерных мембран, показана на рис. 2 .

Подробное описание экспериментальной установки и методы исследования описаны в предыдущих работах [3]. Тем не менее имеются 3 основных отличия. Во-первых, в отказе от использования конденсатора, это необходимо чтобы исключить потери пермеата на его стенках, так как площадь поверхности используемых мембран 200 см^2 и за время эксперимента в среднем выделяется 3 грамма пермеата. Во-вторых, в схеме применяется баллон с азотом для выравнивания давления и предотвращения конденсации влаги из воздуха в ловушку 5, после окончания экспериментального исследования. В-третьих, холодная проточная ловушка 4 используется в качестве предпусковой, она задействуется для вывода установки на заданный режим и предварительной осушки пермеатной линии, в

холодной проточной ловушке 5 происходит сбор пермеата при заданных условиях.

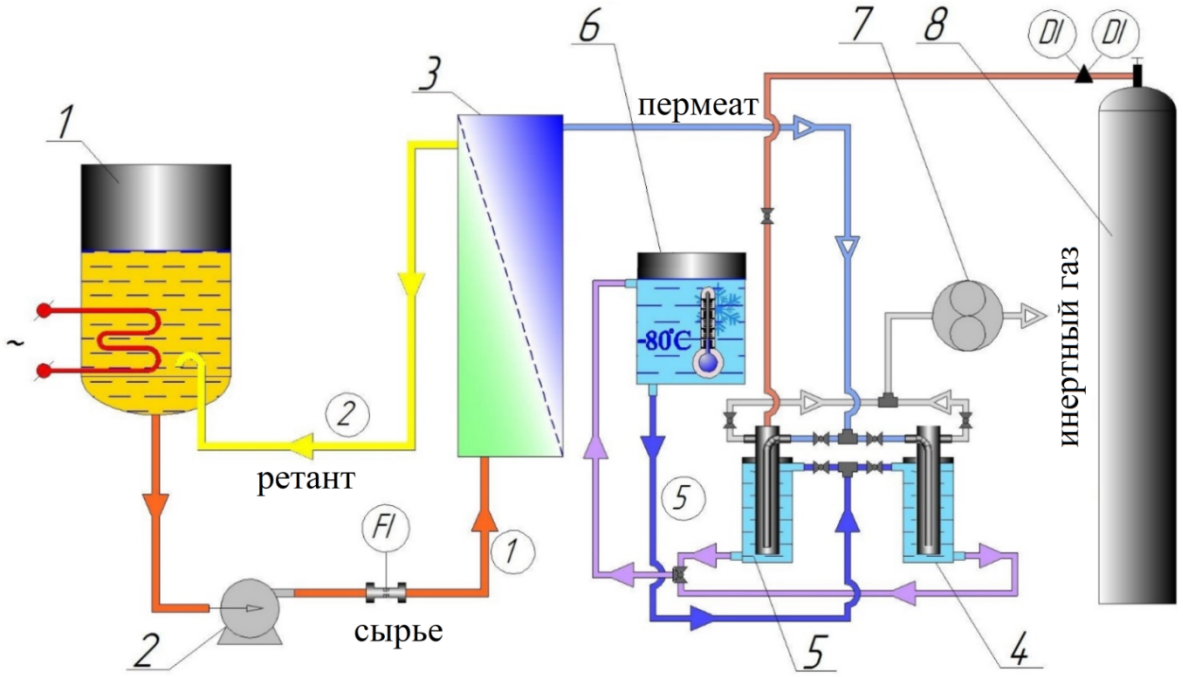


Рис.2. Схема экспериментальной первапорационной установки:
1 — сырьевая емкость; 2—питательный насос; 3 — ячейка для мембран;
4, 5 – холодные проточные ловушки; 6 — криостат; 7 — вакуумный насос;
8—баллон с инертным газом.

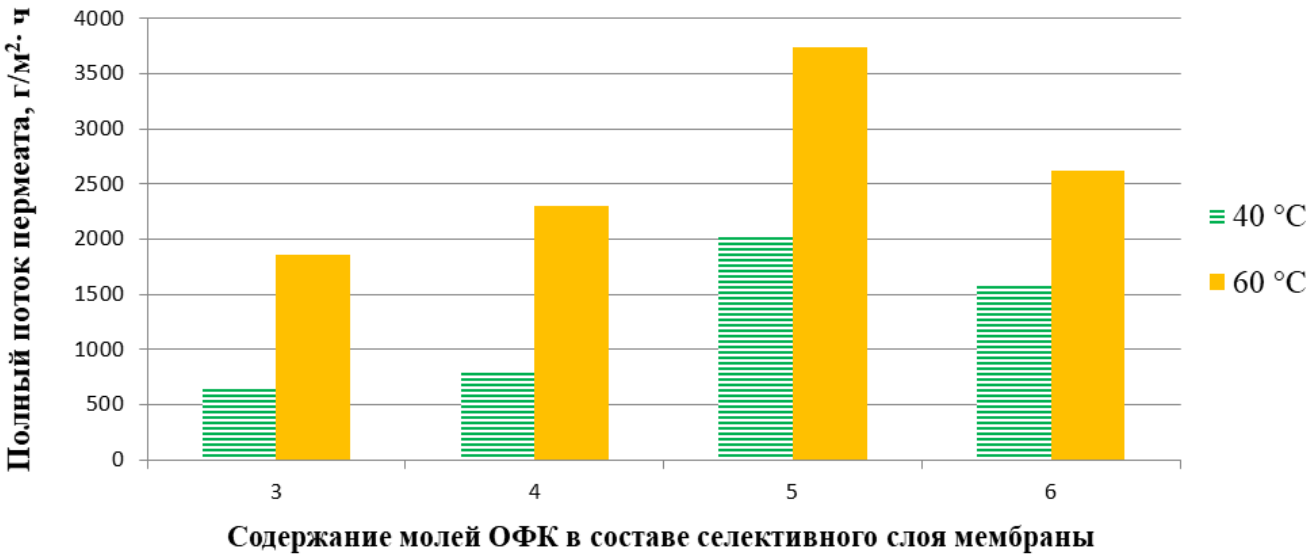


Рис.4. Зависимость полного потока пермеата от содержания молей ОФК в составе селективного слоя мембраны при температурах 40 (горизонтальная штриховка зеленого цвета) и 60 ^{0}C (заливка оранжевого цвета) и давлении со стороны пермеата 20 мм рт.ст.

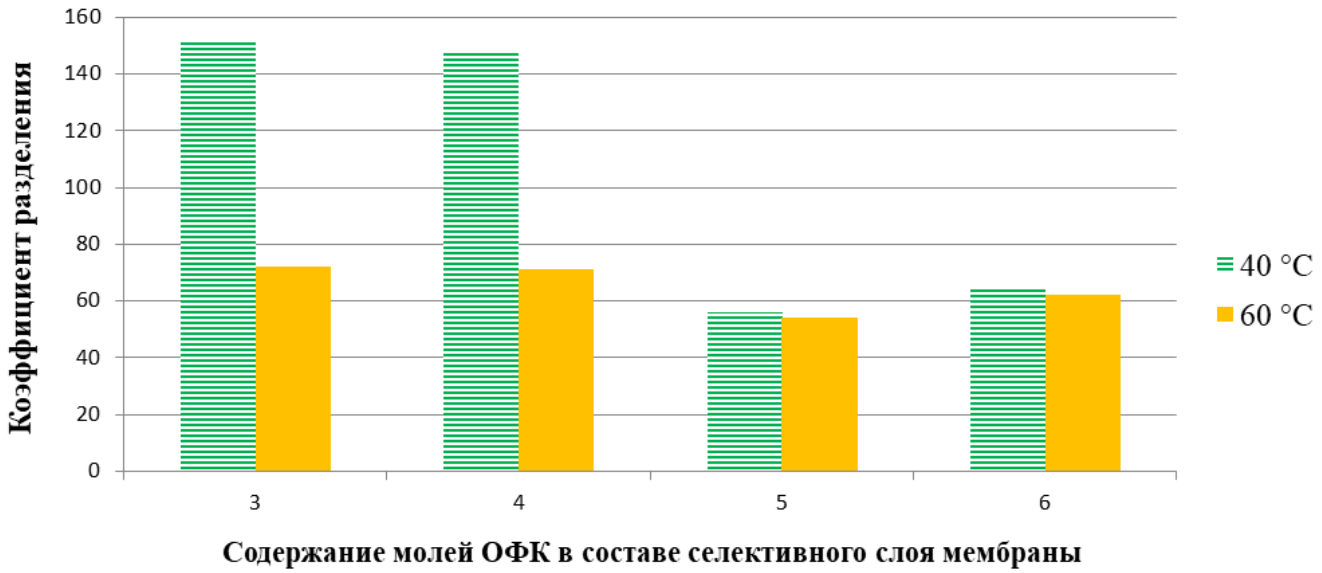


Рис.5. Зависимость коэффициента разделения от содержания молей ОФК в составе селективного слоя мембраны при температурах 40 (горизонтальная штриховка зеленого цвета) и 60 ^{0}C (заливка оранжевого цвета) и давлении со стороны пермеата 20 мм рт.ст.

На рис.4 и 5 представлены результаты экспериментального исследования зависимости полного потока пермеата и коэффициента разделения от содержания молей ОФК в составе селективного слоя мембраны при температурах 40, 60 ^{0}C и давлении со стороны пермеата 20 мм рт.ст.

Из рис. 4 видно, что полный поток пермеата имеет максимум со значением 3734 г/м^2·ч при 5 молях ОФК. Полный поток пермеата увеличивается с увеличением температуры процесса.

Из рис. 5 видно, что при увеличении температуры процесса до 60 ^{0}C и количества молей ОФК в составе селективного слоя мембраны коэффициент разделения изменяется не значительно от 54 до 72. Максимальные значения коэффициента разделения составляют 151 при 3 молях ОФК и температуре процесса 40 ^{0}C.

Из сопоставления полученных в данной работе результатов можно сделать вывод, наибольший поток пермеата показала мембрана с содержанием 5 молей ОФК и составила 3734 г/м^2·ч при температуре 60 ^{0}C и коэффициенте разделения 54. Наибольший коэффициент разделения показала мембрана с содержанием 3 молей ОФК и составила 151 при температуре 40 ^{0}C и полном потоке пермеата 653 г/м^2·ч. Из результатов экспериментальных исследований по обезвоживанию ИПС с помощью мембран на основе АЭФК с использованием ПЭГ видна зависимость полного потока пермеата и коэффициента разделения, при увеличении потока уменьшается коэффициент разделения и наоборот, в связи с этим необходимо определять оптимальные параметры для конкретных задач.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект 19-19-00136.

Литература:

1. Полякова З. П. Химическая промышленность за рубежом. М: 1980. с. 54-68.

2. Castro-Muñoz R.; Galiano F.; Fíla V.; Drioli E.; Figoli A. Mixed matrix membranes (MMMs) for ethanol purification through pervaporation: Current state of the art. Chem. Eng. 2018, 35, p. 565–590.

3. Klinov A. V., Akberov R. R., Fazlyev A. R., Farakhov M. I.; Experimental investigation and modeling through using the solution-diffusion concept of pervaporation dehydration of ethanol and isopropanol by ceramic membranes HybSi: Journal of Membrane Science 524, 2017, p. 321-333.

УДК 66.045.53

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ВОДЫ В ГИБРИДНОЙ ГРАДИРНЕ

Маясова А.О., Харьков В.В., Мадышев И.Н.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: v.v.kharkov@gmail.com

Градирни – устройства, обычно используемые для отвода тепла в промышленных и энергетических установках, системах когенерации, кондиционировании воздуха (охладители) и т. д. Охлаждение циркуляционной воды в градирнях являются наилучшим решением для промышленных предприятий из-за требуемых гораздо меньших расходов воды, а также минимизации загрязнения естественных источников воды. Поэтому разработка новых градирен является актуальной задачей. К перспективным типам градирен относится устройство с гибридной системой охлаждения жидкости, что позволяет бороться с недостатками традиционных градирен.

Авторами разработана гибридная градирня (рис. 1), где в качестве контактных элементов использованы наклонно-гофрированные металлические пластины с отверстиями для прохода фаз, поперек которых установлен трубчатый радиатор для течения теплоносителя. Конструкция и принцип работы градирни более подробно описан в работах [1–2]. Целью исследования является экспериментальное определение эффективности охлаждения разработанной гибридной градирни с наклонно-гофрированным блоком оросителя в зависимости от соотношения массовых расходов жидкой и газовой фаз при различных плотностях орошения.

Одним из критериев оценки эффективности протекания процессов тепло- и массообмена в градирне является тепловой КПД, характеризующий совершенство используемых оросителей. Так, тепловую эффективность η_L гибридной градирни можно оценить по изменению разности температур основного потока жидкости согласно уравнению:

$$\eta_L = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_p}, \quad (1)$$

где T_1, T_2 – температура воды на входе и выходе из трубчатого радиатора, соответственно, °С; T_p – равновесная температура воды, т. е. температура точки росы (теоретический предел охлаждения жидкости), °С.

Результаты обработки экспериментальных данных показывают, что эффективность охлаждения оборотной воды в гибридной градирне существенно зависит от плотности орошения охлаждающей жидкости и расхода основного потока

воды в трубчатом радиаторе. Так, например, во всех исследуемых соотношениях расходов установлено, что с увеличением плотности орошения охлаждающей жидкости эффективность процессов тепло- и массообмена в гибридной градирне возрастает. При этом тепловой КПД в разработанной конструкции блока оросителя при плотности орошения равной 34,2 $м^3/(м^2 \cdot ч)$ и массовом расходе воды в трубах 0,00643 кг/с может достигать 43,1% (рис. 2).

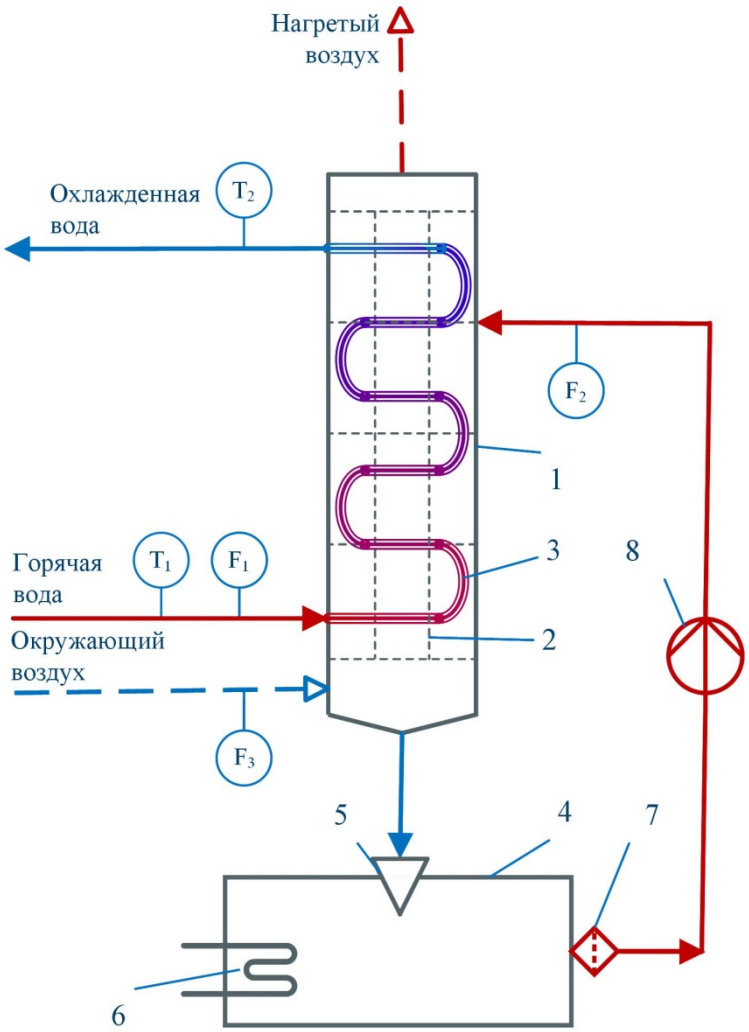


Рис. 1. Схема установки:1 – корпус градирни; 2 – ороситель (наклонно-гофрированные контактные элементы показаны условно); 3 – трубчатый радиатор; 4 – водосборная емкость; 5 – воронка; 6 – нагревательный элемент; 7 – жидкостной фильтр; 8 – насос циркуляционный

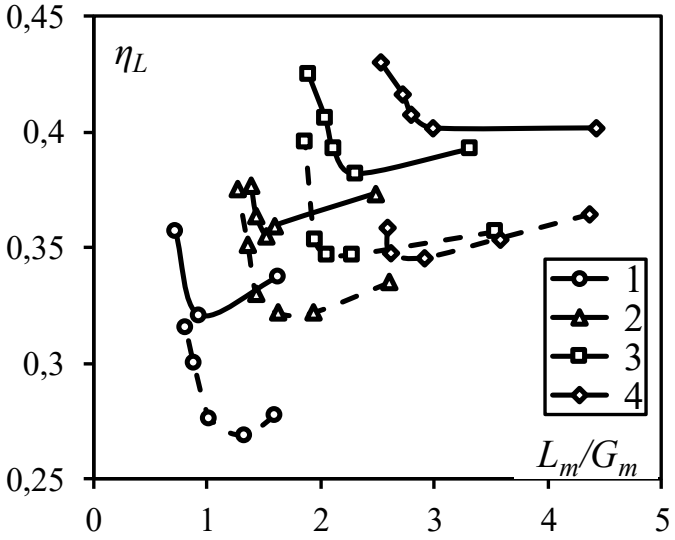


Рис. 2. Изменение теплового КПД гибридной градирни в зависимости от соотношения массовых расходов жидкой и газовой фаз при различных плотностях орошения q, м3/(м2·ч): 1 – 12,0; 2 – 19,2; 3 – 26,7; 4 – 34,2. Средний массовый расход воды в трубчатом радиаторе: сплошная линия – 0,00643 кг/с; штриховая линия – 0,0135 кг/с.

Исследования влияния массового расхода жидкости в трубчатом радиаторе на тепловой КПД в гибридной градирне показывают, что с уменьшением расхода жидкости в трубах тепловой КПД возрастает. Это связано с увеличением разности температур на входе и выходе из трубчатого радиатора. Так, например, при плотности орошения равной 26,7 м^3/(м^2·ч) средняя разность температур на входе и выходе из трубчатого радиатора составила 8,98 °С при расходе равной 0,00643 кг/с, а при расходе 0,0135 кг/с – 7,14 °С.

Таким образом, уменьшение массового расхода жидкости в трубчатом радиаторе в 2,1 раза приводит к повышению теплового КПД в гибридной градирне в среднем на 11,65 % при плотности орошения равной 19,2 м^3/(м^2·ч).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00001, https://rscf.ru/project/21-79-00001/.

Литература:

1. Dmitriev A.V. et al. Experimental investigation of fill pack impact on thermal-hydraulic performance of evaporative cooling tower // Therm. Sci. Eng. Prog. Elsevier BV, 2021. Vol. 22. P. 100835.

2. Дмитриев, А. В. Экспериментальное исследование гидравлических и тепломассообменных показателей наклонно-гофрированных контактных элементов оросителя градирни / А. В. Дмитриев, И. Н. Мадышев, О. С. Дмитриева // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24. – № 1. – С. 4-8.

УДК 665.761

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ БАЗОВЫХ МАСЕЛ ПОВЫШЕННОГО КАЧЕСТВА

Мельников А.В., Назаров А.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: adnrei777@mail.com

Рост спроса на качественные масла и ужесточение требований к ним обусловлены тем, что в последние годы на мировом рынке увеличивается спрос на качественные продукты базового масла. Современные машины нуждаются в маслах с высокой вязкостью, повышенной окислительной стабильностью и низким содержанием серы, способных работать в широком температурном интервале долгое время. Очищенные масла являются компонентами для приготовления широкого ассортимента товарных масел различного назначения.

При этом следует отметить тот факт, что процесс гидроочистки остаточных и дистиллятных депарафинированных масел является одним из важных процессов, поскольку именно благодаря ему получают базовые масла с высоких индексов вязкости, низким содержанием серы и заданными эксплуатационными свойствами.

В ходе работы было проведено исследование периодической литературы и структурно-функционального анализа процесса гидроочистки остаточных и дистиллятных депарафинированных масел на изучении работы действующей установки типа Г-24/1 с производительностью 360000 т/г и способы его усовершенствования. В ходе анализа было выявлено, что главным способом для повышения качества базовых масел является замена устаревшего катализатора на более современный.

В настоящее время на изучаемой установке используется катализатор марки ГР-24М, который позволяет получать базовые масла с индексом вязкости 90 и содержанием серы 0,25 масс.%. Процесс проводят при температуре 260-360ºС, давлении 2,5-4МПа и объемной скорости подачи сырья 1,3 $ч^{-1}$.

С целью повышения качества базовых масел был проведен патентно-информационный поиск, в ходе которого был найден катализатор РК-438 производимый компанией ЗАО «Нижегородские сорбенты», позволяющий улучшить качества масел: повысить ИВ; уменьшить содержание серы. ИВ составит 98, а содержание серы уменьшиться до 0,15 масс. %. Для использования данного катализатора необходимо проводить процесс при температуре 350ºС, давлении 3,5 МПа и объемной скорости подачи сырья 2 $ч^{-1}$ [1].

Таким образом, следует, что предложенный катализатор позволит улучшить качество масла, увеличить производительность установки на ≈11% за счет увеличения объемной скорости подачи сырья с 1,3 до 2 $ч^{-1}$ и его можно использовать

на действующей установке без существенного изменения параметров введения процесса.

Литература:

1. Патент 2544996 Российская Федерация, МПК C10G67/04. Способ получения высокоиндексных базовых масел / Коваленко А.Н.; патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью "ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез". - № 2013152804/04 ; заявл. 27.11.2013; опубл. 20.03.2015, Бюл. №8.

2.Первов Д.Н. Экспериментальная установка исследования процессов дегидрирования углеводородного сырья под вакуумом / Д.Н. Первов, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Технологического университета. - 2015. - Т. 18. № 19. - С. 64-66.

3. Хакимуллин Р.Р. Получение изопрена путем дегидрирования изопентана и изоамилена / Р.Р. Хакимуллин, А.А. Назаров, С.А. Вилохин // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15 № 16. – С. 154-156.

4. Конаков А.С. Моделирование гидродинамики и нагрева реакционной смеси в экспериментальной установке вакуумного дегидрирования / А.С. Конаков, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17 № 7. – С. 224-225.

5. Назаров А.А. Вакуумное дегидрирование углеводородного сырья в химической и нефтехимической промышленности / А.А. Назаров, В.П. Матвеев, С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 4. - С. 107-110.

6. Фаттахаев Р.М. Методы моделирования гидродинамики / Р.М. Фаттахаев, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17 № 11. – С. 106 - 107.

7. Назаров А.А. Математическая модель газодинамических и теплообменных процессов вакуумного дегидрирования углеводородов / А.А. Назаров, С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 10. - С. 153-156.

8. Назаров А.А. Газодинамические и теплообменные процессы в установке вакуумного дегидрирования углеводородов / А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Теоретические основы химической технологии. - 2019. Т. 53. № 4. - С. 416–430.

9. Назаров А.А. Численное исследование газодинамических и теплообменных процессов и апробация математической модели путем сравнения с экспериментальными данными / А.А. Назаров, С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 11. - С. 157-161.

10. Магарил Я.Ф. Аэродинамические газовые затворы для факельных установок / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, Я.С. Шпанер, Р.Г. Гимранов, В.И. Панченко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. - № 5. – С. 14-15.

11. Panchenko V.I., Magaril Y.F., Nazarov A.A., Shpaner Y.S. Gimranov R.G., Aerodynamic gas gates for flare units. Chemical and Petroleum Engineering, 2009. – Vol. 45, № 5 - 6. – P. 278 - 280.

12. Ахмадиев А.Л. Математическая модель нагрева реакционной смеси в процессе вакуумного дегидрирования углеводородов. / А.Л. Ахмадиев, В.П. Матвеев, А.А. Назаров, А.И. Гиниятулин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. - № 10. – С. 22-23.

13. Akhmadiev A.L. A mathematical model of heating of a reaction mixture in the process of vacuum dehydrogenation of hydrocarbons / A.L. Akhmadiev, V.P. Matveev, A.A. Nazarov, A.I. Giniyatulin // Chemical and Petroleum engineering. - 2013. - Vol. 48, Nos. 9 - 10. - P. 618 - 620.

14. Магарил Я.Ф. Факельные установки. Специальные оголовки факельных установок / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, Я.С. Шпанер, Р.Г. Гимранов// Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. - № 1. – С. 17.

15. Magaril Ya.F., Nazarov A.A., Shpaner Ya.S., Gimranov R.G. Special torch heads, Chemical and Petroleum Engineering, 2009. – Vol. 45, № 1 - 2. – P. 13 - 14.

16. Зарипов Р.Р. Катализаторы, применяемые при каталитическом дегидрировании парафиновых, олефиновых и алкилароматических углеводородов / Р.Р. Зарипов, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16 № 10. – С. 67-70.

УДК 665.761

СРАВНЕНИЕ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БАЗОВЫХ МАСЕЛ

Мельников А.В., Назаров А.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: adnrei777@mail.com

В процессе развития техники и транспортных средств, вследствие повышения жесткости рабочих условий, увеличения скоростей и мощности механических устройств, требующих смазки, требования к качеству базовых масел становятся все более жесткими.

Базовые масла используются для получения смазочных масел для автомобилей, таких как машинные масла и трансмиссионные масла, и для промышленных применений, таких как консистентные смазки, технологические масла, белые масла и масла для обработки металлов.

Для того чтобы получить хорошую тягово-скоростную характеристику, необходимо использовать малосернистые, высокоиндексные (более 100) базовые масла, которые обеспечивают хорошие пусковые свойства и необходимую вязкую консистенцию при рабочих температурах.

Завершающим этапом извлечения очищенных базовых масел является процесс гидроочистки. Под гидроочисткой понимают процесс очистки масел, проходящий в вертикальных реакторах, в среде водорода на поверхностях катализаторов при высоких давлениях и температурах. С помощью гидроочистки добиваемся снижение содержания серы.

На качество базовых масел влияет активность катализатора. Активность катализатора повышается с добавлением в его состав оксида кремния (SiO_2), оксида фосфора (P_2O_5) и оксида бора (B_2O_3).

С помощью информации из рассмотренного патента, получилось выделить один из наиболее эффективных катализаторов РК-438. Благодаря данному катализатору можно увеличить производительность получения базовых масел на 11% с параллельным снижением содержания серных соединений на 0,1% масс, и повышением индекса вязкости до 8 единиц [1].

Литература:

1. Патент 2414963 Российская Федерация, МПК C10G67/04. Катализатор гидроочистки тяжелых нефтяных фракций и способ его приготовления / А. А. Пимерзин [и др.]; патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Самарский Государственный технический университет. – заявлено 07.07.2008; опубликовано 27.03.2011.

2.Первов Д.Н. Экспериментальная установка исследования процессов дегидрирования углеводородного сырья под вакуумом / Д.Н. Первов, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Технологического университета. - 2015. - Т. 18. № 19. - С. 64-66.

3. Хакимуллин Р.Р. Получение изопрена путем дегидрирования изопентана и изоамилена / Р.Р. Хакимуллин, А.А. Назаров, С.А. Вилохин // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15 № 16. – С. 154-156.

4. Конаков А.С. Моделирование гидродинамики и нагрева реакционной смеси в экспериментальной установке вакуумного дегидрирования / А.С. Конаков, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17 № 7. – С. 224-225.

5. Назаров А.А. Вакуумное дегидрирование углеводородного сырья в химической и нефтехимической промышленности / А.А. Назаров, В.П. Матвеев, С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 4. - С. 107-110.

6. Фаттахаев Р.М. Методы моделирования гидродинамики / Р.М. Фаттахаев, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17 № 11. – С. 106 - 107.

7. Назаров А.А. Математическая модель газодинамических и теплообменных процессов вакуумного дегидрирования углеводородов / А.А. Назаров, С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 10. - С. 153-156.

8. Назаров А.А. Газодинамические и теплообменные процессы в установке вакуумного дегидрирования углеводородов / А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Теоретические основы химической технологии. - 2019. Т. 53. № 4. - С. 416–430.

9. Назаров А.А. Численное исследование газодинамических и теплообменных процессов и апробация математической модели путем сравнения с экспериментальными данными / А.А. Назаров, С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 11. - С. 157-161.

10. Магарил Я.Ф. Аэродинамические газовые затворы для факельных установок / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, Я.С. Шпанер, Р.Г. Гимранов, В.И. Панченко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. - № 5. – С. 14-15.

11. Panchenko V.I., Magaril Y.F., Nazarov A.A., Shpaner Y.S. Gimranov R.G., Aerodynamic gas gates for flare units. Chemical and Petroleum Engineering, 2009. – Vol. 45, № 5 - 6. – P. 278 - 280.

12. Ахмадиев А.Л. Математическая модель нагрева реакционной смеси в процессе вакуумного дегидрирования углеводородов. / А.Л. Ахмадиев, В.П. Матвеев, А.А. Назаров, А.И. Гиниятулин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. - № 10. – С. 22-23.

13. Akhmadiev A.L. A mathematical model of heating of a reaction mixture in the process of vacuum dehydrogenation of hydrocarbons / A.L. Akhmadiev, V.P. Matveev, A.A. Nazarov, A.I. Giniyatulin // Chemical and Petroleum engineering. - 2013. - Vol. 48, Nos. 9 - 10. - P. 618 - 620.

14. Магарил Я.Ф. Факельные установки. Специальные оголовки факельных установок / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, Я.С. Шпанер, Р.Г. Гимранов// Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. - № 1. – С. 17.

15. Magaril Ya.F., Nazarov A.A., Shpaner Ya.S., Gimranov R.G. Special torch heads, Chemical and Petroleum Engineering, 2009. – Vol. 45, № 1 - 2. – P. 13 - 14.

16. Зарипов Р.Р. Катализаторы, применяемые при каталитическом дегидрировании парафиновых, олефиновых и алкилароматических углеводородов / Р.Р. Зарипов, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16 № 10. – С. 67-70.

УДК 665.761

УМЕНЬШЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА УСТАНОВКЕ ГИДРООЧИСТКИ МАСЕЛ ЗА СЧЕТ ЗАМЕНЫ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Мельников А.В., Назаров А.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: adnrei777@mail.com

В настоящее время на всех установках нефтеперерабатывающих заводах стремятся к уменьшению потребления природных энергетических ресурсов в работе, например, таких как расход пара для работы поршневых насосов и расхода природного газа в печах.

При изучении технологической схемы и работы аналогов установок гидроочистки масел описанных в открытых источниках научно-технической литературы было выявлено, что на данных установок используются поршневые насосы, работающие на пару. Так для уменьшения расхода потребления природных энергетических ресурсов является замена одного из насосов. На установке для подачи в абсорбционную колонну К-3 регенерированного 25-55% водного раствора метилдиэтаноламина используется паровой поршневой двухцилиндровый горизонтальный насос ПДГ-25/45. Данные насосы используют для перекачивания нефтепродуктов, сжиженных УВГ, морской и пресной воды и других жидкостей. Также насосы данного типа имеют следующие достоинства: взрывобезопасны, надежные, просты в конструкции и также давление на нагнетании насоса легко регулируется за счет изменения подачи пара в него. Но даже, несмотря на все его достоинства, насосы данного типа выводят из работы на нефтеперерабатывающих заводах, из-за его использования энергоресурсов, т.е. пара.

В настоящее время используемый насос ПДГ-25/45 работает со следующими параметрами: расход пара составляет 1750 кг/ч и расход МДЭА составляет не более 10 м^3/ч. В то же время 1000кг пара стоит 890 руб, тогда затраты на пар составит 1557,5 рублей за час.

Для уменьшения потребления энергоресурсов установки предлагается заменить насос типа ПДГ-25/45 на центробежный бессальниковый электронасос БЭН.

В ходе проведённого анализа каталог насосов был выбран насос марки БЭН-459/ДМС со следующими характеристиками: мощность 90кВт; номинальная подача 12 м^3/ч; напор при номинальной подаче 600 мм.вод.ст [1]. Известно, что 1 кВт/ч электроэнергии стоит 2,64 руб., тогда затраты на работу составит 237,6 рублей за час. Сведем полученные результаты в таблицу:

Параметры	ПДГ-25/45	БЭН-459/ДМС
Расход МДЭА, $м^3$/ч	10	10
Стоимость пара, руб. за 1000кг/электроэнергии, руб.за 1кВт/ч	890	2,64
Затраты на пар /электроэнергию, рублей за час	1557,5	237,6
Затраты на пар/электроэнергию, руб. в год	13 643 700	2 081 376

Таким образом, данное предложение приведет к уменьшению употребления энергетических ресурсов установки и экономии материальных затрат в год в размере ≈11,5 млн. руб.

Литература:

1. Насосы герметичные типа БЭН [Электронный ресурс] https://www.dafsan.ru/ru/pumps/elektronasosy-centrobeznye germeticnye-tipa-ben?page=7

2. Первов Д.Н. Экспериментальная установка исследования процессов дегидрирования углеводородного сырья под вакуумом / Д.Н. Первов, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Технологического университета. - 2015. - Т. 18. № 19. - С. 64-66.

3. Хакимуллин Р.Р. Получение изопрена путем дегидрирования изопентана и изоамилена / Р.Р. Хакимуллин, А.А. Назаров, С.А. Вилохин // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15 № 16. – С. 154-156.

4. Конаков А.С. Моделирование гидродинамики и нагрева реакционной смеси в экспериментальной установке вакуумного дегидрирования / А.С. Конаков, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17 № 7. – С. 224-225.

5. Назаров А.А. Вакуумное дегидрирование углеводородного сырья в химической и нефтехимической промышленности / А.А. Назаров, В.П. Матвеев, С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 4. - С. 107-110.

6. Фаттахаев Р.М. Методы моделирования гидродинамики / Р.М. Фаттахаев, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17 № 11. – С. 106 - 107.

7. Назаров А.А. Математическая модель газодинамических и теплообменных процессов вакуумного дегидрирования углеводородов / А.А. Назаров,

С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 10. - С. 153-156.

8. Назаров А.А. Газодинамические и теплообменные процессы в установке вакуумного дегидрирования углеводородов / А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Теоретические основы химической технологии. - 2019. Т. 53. № 4. - С. 416–430.

9. Назаров А.А. Численное исследование газодинамических и теплообменных процессов и апробация математической модели путем сравнения с экспериментальными данными / А.А. Назаров, С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 11. - С. 157-161.

10. Магарил Я.Ф. Аэродинамические газовые затворы для факельных установок / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, Я.С. Шпанер, Р.Г. Гимранов, В.И. Панченко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. - № 5. – С. 14-15.

11. Panchenko V.I., Magaril Y.F., Nazarov A.A., Shpaner Y.S. Gimranov R.G., Aerodynamic gas gates for flare units. Chemical and Petroleum Engineering, 2009. – Vol. 45, № 5 - 6. – P. 278 - 280.

12. Ахмадиев А.Л. Математическая модель нагрева реакционной смеси в процессе вакуумного дегидрирования углеводородов. / А.Л. Ахмадиев, В.П. Матвеев, А.А. Назаров, А.И. Гиниятулин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. - № 10. – С. 22-23.

13. Akhmadiev A.L. A mathematical model of heating of a reaction mixture in the process of vacuum dehydrogenation of hydrocarbons / A.L. Akhmadiev, V.P. Matveev, A.A. Nazarov, A.I. Giniyatulin // Chemical and Petroleum engineering. - 2013. - Vol. 48, Nos. 9 - 10. - P. 618 - 620.

14. Магарил Я.Ф. Факельные установки. Специальные оголовки факельных установок / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, Я.С. Шпанер, Р.Г. Гимранов// Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. - № 1. – С. 17.

15. Magaril Ya.F., Nazarov A.A., Shpaner Ya.S., Gimranov R.G. Special torch heads, Chemical and Petroleum Engineering, 2009. – Vol. 45, № 1 - 2. – P. 13 - 14.

16. Зарипов Р.Р. Катализаторы, применяемые при каталитическом дегидрировании парафиновых, олефиновых и алкилароматических углеводородов / Р.Р. Зарипов, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16 № 10. – С. 67-70.

УДК 66.045.12

ОБЗОР ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ТИПА ТТАИ

Миронова А.Д., Медяков А.А.
Поволжский государственный технологический университет,
E-mail: Nastii_01@mail.ru

Теплообменник ТТАИ (тонкостенный теплообменный аппарат интенсифицированный) относится к теплообменникам кожухотрубного типа. Отличается простотой технического обслуживания, возможностью извлекать трубные пучки, а также уменьшенными габаритными показателями, что позволяет монтировать, демонтировать и транспортировать теплообменники без специальных приспособлений в минимальные сроки.

Сфера применения

Тонкостенные теплообменники типа ТТАИ успешно используются для решения задач теплопередачи в жилищно-коммунальном хозяйстве в рекреационной отрасли, в пищевой промышленности, в машиностроении, в судостроении и в химической промышленности.

- Жилищно-коммунальное хозяйство

Самое широкое применение на сегодня теплообменники ТТАИ находят в жилищно-коммунальном хозяйстве, где используются в системах отопления, горячего водоснабжения, кондиционирования и вентиляции, а также для обеспечения работы саун, бассейнов и пр. Жилищно-коммунальное хозяйство является той сферой, где эти теплообменники стали применяться прежде всего – в 1992г. головные образцы аппаратов ТТАИ были установлены в одном из ЦТП Севастопольской теплосети. С тех пор эти аппараты получили массовое распространения в сфере ЖКХ и используются как в частном, коттеджном, строительстве, так и в ЦТП и ИТП различных регионов стран СНГ и Европы.

- Рекреационный бизнес

Теплообменники ТТАИ широко применяются в рекреационном бизнесе – плавательные бассейны значительной части санаториев, домов отдыха и плавательные бассейны значительной части санаториев, домов отдыха и других рекреационно-оздоровительных учреждений Крыма.

- Пищевая промышленность

С 1992 года как жидкостные, так и паровые подогреватели ТТАИ применяются для нагрева, пастеризации и охлаждения вина на многих винодельческих заводах: ПАО «Массандра», Севастопольский головной винзавод, Инкерманский завод марочных вин, завод «Коктебель», завод «Магарач», Одессавинпром, «Коблево» (г. Николаев) и др.

•Судовые системы

С начала 90-х годов теплообменные аппараты типа ТТАИ используются во вспомогательных и технологических судовых системах – на ряде судов СГП «Атлантика» аппараты применены для подогрева паром морской воды, используемой в технологических процессах по производству пищевой продукции, в последние годы аппараты были использованы для обеспечения работы судовых систем кондиционирования ряда яхт и теплоходов.

•Машиностроение

Теплообменники ТТАИ находят широкое применение в промышленности. Например, уже почти 20 лет ОАО «АвтоВАЗ» (г. Тольятти) применяет теплообменные аппараты на машинах литья под давлением на главном конвейере, на линии хромирования деталей, ТЭЦ и на других объектах. Учитывая большое число точек применения, ОАО «АвтоВАЗ» продолжает закупать теплообменники регулярно.

•Утилизация тепловой энергии

В последние годы в связи с усиливающимся вниманием к использованию нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, аппараты ТТАИ активно используются в системах утилизации низкопотенциальной сбросной тепловой энергии и для отбора энергии от окружающей среды. Так, в 2007г. аппараты были применены на объединении «МАЗ» (г. Минск) для утилизации тепла удаляемого воздуха, а в 2008г. были смонтированы на одной из крупнейших в Европе теплонасосных установок, использующей тепловую энергию Черного моря.

Устройство ТТАИ

ТТАИ представляет собой разборный тонкостенный теплообменный аппарат, трубки которого изготовлены из нержавеющей стали, толщиной 0,2−0,3 мм и имеют рифленую поверхность, за счет чего достигается интенсификация теплообмена и возникает эффект самоочистки. Корпус аппарата, также изготавливается из нержавеющей стали. Уплотнение выполняется с помощью резинового кольца, устанавливаемого перед трубным пучком и сжимаемым ответным фланцем. Аппараты с диаметром до 50 мм, комплектуются ответными фланцами, к которым приварены патрубки из углеродистой стали с резьбовым соединением, аппараты большего диаметра комплектуются ответными фланцами с приваренными патрубками из углеродистой стали под приварку.

Характеристики и применение

Аппараты работоспособны при температуре до 300 °С и давлениях до 1,6 МПа. Установленный срок службы — 25 лет. Срок гарантии — 2 года. Сегодня успешно работают аппараты, имеющие срок службы уже более 25 лет.

Аппараты типа ТТАИ имеют широкий диапазон использования, однако наиболее полно все достоинства ТТАИ проявляются при работе на невязких капельных жидкостях в диапазоне от 0,05 до 250м³/ч (для увеличения расхода несколько аппаратов подключаются параллельно). Наиболее широкое применение находят теплообменники вода-вода и пар-вода.

Основные преимущества использования аппаратов ТТАИ:

- Дешевле, меньше и легче пластинчатых теплообменников с аналогичными характеристиками.
- Имеют очень незначительный вес, что исключает применение подъемных механизмов при монтаже, значительно упрощает процедуру монтажа и не требуется устройство фундаментов и опор.
- Аппараты обладают малой тепловой инерционностью.
- Легко разбираются и монтируются.
- Эффект «самоочистки» препятствует отложению накипи, и, как показывает практика, не требуют обслуживания и промывки в течении 4−6 лет эксплуатации.
- Отличаются высокой надежностью и эффективностью.
- В качестве уплотнения применяются резиновые кольца, которые, в случае необходимости, можно вырезать из листовой резины.
- Конструкция аппарата позволяет разместить теплообменник, и всё оборудование ИТП на стене. Это резко снижает необходимую площадь, стоимость и требования к помещению ТП.
- Не чувствительны к разнице давлений греющей и нагреваемой сред.
- Предусмотрено два варианта исполнения: — нержавеющая сталь и титан.

Литература:

1. Теплообменные аппараты ТТАИ // ПромТехСервис URL: http://ptsrostov.ru/produkciya/teploobmenniki-ttai/ (дата обращения: 25.04.2022).

2. Теплообменные аппараты типа ТТАИ и специфические особенности индивидуальных тепловых пунктов созданных на их основе // РосТепло.ру URL: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1501 (дата обращения: 25.04.2022).

3. Общая информация о ТТАИ // АТЕКС-ИНЖИНИРИНГ URL: https://ateks38.ru/about-ttai (дата обращения: 25.04.2022).

УДК 536.37, 53.043, 538.9

СОЗДАНИЕ ПОРИСТЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ МАТРИКСОВПОЛИМОЛОЧНОЙКИСЛОТЫ (PLA)

Муттасимов И.Р., Растегаев Е.К., Кузнецова И.В., Сабирзянов А.Н.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

Полимеры широко используются в повседневной жизни благодаря своим свойствам, таким как ударная вязкость, вязкоупругость и возможность образования полукристаллических структур. По этой причине полимеры используются в основном в системах доставки лекарств и тканевой инженерии, а также в фармацевтических и биомедицинских исследованиях. Процесс вспенивания позволяет создать пористую структуру в полимере. Полимерный матрикс является объектом многих исследований в качестве систем с пролонгированной доставкой лекарств, а также имплантатов или инъекций, которые используются для доставки в клетки лекарственных соединений. Процесс вспенивания с использованием сверхкритического CO_2 даёт преимущество в виде высокой проникающей способности в полимеры и экологичности, потому что CO_2 нетоксичен, недорог и может быть использован повторного. Более того, сверхкритическая технология позволяет проводить пропитку полимера определёнными соединениями одновременно со вспениванием. Таким образом, полимеры, вспененные и пропитанные определённым веществом, могут быть изготовлены в одношаговом процессе [1].

Полимерный матрикс, в который может быть включено вещество, которое, например, может контролировать пролиферацию и дифференцирование клеток, является отличной альтернативой для использования в тканевой инженерии. Таким образом, функция полимера не ограничивается не только физической поддержкой, но и терапевтическим действием для контроля пролиферации и дифференцировки клеток. Во всяком случае, процесс пропитки полимера был в основном изучен для использования в качестве систем доставки лекарств в течение длительного времени, с большей или меньшей задержкой в зависимости от конечной цели доставки. При обычной пропитке полимеров используются органические растворители, которые растворяют лекарственное средство, которое будет включено в полимеры, но этот раствор должен набухать и растягивать полимерный матрикс, чтобы обеспечить диффузию лекарства при адекватной скорости процесса. После чего органический растворитель следует удалить, оставив пропитанный матрикс. Этот способ имеет несколько недостатков, например, для удаления органического растворителя необходима сушка полимера, также распределение лекарства в матриксе является неоднородным [2].

Импрегнация при помощи сверхкритических флюидов (СКФ) устраняет все эти недостатки благодаря своим свойствам, таким как высокая диффузионная способность, низкое поверхностное натяжение и простота извлечения растворителя. Тем не менее, эта методика ограничена растворимостью лекарственного средства в СКФ, также полимер может набухать. Если эти ограничения будут нивелированы, можно получить высококачественный продукт, не содержащий остаточных растворителей, поскольку в процессе не участвуют органические растворители. В этом процессе СКФ вступает в контакт с веществом. Затем СКФ растворяет это вещество до насыщения в течение времени пропитки [3].

Были проведены исследования по приданию пористости образцам синтетических матриксов в среде сверхкритического CO_2 . Исходные образцы представляли собой таблетки из полимолочной кислоты (PLA) диаметром 20,2 мм и высотой 3-3,8 мм. Полимолочная кислота (PLA) наиболее часто используется в биомедицинской и фармацевтической промышленностях, в которых применяется в качестве рассасывающегося материала имплантата, состава для обработки ран, устройств фиксации кости, и как средства для контролируемой доставки лекарств и т. д.

В таблице 1 представлены результаты измерения геометрических параметров образцов после обработки в сверхкритическом диоксиде углерода, а также полученной пористости.

Таблица 1 - Результаты экспериментов с образцами PLA

Параметры	Температура, °С	Давление, Мпа	Диаметр исходного образца, см	Высота исходного образца, см	Объем исходного образца, см3	Масса исходного образца, г	Объем обработанного образца, см3	Масса обработанного образца, г	Пористость по расчитанной плотности, %
ПИ-1	50	30	2,02	0,3	0,961	0,928	1,3	0,937	25,333
ПИ-2	60			0,3	0,961	0,919	1,3	0,919	26,042
ПИ-3	70			0,38	1,217	1,245	1,5	1,054	31,277
ПИ-4	80			0,34	1,089	1,059	1,8	1,251	28,532
ПИ-5	90			0,37	1,185	1,171	2	1,166	40,99
ПИ-6	90	10		0,35	1,121	1,124	1,7	1,13	33,654
ПИ-7		15		0,36	1,153	1,124	1,8	1,125	35,892
ПИ-8		20		0,38	1,218	1,223	2,1	1,279	39,384
ПИ-9		25		0,36	1,153	1,171	1,9	1,181	38,833
ПИ-10		30		0,37	1,185	1,171	2	1,166	40,99

С увеличением температуры экстрактора пористость увеличивается (рис. 1) Максимальная пористость была достигнута при 90 °С и составляла 40,99%. Температура плавления полимолочной кислоты составляет 173-178 °С и при низких температурах обработки происходит деструкция образца в следствии его малой пластичности.

Можно сделать вывод, что наиболее приемлемым является использование более высокой температуры. С увеличением давления в системе пористость увеличивается (рис. 2.). Максимальная пористость была достигнута при давлении 30 МПа и составила 40,99%, что объясняется максимальным коэффициентом диффузии СК CO2 при данных параметрах.

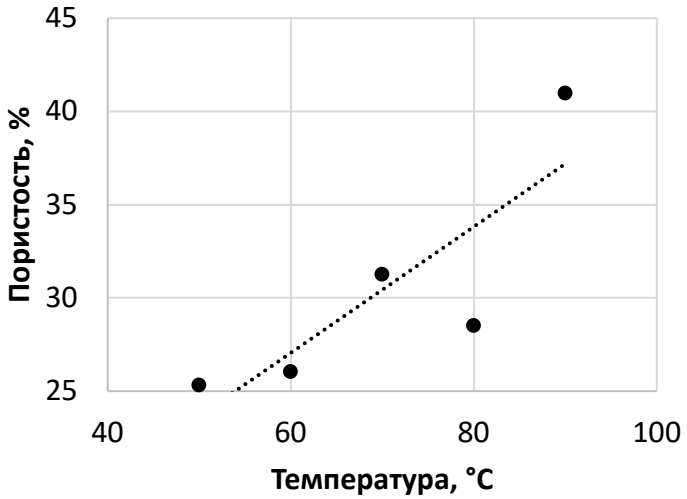


Рисунок 1 - Зависимость пористости PLA от температуры

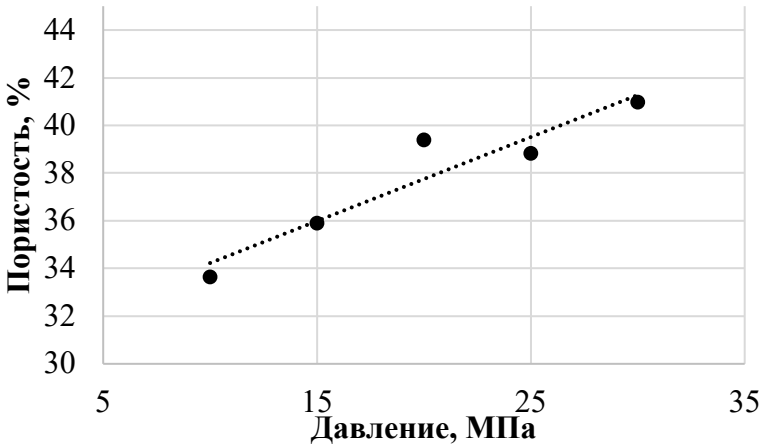


Рисунок 2 - Зависимость пористости PLA от давления в системе

Литература:

1. Кузнецова И.В., Николаев В.В. Гильмутдинов И.И., Гильмутдинов И.М., Сабирзянов А.Н.// Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева. 2020. Т. 76. №1. С.26

2. Kuznetsova I.V., Sandugey N.S., Gilmutdinov I.M., Gilmutdinov I.I., Sabirzyanov A.N//Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399. P.1.

3. Кузнецова И.В., Сандугей Н.С., Гильмутдинов И.И., Гильмутдинов И.М., Сабирзянов А.Н.// Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 81. С. 1785

УДК 621.036

ОЦЕНКА ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Мунин А.П., Озеров Н.А, Кульбякина А.В.
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
E-mail: sasha-munin10@yandex.ru

В рассматриваемом теплообменном аппарате(ТОА) нагреваемой средой является воздух, а греющей уходящие дымовые газы (продукты сгорания) интенсифицировать процесс теплообмена целесообразно со стороны теплоносителя, имеющего низкий коэффициент теплоотдачи, таким теплоносителем в проекте являются продукты сгорания. Интенсификацию теплообмена предлагается выполнять за счет накатки гладкой трубы (рис. 1). Образующиеся на наружной поверхности трубок углубления способствуют турбулизации пристеночного слоя и интенсификации теплообмена[2,4].

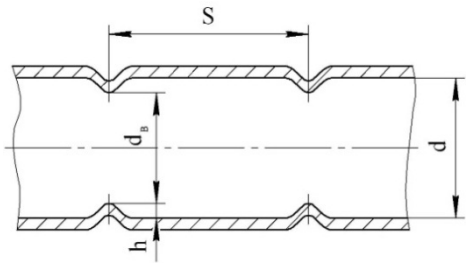


Рис.1 Интенсификации теплообмена в трубах выполненная накаткой:
h – глубина канавки, S – шаг накатки, d – внутренний диаметр трубы,
$d_в$ – внутренний диаметр трубы при наличии канавок

В качестве оптимизационного параметра принят относительный шаг накатки S/d в рассматриваемом диапазоне 0.8, 1, 1.5, 2.5. Кроме того было рассчитаны технико-экономические параметры сравниваемых ТОА[1-2].

Выбор ограничений, накладываемых на проектируемый ТОА

1) Температура продуктов сгорания на выходе из теплообменного аппарата не должна достигать температуры конденсации водяного пара содержащегося в них, во избежание низкотемпературной коррозии

2) Невозможность нагрева воздуха выше температуры дымовых газов на входе в ТОА.

Относительный шаг выступов $\frac{d_в}{d} = 0{,}93$, обеспечивающих самое выгодное сочетание между ростом интенсивности теплообмена и сопротивлением при течении в трубе газа с числом Рейнольдса Re <= 10^4

Применяемые расчетные соотношения в конструкторском расчете справедливы в пределах: Режима движения теплоносителя, критерий Рейнольдса равен $Re = 3 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$;

Зависимости аэродинамического расчета справедливы для условий:

Режим движения теплоносителя $Re_l = (2{,}2 \div 180) \cdot 10^3$

Интенсификации теплообмена

В [4] предложено с целью интенсификации теплообмена в трубах выполнять накатку так, как это показано на (рис.1). Образующиеся выступы-турбулизаторы позволяют значительно повысить интенсивность теплообмена, но при этом возрастает и сопротивление течению в трубе.

Для отыскания наиболее выгодного относительного шага S/d выступов определим при различных его величинах значение отношений $Nu/Nu_{гл}$ и $\zeta/\zeta_{гл}$. Здесь величина без индекса соответствует трубе с накаткой, а с индексом «гл» – гладкой трубе.

Основные теплотехнические характеристики внутри гладкой трубы:

$Re_д, Nu_д, \alpha_в$ Вт/(м^2 ^{0}C);$\delta =$ м; λст $= 49$ Вт/(м·°C),$d_{вн}$,м;

По методике [4] был произведен расчет $Nu/Nu_{гл}$ и $\zeta/\zeta_{гл}$. для S/d =0,8 1; 1,5 и 2,5 , полученные результаты приведены в Таблице 1.

Таблица 1. - Отношения $Nu/Nu_{гл}$ и $\zeta/\zeta_{гл}$

$S\ /\ d$	0,8	1	1,5	2,5
$Nu/Nu_{гл}$	2,275112	2,212971	2,057617448	1,74691
$\xi\ /\ \xi$_гл	1,531957	1,385523	1,211366016	1,091441

В таблице 2 представлены результаты расчета основных теплотехнических и конструктивных характеристик проведенных по зависимостям(1)-(5):

$$Nu/_{Nu_{гл}} = A \quad (1)$$

$$Nu = A \cdot Nu_{гл} \quad (2)$$

$$\alpha_д = \frac{Nu \cdot \lambda_д}{d_{вн}} \quad (3)$$

$$K = \frac{1}{(\frac{1}{\alpha_в} + \frac{1}{\alpha_д} + \frac{\delta}{\lambda_{ст}})} \quad (4)$$

$$F = Q_в . \frac{1000}{K \Delta tср} \quad (5)$$

Таблица 2 - Теплотехнические характеристики

$S\ /\ d$	0,8	1	1,5	2,5
Nu	53,09308	51,64292	48,01752	40,76671
$\alpha_д$	59,79958	58,16624	54,08289	45,91619
K	31,54649	31,086	29,88031	27,20679

F	61,27917	62,18693	64,69621	71,05369

Аэродинамический расчет

При течении в каналах жидкости или газа поток преодолевает силы вязкого трения, что приводит к потере его давления[5]. Потерю или перепад давления потока, обусловленные трением, принято определять по формуле, Па:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \xi_{\text{гл}} \frac{\rho w^2}{2} \cdot \frac{l}{d} \quad (6)$$

Основная сложность расчета сводится к определению$\Delta P_{\text{тр}}$ коэффициента сопротивления трения $\xi_{\text{гл}}$, который зависит от режима движения потока, формы поперечного сечения и шероховатости канала.

Коэффициент сопротивления ξ при обтекании шахматного пучка :

$$\xi_{\text{гл}} = (4 + 6{,}6n_1)Re^{-0.28} \quad (7)$$

где плотность дымовых газов $\rho = 1{,}086 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Коэффициент сопротивления коэффициент сопротивления труб с накаткой ξ:

$$\xi / \xi_{\text{гл}} = B \quad (8)$$

$$\xi = B \cdot \xi_{\text{гл}} \quad (9)$$

Перепад давления потока, Па :

$$\Delta \text{P}_{\text{тр}} = \xi_{\text{гл}} \frac{\rho \text{w}^2}{2} \cdot \frac{\text{l}}{\text{d}} \quad (10)$$

Электрическая мощность дымососов была определена по формуле, Вт:

$$\text{N} = \frac{\Delta \text{P}_{\text{тр}} \cdot \text{V}_{\text{д}}}{\eta} \quad (11)$$

Результаты расчета аэродинамических характеристик сравниваемых ТОА приведены в таблице 3

Таблицу 3 Аэродинамические характеристики

ξ	15,73787	14,23355	12,44442	11,21243
$\Delta P_{\text{тр}}$ (Па)	22737,61	20564,21	17979,33	16199,38
N дым Вт	50372,56	45557,64	39831,14	35887,87

Графическая зависимость площади теплообмена и перепада давления от относительного шага приведена на (рис. 2).

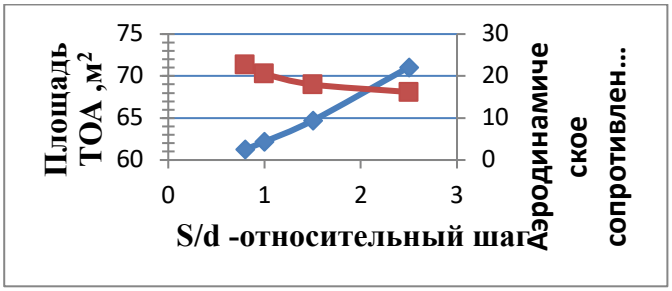


Рис. 2 Зависимость площади теплообмена и перепада давления от относительного шага

Для нахождения оптимума производится экономический расчет [3].

Строится зависимость затрат на теплообменные оборудования от относительного шага S/d (рис 3)

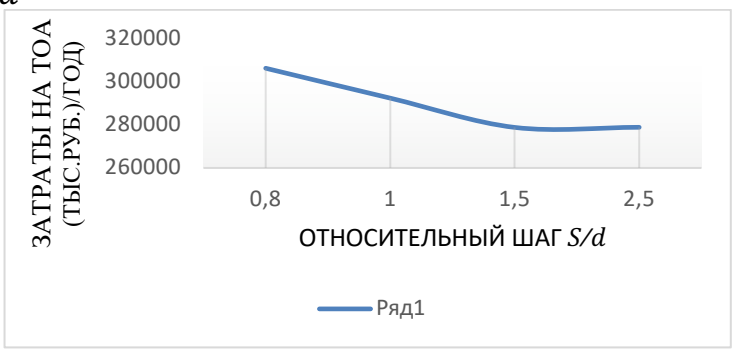


Рис. 3 Зависимость затрат на теплообменные оборудования от относительного шага S/d

Выбрано оптимальное значение параметра оптимальным относительным шагом будет $(S\ )\ /\ d = 1{,}5$. При данном относительном шаге проект будет экономически выгодный и целесообразный.

Литература:

1. Згуро А. и др., «Химические технологии. Учебное пособие для химико-технологических специальностей профессиональных центров»/ А. Згуро, Л. Григорьева, С. Чекрыжов, И. Бородина. – Йыхви: INNOVE, 2012. – 377 с. с ил.

2. Кудинов А.А., Зиганшина С.К./ Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. М.: Машиностроение, 2011. - 374 с., ил. 117.

3. Чуев И.Н. Экономика предприятия: учебник/ И.Н. Чуев, Л.Н. Чуева, 2008. – 416с.

4. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. –М.: Машиностроение, 1972. – 220 с.

5. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 472 с

УДК 621.521

СТЕНД ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКАЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФУЗИОННОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

Назаренко Д.С., Савинова А.В., Тюрин А.В., Путиловский Ф.Д., Капустин Е.Н.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
АО «Вакууммаш»,
E-mail: tyrin92@mail.ru

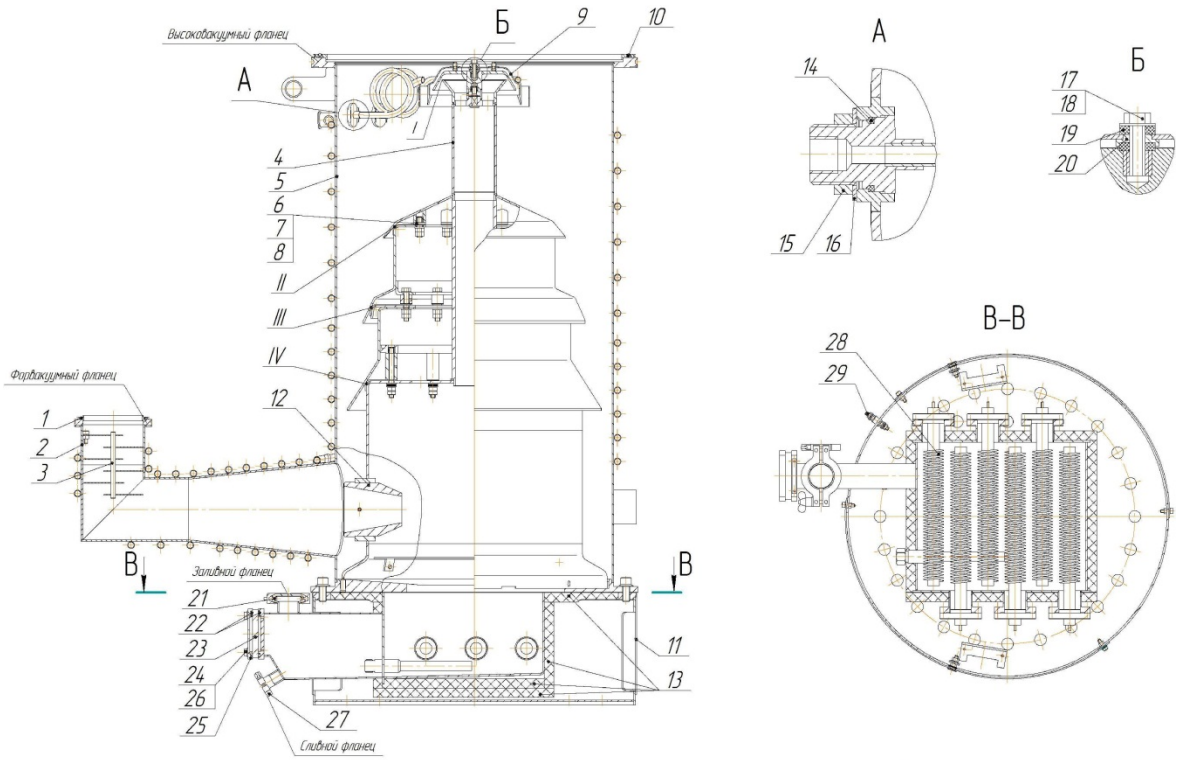
Получение неразъемных соединений деталей особо ответственных узлов происходит при помощи пайки или сварки в условиях среднего и высокого вакуума. Для получения давления в рабочей камере менее 0,1 Па чаще всего применяются диффузионные вакуумные насосы [1, 2]. Откачивающие действие которых основано на захвате и переносе откачиваемого газа струей пара, истекающей из щелевых зазоров зонтичных ступеней I, II, III, IV, паропровода 4 и эжектора 12, в сторону форвакуумного патрубка 2 (рис. 1).

Исторически отечественные насосы вакуумные диффузионные (НД) имели три или четыре зонтичные ступени и применялись для работы в диапазоне давлений $10^{-2}…10^{-4}$ Па. Однако, в связи с изменением технологических процессов, использующих диффузионные насосы, возникла потребность в других исполнениях насосов этого типа. Мировые производители Varian (США), Edwars (Англия), HSR Vacuum (Лихтенштейн) выпускают насосы с увеличенной быстротой действия в диапазоне давлений $10^{-1}…10^{-4}$ Па по сравнению с НД. Для этого в качестве последней ступени используется эжекторное сопло [3].

В данной работе исследовались откачные характеристики диффузионного вакуумного насоса с расширенным рабочим диапазоном. Типоразмерный ряд которых в настоящее время разрабатывается на АО «Вакууммаш» [4].

Для исследования характеристик насоса был создан стенд, позволяющий проводить измерения всех основных параметров насоса во всем диапазоне рабочих давлений, в том числе в соответствии с «ГОСТ Р 54807-2011. Вакуумная технология. Стандартные методы измерения характеристик вакуумных насосов. Общие положения» [5]. Вакуумная схема стенда представлена на рис. 2. Разработанный стенд позволяет получать:

- предельное остаточное давление;
- зависимость быстроты действия от давления на входе;
- наибольшее выпускное давление при максимальной нагрузке;
- потребляемую мощность.



1 – уплотнитель; 2 – выходной патрубок; 3 – маслоотражатель;
4 – паропровод; 5 – корпус насоса; 6 – установочные шайбы; 7 – гайки;
8 – шайбы; 9 – маслоотражатель; 10 – уплотнитель; 11 – кожух; 12 – эжектор;
13 – изоляторы; 14 – уплотнитель; 15 – гайка; 16 – шайба; 17 – болт;
18 – шайба; 19 – фторопластовая втулка; 20 – центрирующая втулка;
21, 22, 27 – уплотнители; 23 – стекло смотровое; 24 – болт; 25 – фланец;
26 – ограничивающие втулки; 28 – нагреватель; 29 – болт заземления;
I, II, III, IV – зазоры в зонтичных ступенях паропровода

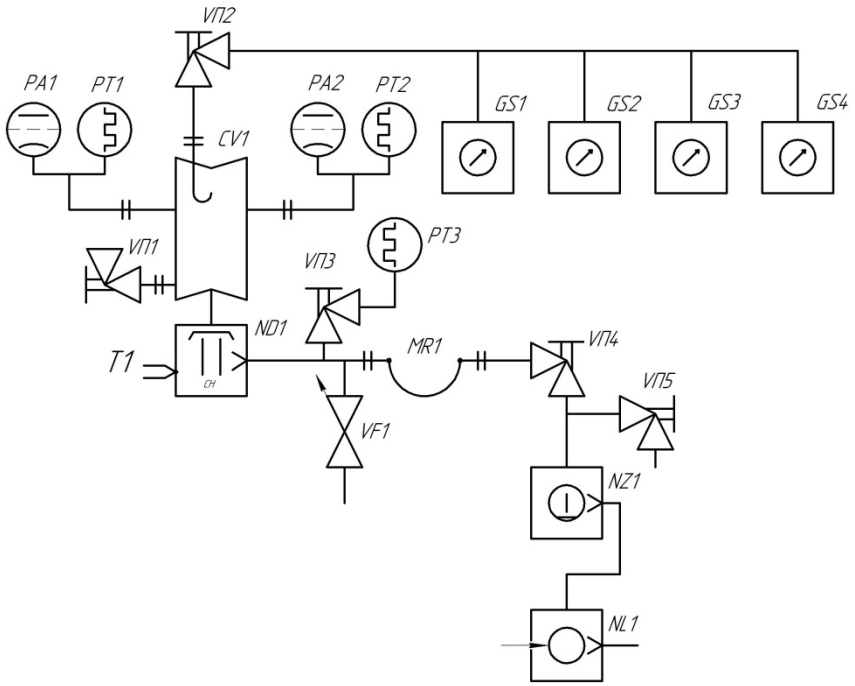
Рис. 1 – Насос вакуумный диффузионнный

В результате испытаний установлено, что предельное остаточное давление диффузионного насоса находится около $1 \cdot 10^{-4}$ Па и менее при выполнении целого ряда важных мероприятий:

- предварительной очистки внутренних поверхностей диффузионного насоса и измерительной камеры;

- выборе качественного вакуумного масла, заливаемого в диффузионный насос;

- продолжительности работы диффузионного насоса при закрытых клапанах на измерительной камере.



CV1 – измерительная камера; PA1..PA2 – вакуумметры ионизационные; PT1..PT3 – вакуумметры терморезистивные; GS1..GS4 – регуляторы расхода газа; VП1…VП5 - клапаны; VF1 - натекатель; NZ1 – насос вакуумный двухроторный, NI1 –насос вакуумный пластинчато-роторный

Рис. 2 – Вакуумная схема стенда испытаний насоса вакуумного диффузионнного

На рис. 3 представлено сравнение зависимостей быстроты действия от давления для насосов НД-500Э (разрабатываемого на АО «Вакууммаш») и насоса HS-16 – Varian (США). Сравниваемые насосы имеют одинаковый диаметр высоковакуумного фланца, но потребляемая мощность у отечественного насоса на 10 % меньше, за счет нового энергосберегающего кипятильника. Стоит отметить, что быстрота действия на большей части рабочего диапазона выше у НД-500Э, при этом сам рабочий диапазон у отечественного насоса шире.

Можно с уверенностью сказать, что вышеперечисленные преимущества насоса НД-500Э позволят успешно конкурировать как на Российском, так и на зарубежном рынке вакуумного оборудования.

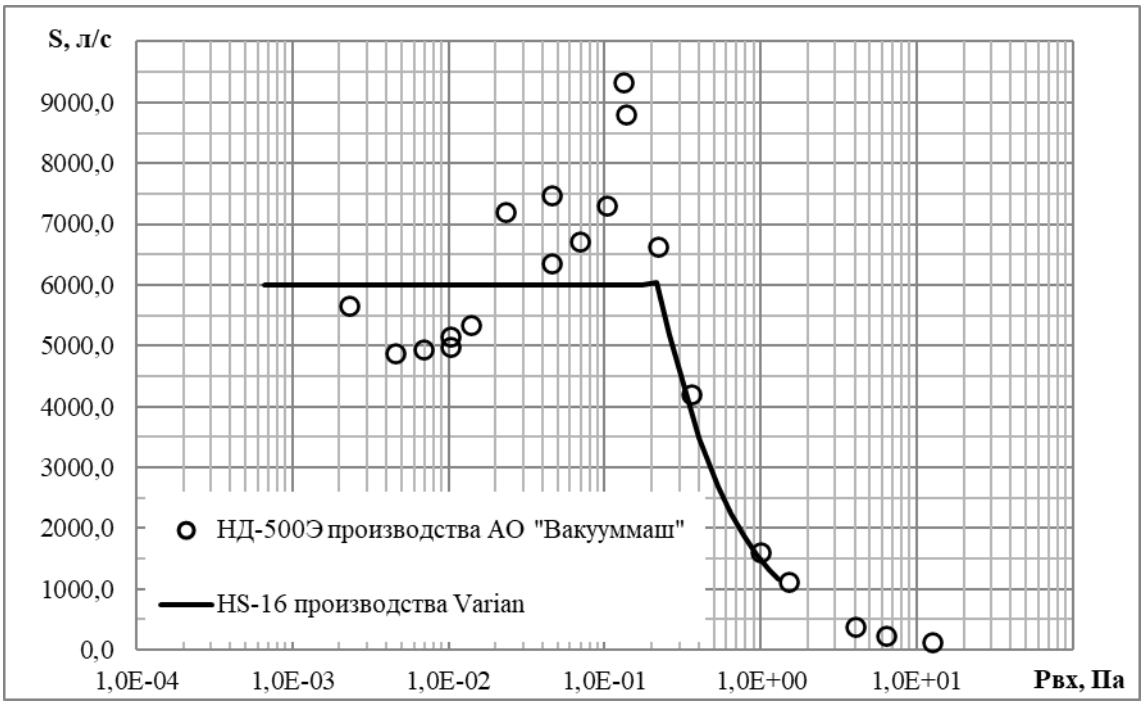


Рис. 3 – Зависимость быстроты действия от давления на входе

Литература:

1. Хабланян М.Х Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.1. Инженерно-физические основы: учеб. пособие / М.Х. Хабланян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. - 237 с.

2. Хабланян М.Х Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.2. Вакуумные насосы: учеб. пособие / М.Х. Хабланян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. – 300 с.

3. Новое поколение диффузионных вакуумных насосов производства АО «Вакууммаш» / Н.А. Ахмеджанов, Е.Н. Капустин, Ф.Д. Путиловский, М.В. Абраев // Новые разработки в области защитных, теплозащитных и упрочняющих покрытий для деталей ГТД : Сборник докладов Научно-технической конференции, Москва, 28 сентября 2016 года / ФГУП «ВИАМ». – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2016. – С. 1.

4. Электронный магазин ОАО Вакууммаш // ОАО Вакууммаш. URL: http://vacma.ru/products/roots_pump/nvd/382/.

5. ГОСТ Р 54807-2011 (ISO 21360:2007) Вакуумная технология. Стандартные методы измерения характеристик вакуумных насосов. Общие положения.

УДК 66.096.5:636.085.62

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ СТАДИИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Павлова Е.А., Васильев П.С.
Волгоградский государственный технический университет,
E-mail: e.pavlova1999@icloud.com

Технический углерод – высокодисперсный продукт, который широко используется в производстве резин, типографских красок и пластмасс. Более 96% производимого в мире технического углерода получают печным способом путем пиролиза жидкого углеводородного сырья.

Гранулирование является одной из основных технологических стадий производства технического углерода. В настоящее время наиболее распространён мокрый способ, при котором образование гранул происходит за счёт применения связующей жидкости – воды со специальными связующими добавками. Такой процесс осуществляется в специальном смесителе-грануляторе. Полученные гранулы размером 0,25÷3 мм высушиваются в барабанной сушилке до конечной влажности не более 0,9%. При этом в качестве сушильного агента используются продукты полного сгорания природного газа [1].

Необходимо отметить, что общая масса применяемого на стадии гранулирования технического углерода технологического оборудования (смесителя-гранулятора и барабанной сушилки) составляет от 80 до 100 тонн.

Задачей настоящей работы является разработка комбинированного аппарата для гранулирования и сушки технического углерода.

Гранулирование в псевдоожиженном слое является одним из наиболее совершенных способов проведения этого процесса. Основное его достоинство заключается в двойном механизме роста гранул: 1) возникновение центров гранулообразования и рост частиц за счёт наслаивания на их поверхность тонких плёнок; 2) агломерация мелких частиц при избытке жидкости на их поверхности с последующей кристаллизацией жидкой фазы. Кроме того, организация процесса гранулирования в псевдоожиженном слое позволяет одновременно проводить классификацию полученных гранул по размерам для поддержания требуемой дисперсности конечного продукта [2].

Для решения поставленной задачи предлагается использовать аппарат фонтанирующего слоя с дополнительными боковыми вводами теплоносителя – аэрозоля технического углерода, обеспечивающими более лучшее его перемешивание в зоне устья фонтана. Это обстоятельство способствует увеличению скорости роста гранул и интенсивности процесса сушки, что, соответственно, повышает производительность аппарат и снижает его габаритные размеры [3].

Ниже приведены основные расчётные зависимости.

Среднее время пребывания гранул в аппарате $\tau_{ср}$ до достижения ими необходимого среднего конечного размера $d_{ср}$ определялось из уравнения [3]:

$$d_{ср} = d_0 \int_0^{\infty} C(\theta) d\theta + \lambda \tau_{ср} \int_0^{\infty} \theta C(\theta) d\theta, \quad C(\theta) = f(n, m, b, p), \tag{1}$$

где d_0 – начальный диаметр частиц технического углерода; λ – скорость роста гранул; n – число ячеек идеального перемешивания; m – объёмная доля зоны идеального перемешивания; b – объёмная доля зоны идеального вытеснения; p – параметр рециркуляции.

Уравнение (1) решалось численно на ЭВМ методом Симпсона.

Скорость витания $w_{вит}$ частиц размером $d_{ср}$, с учётом реальной гидродинамической обстановки в грануляторе, рассчитывалась из уравнения [4]:

$$Re_{вит} = \frac{Ar}{18\varphi_n^2 + \sqrt{\frac{\varphi_n \varphi_ф}{3} Ar}}, \tag{2}$$

где $Re_{вит}$ – число Рейнольдса для витания частиц размером $d_{ср}$; Ar – число Архимеда; φ_n – коэффициент удельной поверхности частиц; $\varphi_ф$ – коэффициент формы и шероховатости частиц.

Рабочая скорость фонтанирования определялась по уравнению [3]:

$$w_ф = 1{,}525\, w_{вит} \exp(0{,}84\alpha), \tag{3}$$

где α – доля расхода аэрозоля технического углерода, поступающего через боковые вводы, к его общему расходу в аппарате.

Диаметр боковых вводов рассчитывался по уравнению [3]:

$$d_б = 1{,}17 \frac{C \cdot X}{\beta}, \quad C = f(Ar, Re_б), \quad X = f(w_ф, \tau_{ср}, G, \gamma), \tag{4}$$

где C – коэффициент боковых струй; X – дальнобойность боковых струй; β – отношение скорости истечения боковых струй к скорости витания частиц $w_{вит}$; $Re_б$ – число Рейнольдса для аэрозоля технического углерода на уровне расположения боковых вводов; G – производительность по готовому продукту; γ – угол раскрытия конической части аппарата.

Высота конической части аппарата определялась по уравнению [3]:

$$H_к = 0{,}6\, H_0 + 2{,}5\, X, \tag{5}$$

где H_0 – высота неподвижного слоя в аппарате.

Высота цилиндрической части гранулятора принималась равной высоте его конической части.

Гидравлическое сопротивление фонтанирующего слоя рассчитывалось по уравнению [3]:

$$\Delta P = 0{,}146\, Ar^{0{,}13} (1+\alpha)^{0{,}25}\, g\, \rho_н\, H_0, \tag{6}$$

где $\rho_н$ – насыпная плотность готового продукта.

Модельный расчёт производился для следующих данных:

1) $d_{ср}$=1,5 мм; d_0=240 нм; λ=30 мм/ч; n=2; m=0,3; b=0,4; p=3,25; $\tau_{ср}$=150 с;

2) φ_n=1,18; $\varphi_ф$=1,27; α=0,55; β=10; γ=42°; $d_б$=30÷42 мм; H_0=0,4 м.

На рисунке приведены основные результаты расчёта в графическом виде.

Из рисунка видно, что основные геометрические (габаритные) размеры гранулятора монотонно увеличиваются с увеличением его производительности по готовому продукту. При этом гидравлическое сопротивление фонтанирующего слоя остаётся практически постоянным.

Также необходимо отметить, что процесс сушки влажных гранул в аппарате осуществляется за счёт использования тепла аэрозоля технического углерода, т. е. не требует дополнительного подвода сушильного агента. Кроме того, при прочих равных условиях, масса гранулятора фонтанирующего слоя с дополнительными боковыми вводами теплоносителя составляет не более 1 тонны.

Таким образом, предлагаемый комбинированный аппарат для гранулирования и сушки технического углерода обладает высокой энергоэффективностью.

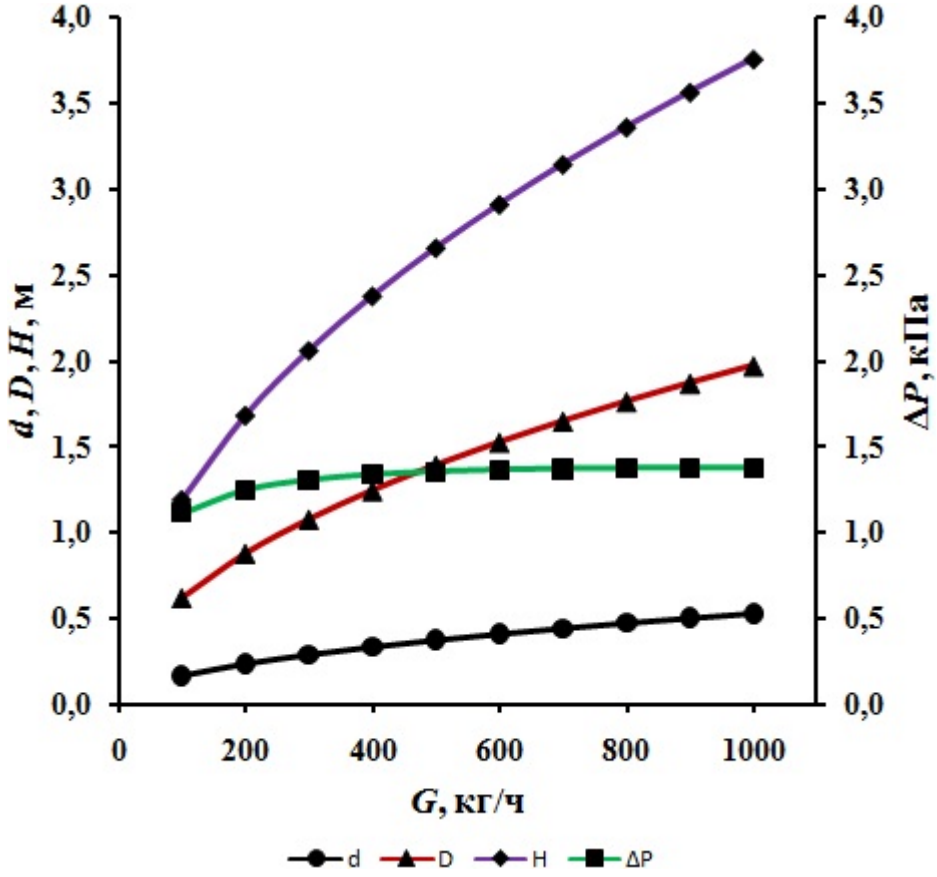


Рисунок – Основные результаты расчёта (d и D – соответственно диаметры нижнего и верхнего оснований конической части аппарата; H – высота аппарата)

Работа выполнена на базовой кафедре Волгоградского филиала ООО «Омсктехуглерод» «Процессы и аппараты производства технического углерода»

Литература:

1. Ивановский В.И. Технический углерод. Процессы и аппараты. Омск: ОАО «Техуглерод», 2004. – 228 с.

2. Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П. Гранулирование. Москва: Химия, 1991. – 240 с.

3. Кикалишвили О.И. Обезвоживание и грануляция в аппарате фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя (дис. канд. наук: 05.17.08). Москва, 1984. – 185 с.

4. Рева Л.С. Методы гидродинамического и теплового расчёта теплообменников с зернистой насадкой (дис. канд. наук: 05.17.08). Волгоград, 1984. – 310 с.

УДК 664.1.01

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОШПАРИВАНИЯ СВЕКЛОВИЧНОЙ СТРУЖКИ

Плахов В.В., Михайлова С.Н.
Казанский национально-исследовательский технологический университет,
E-mail: snmkazan@yandex.ru

Для предварительного ошпаривания свекловичной стружки перед поступлением ее в диффузионный аппарат разработаны устройства различной конструкции, которые описаны в работе [1]. Здесь же указаны и их недостатки. К ним относятся сложность конструкции, материалоёмкость и энергоемкость устройств, а также сложность в их обслуживании. К тому же аппараты не обеспечивают равномерный прогрев стружки, в результате чего неизбежно возникает локальный её перегрев.

Следует обратить внимание на пульсационные аппараты, которые показали, как отмечают авторы работы [2], достаточно эффективное их применение в процессах экстрагирования целевых компонентов из растительного сырья.

Экстрагирование сахарозы из свекловичной стружки является важнейшим этапом в технологии свеклосахарного производства, влияющее на все последующие стадии предприятия, в том числе на качество и выход готовой продукции. В современных условиях экстрагирования сахарозы из свекловичной стружки имеет противоточную обработку сырья специально подготовленным экстрагентом, (водой), при температуре 70-72 °С. Такая температура создает условия для денатурации белков и разрушения протоплазмы клеток свекловичной ткани, в следствии чего молекул сахарозы переходят из стружки в экстрагент.

Литературы:

1. Шекуров В.Н., Шекуров К.В. Устройство ошпаривания свекловичной стружки. Патент №148700, 2014.

2. В. Н. Шекуров, С. Н. Михайлова, К. В. Шекуров Экстрактор получения сахарного песка при использовании экологически обеспеченной технологии производства сахара// Вестник КНИТУ. 2015, т.18 №8, с. 242-245.

УДК 66.021.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРУБЕ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ

Половков А.М., Сагитдинов Ю.И., Поникаров А.С., Поникаров С.И.
Казанский национально-исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

Массообменные процессы, проводимые в системах газ (пар) - жидкость широко распространены в химической промышленности, и требуют больших энергозатрат, что оказывают существенное негативное воздействие на окружающую среду, и на экономическую эффективность нефтеперерабатывающих и химических производств.

Примерами таких процессов являются ректификация, абсорбция, сушка, конденсация, испарение и ряд других. Следует отметить, что в реальных процессах, реализуемых в химической и нефтехимической промышленности, разделению всегда подвергаются многокомпонентные смеси (МКС), а бинарные смеси встречаются достаточно редко, чаще всего при сведении МКС к псевдобинарным.

В настоящее время точность расчетов массообменных процессов не превышает 15% (хотя и может достигать 5-7% для некоторых хорошо изученных задач). В обобщении по коэффициентам переноса для бинарных смесей широко применяется теория подобия, которая трудно применима в условиях многокомпонентного массообмена. И на сегодняшний момент нет единой методики, которая бы позволяла с достаточно уверенной степенью точности производить расчет многокомпонентных смесей, при различных аппаратурных оформлениях и условиях взаимодействия фаз.

Снижения вредного воздействия на окружающую среду также связано с увеличением точности инженерных расчетов, которые приводят к снижению отходов производств, и загрязнении окружающей среды, что благоприятно сказывается и на экономии энергоресурсов, и на издержках производства.

Следует отметить также ряд негативных факторов, возникающих при протекании данных процессов, например, в газопроводах при транспортировке, наблюдаются отложения, что приводит к снижению их эффективности и производительности, уменьшению срока эксплуатации.

Энерго и ресурсосбережение объясняется рационализацией конструкции, использованием более эффективных режимов работы промышленного оборудования, а также уменьшение затрат на его изготовление и обслуживание.

Увеличение точности также способствует разработке и появлению нового более высокоточного и энергоёмкого оборудования, научных исследованиях и изысканиях, и позволит работать в высокоэффективных режимах.

На сегодняшних день имеется множество различных программных комплексов для расчета и моделирования гидродинамических процессов, учитывающие влияние массообменных факторов, однако не с высокой степенью точности. Программный комплекс ANSYS Fluent разрабатывался для гидродинамических расчетов, и позволяет производить расчеты массообменных процессов, и что более важно, позволяет использовать сторонние надстройки UDF, написанные на С подобном языке, для корректировки расчетных модулей, а следовательно и более углубленного влияния на процесс расчета модели.

Создание модели включает в себя следующие этапы: - выбор типа решателя (Fluid Flow (Fluent)), создание геометрической модели (Geometry), построение расчетной сетки (Mesh), задание свойств рабочего тела, выбор физических моделей для расчета, выбор модели турбулентности, задание граничных условий (Setup), обработка полученных результатов (Results).

Математическая модель трубы круглого сечения была построена по следующим параметрам: длина трубы (L) равна 10 м., диаметр (d) 0,2 м. Модель [рисунок 1] была разбита при помощи расчетной сетки, состоящей из кубических элементов размером 1 мм, порядок элементов «линейный».

Далее задавались граничные и начальные параметры: в трубу со скоростью 1 м/с поступает водно-спиртовой раствор (с массовой долью этилового спирта 30% и 70% воды) с температурой 344 К, физические свойства компонентов смеси представлены ниже [таблица 1]. Для модели была задана гравитация по оси X с ускорением свободного падения 9,81 м/с^2. Перепад давления в трубе равен нулю. Для создания моделируемой смеси была применена функция Species, в которой были созданы две mixture (смеси). В первой были заданы компоненты в жидкой фазе, а во второй те же компоненты в паровой. Для моделирования массообменного процесса в данной работе была выбрана модель k-ε. Стенка трубы, с шероховатостью 0,5 мм/мм и высотой выступа 0,0125 мм, нагрета до 400 К, материал стенки алюминий.

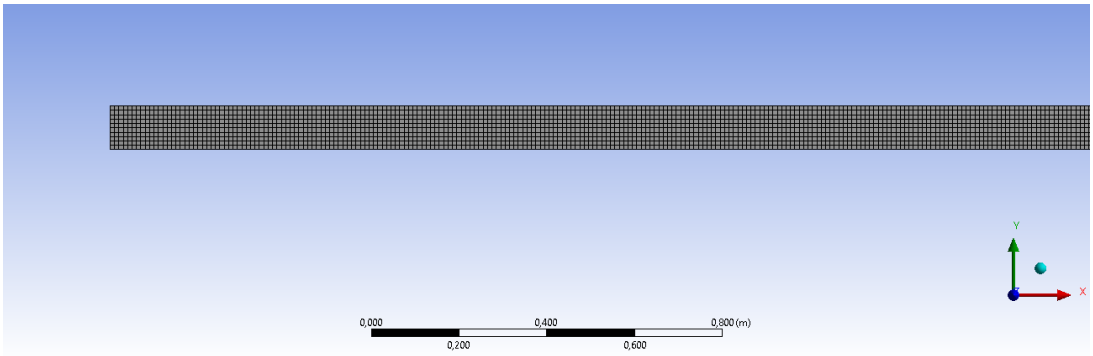


Рисунок 1 –Геометрическая модель с расчетной сеткой

Таблица 1

	Пары воды	Вода	Пары этанола	Этанол
Плотность (кг/м^3)	0,5542	998,2	2,06	790
Ср (удельная теплоемкость) (Дж/кг*К)	2014	4182	2407	2407
Теплопроводность (Вт/м*К)	0,0261	0,6	0,0145	0,182
Вязкость (кг/м*с)	$1,34*10^{-5}$	$1,003*10^{-3}$	$1,08*10^{-5}$	$1,2*10^{-3}$
Молекулярная масса	18,015		46,07	
Энтальпия	$-2,418*10^{8}$	$-2,858*10^{8}$	$-2,19*10^{8}$	0

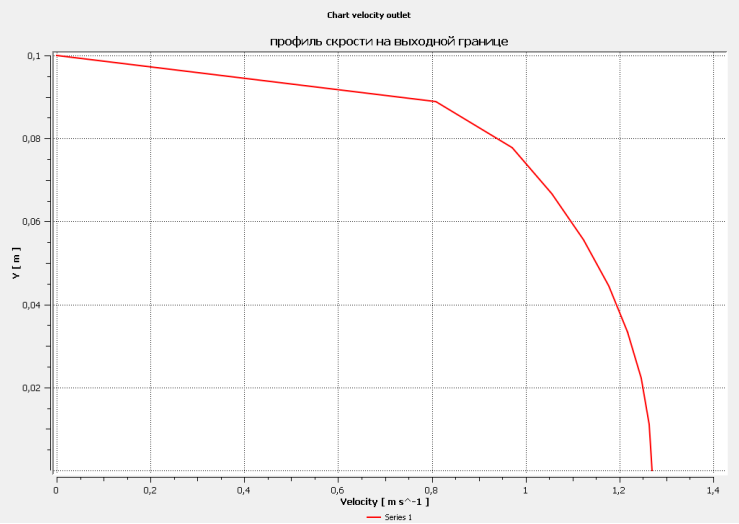
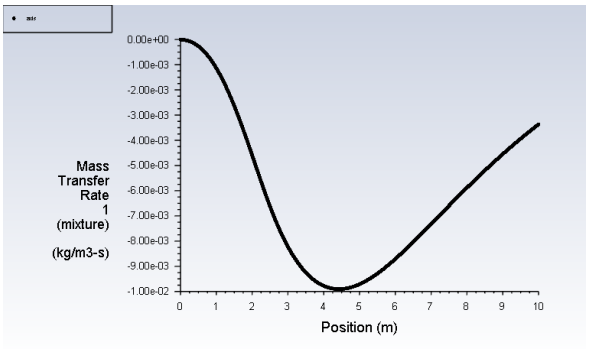
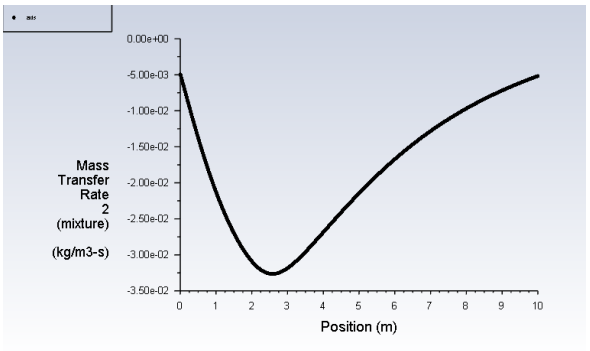


Рисунок 2 – Профиль поперечной скорости при турбулентном режиме течения

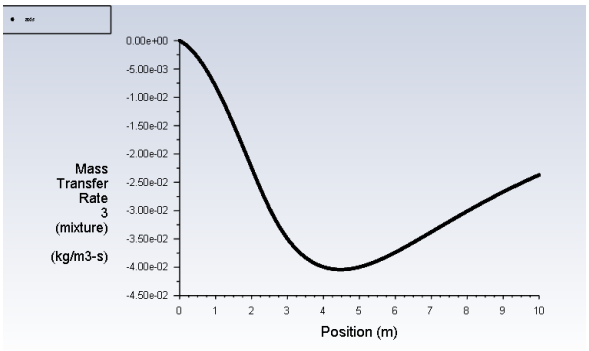
Результаты моделирования представлены ниже.



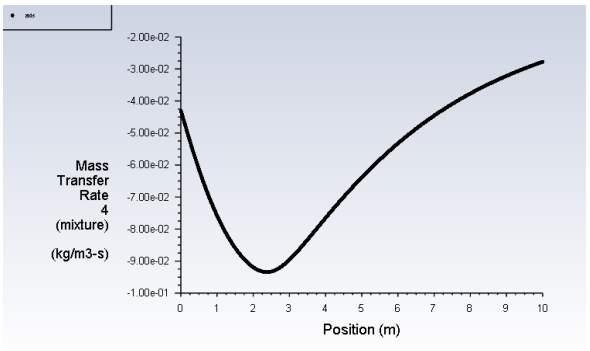
а.



б.



в.



г.

Рисунок 3 –Графики скоростей массопереноса по длине трубы:
а. – переход жидкой фазы этилового спирта в паровую; **б.** – переход паровой фазы этилового спирта в жидкую; **в.** – переход жидкой фазы воды в паровую; **г.** – переход паровой фазы воды в жидкую.

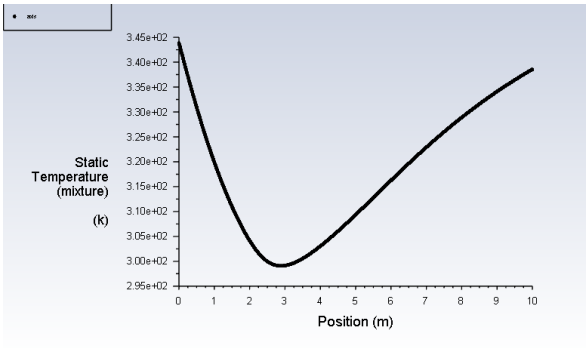


Рисунок 4 –График температуры по длине трубы

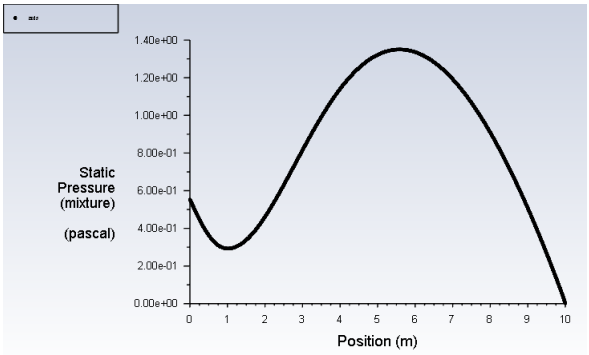
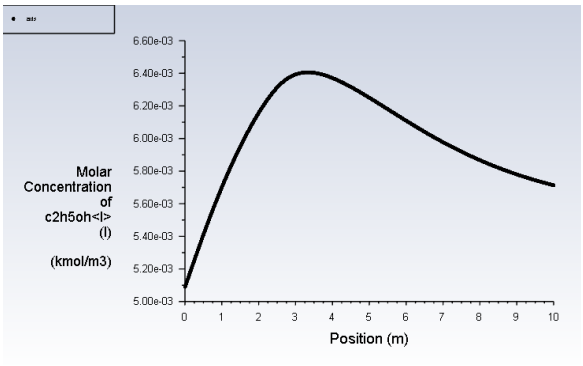
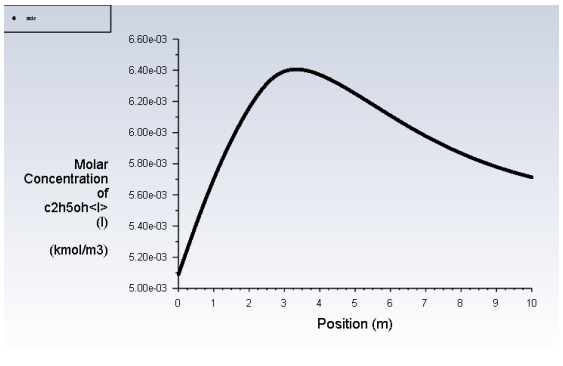


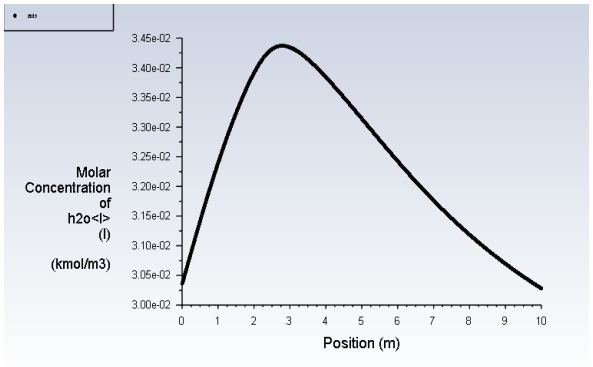
Рисунок 5 –График давления по длине трубы



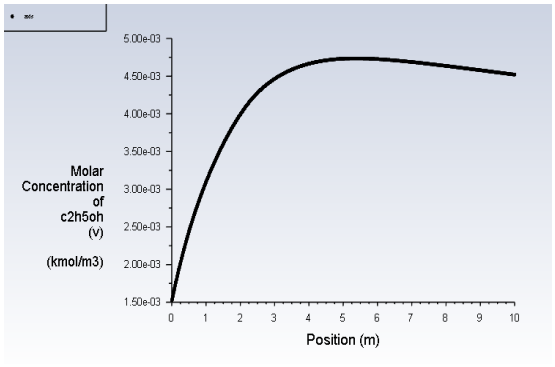
а.



б.



в.



г.

Рисунок 6 – Графики молярной концентрации по длине трубы:
а. – жидкой фазы этилового спирта; **б.** – паровой фазы этилового спирта;
в. – жидкой фазы воды; **г.** – паровой фазы воды.

Вывод:

1. Математическая модель процесса неэквимолярной массоотдачи, построенная в среде ANSYS Fluent, адекватно отображает как гидродинамические, так и массообменные аспекты протекания процесса в ламинарном и турбулентном режимах.

2. Выявлен эффект влияния массообмена на формирование профилей скоростей, описанной в ряде исследовательских работ.

Следует отметить, что исследование массообменных процессов при помощи математических моделей, представляется более рациональным подходом, так как физическое моделирование на экспериментальных установках чрезмерно затратное, и не обладает необходимой гибкостью при различных исследовательских задачах.

Данное обстоятельство наглядно показывает полезность и в некоторых случаях необходимость использования программно-вычислительных комплексов. Оценивая различные программные пакеты ANSYS Fluent выделяется рядом своих очевидных преимуществ:

1. Рациональное использование ресурсов компьютера, ввиду чего демонстрируется достаточно быстрая скорость расчета даже на средних компьютерах.

2. Возможность быстро и эффективно изменять, и подбирать нужные параметры для конкретной модели.

3. Наглядность полученных результатов, а также широкий функционал, по выводу полученной информации, и сопряжение с популярными СУБД такими как Microsoft Excel.

4. Достаточно высокая точность расчета, подтверждённая многократными численными экспериментами. Особенно стоит выделить тщательно отлаженный в программном пакете ANSYS Fluent механизм расчета гидродинамики, который оказывает существенное влияние на процессы массообмена.

Литература:

1. Ansys Fluent. User's Guide [Электронный ресурс] / Ansys Inc. Release 13.0 – Электрон. дан. и прогр. – Lebanon: Ansys Inc, 2010.

2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: ГХИ, 1961. – 831 с.

3. Поникаров А.С., Осипова Л.Э., Теляков Э.Ш., Поникарова И.Н. Массоотдача в системах газ-жидкость при испарении и конденсации чистых веществ в среде инертного газа // Вестник Казанского технологического университета. Казань: КГТУ. – 2014. – Т.17. – №2. – С. 127-131.

4. Софронов, М.А. Влияние температуры на массоперенос / М.А. Софронов, А.С. Поникаров, С.И. Поникаров // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология конф. – Казань : КНИТУ, 2018.-С.129-130

5. Поникаров, А.С. Кинетика многокомпонентной массоотдачи в системах газ(пар)-жидкость / А.С. Поникаров // Процессы и аппараты химических технологий : автореф. – Казань: КНИТУ , 2017 .-С.22

6. Теляков, Э.Ш. Kinetics of nonequimolar mass transfer in multicomponent gas (vapour) – liquid systems / Э.Ш. Теляков, А.С. Поникаров, Л.Э. Осипова // Theoretical foundations of chemical engineering – Москва , 2018 – С.11-23

7. Некоторые аспекты обеспечения промышленной безопасности опасных объектов: коллективная монография / В. А. Алексеев, С. И. Валеев, П. В. Вилохина [и др.] ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». Под общей редакцией С.И. Поникарова. – Казань: Издательство "Фэн" Академии наук Республики Татарстан, 2019. – 160 с. – ISBN 978-5-9690-0610-2. – EDN DCXZNE.

8. Поникаров, А. С. Кинетика многокомпонентной массоотдачи в системах газ(пар) - жидкость : специальность 05.17.08 "Процессы и аппараты химических

технологий" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Поникаров Артем Сергеевич. – Казань, 2017. – 22 с. – EDN XBNJUJ.

9. Telyakov, E. S. Kinetics of Nonequimolar Mass Transfer in Multicomponent Gas (Vapor)–Liquid Systems / E. S. Telyakov, A. S. Ponikarov, L. E. Osipova // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2018. – Vol. 52. – No 1. – P. 11-23. – DOI 10.1134/S0040579518010177. – EDN OYVRUD.

УДК 66.074.2:621.928.97

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЫЛЕОЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА В ПОЛОМ ФОРСУНОЧНОМ СКРУББЕРЕ

Ракова П.А., Меркулов А.А.
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
E-mail: kafotopvent1@rambler.ru

В работе Белявского Б.С. [1] получены значения полной эффективности очистки доменного газа в скруббере диаметром 6,5 м при удельном орошении 1,75÷3,0 л/м^3. Скорость очищаемого газа в скруббере при проведении опытов поддерживалась равной $V_{\text{Г}} = 1{,}34 \div 1{,}83$ м/с. Температура газа составляла 192÷265 °С, а на входе в скруббер после охлаждения 80 °С. Однако в [1] не приведен фракционный состав улавливаемой из доменных газов пыли.

Для получения фракционных коэффициентов проскока в полых форсуночных скрубберах произведен пересчет интегральных значений коэффициентов проскока K_{Σ} на фракционные K_{δ} по формуле

$$K_{\Sigma} = \int_0^{\infty} K_{\delta} \cdot g_0(\delta)\, d\delta, \qquad (1)$$

где $g_0(\delta)$ принята в виде логарифмически нормального закона с параметрами δ_{50} = 12 мкм и $\sigma_{\text{ч}}$ = 3,42 для пыли, уносимой доменными газами [2]. Там же [2] приведена плотность пыли, равная ρ_m = 3110 кг/м^3.

Фракционный коэффициент проскока в скруббере определялся зависимостью, полученной в работе [2]:

$$K_{\delta} = \exp\left(-a\,\text{Stk}_s^{n}\right), \qquad (2)$$

где $\text{Stk}_s = \tau_{\text{ч}} V_C / \delta_k$ – инерционное число Стокса, $V_C = V_k + V_{\text{Г}}$ – скорость частиц относительно падающих капель. Здесь скорость частиц принималась равной скорости газа, а скорость капель принималась равной скорости их стационарного осаждения и для нестоксовского режима сопротивления вычислялась из соотношения, полученного в [3],

$$V_k = V_{kC}\left(1 + 0{,}185\,\text{Re}_{kC}^{0{,}5}\right)^{-1}, \qquad (3)$$

где Re_{kC} – число Рейнольдса обтекания капли:

$$\text{Re}_{kC} = V_{kC}\delta_k \rho / \mu_{\text{Г}}; \qquad (4)$$

V_{kC} – скорость стационарного осаждения капли, вычисляемая при стоксовском законе сопротивления, $V_{kC} = \tau_k g$; ρ и μ_{Γ} – плотность и вязкость очищаемого газа. Размер капель жидкости принимался равным 800 мкм.

В формуле (2) *a* и *n* – это коэффициенты, которые были подобраны симплекс-методом, при использовании которого находился минимум невязки расчетных и полученных экспериментальным путем [1] интегральных значений фракционных коэффициентов проскока с последующим осреднением по всем опытным точкам.

По результатам обработки опытных данных [1] для фракционного коэффициента проскока в полом форсуночном скруббере получена зависимость

$$K_{\delta} = \exp\left(-34{,}3\,\mathrm{Stk}_{s}^{0{,}89}\right), \qquad (5)$$

которая может быть внесена в банк данных [2] универсального метода расчета инерционных пылеуловителей.

Проведем сравнение опытных фракционных коэффициентов проскока и найденных в результате расчета по формуле (1) с учетом зависимости (5). Приведем сравнение на рисунке 1.

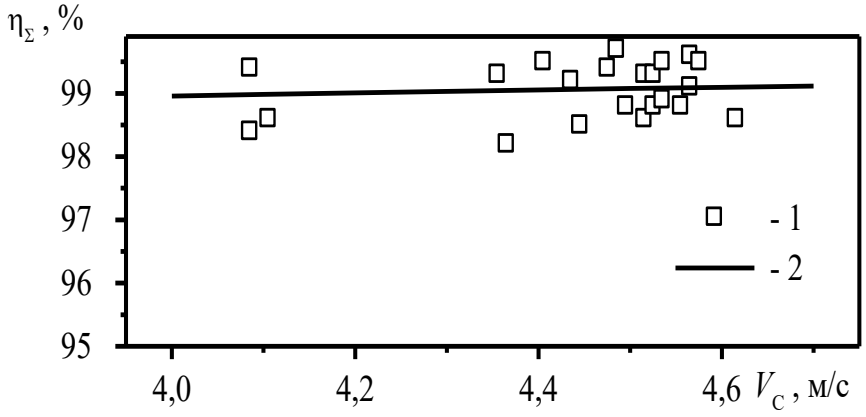


Рис. 1. Интегральная эффективность пылеочистки доменного газа в полом форсуночном скруббере: 1 – экспериментальные данные работы [1]; 2 – расчет по формуле (1) с учетом (5)

Таким образом, используя экспериментальные данные Белявского Б.С. [1] для фракционного коэффициента проскока в полом форсуночном скруббере получена зависимость (5) и введена в банк данных [2]. Так что, ПФС можно с использованием этой зависимости рассчитывать, применяя универсальную номограмму (рис. 2) и ее программное обеспечение, ограничивая высоту эффективного пылеулавливания величиной порядка 1,5÷2 м.

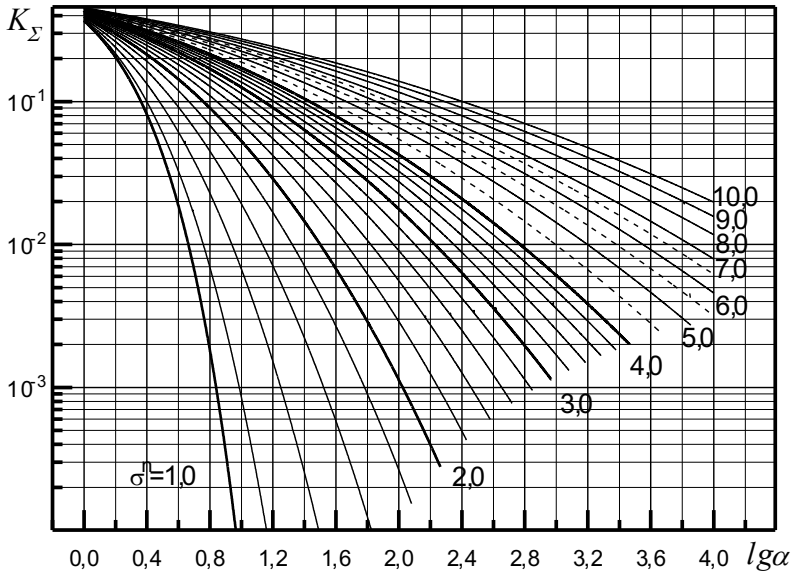


Рис. 2. Универсальная номограмма для расчета инерционных пылеуловителей

Литература:

1. Белявский Б.С. К вопросу об очистке доменного газа при работе на повышенном давлении / Б.С. Белявский // Сталь. 1954. № 7. С. 659-661.

2. Шиляев М.И. Методы расчета пылеуловителей: учебное пособие / М.И. Шиляев, А.М. Шиляев, Е.П. Грищенко; под ред. проф. М.И. Шиляева. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2006. – 385 с.

3. Дорошенко Ю.Н. Обобщенные зависимости для скорости витания частиц пыли при нестоксовском законе сопротивления их движения / Ю.Н. Дорошенко, А.А. Кукшенева // Труды VII Всероссийского студенческого научно-практического семинара «Энергетика: экология, надежность, безопасность» Томск: Изд-во ТПУ 2005. С. 222-225.

УДК 621.52

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТИ ВАКУУМНОЙ ИМПРЕГНАЦИИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ратушин И.В., Гаврилов А.В., Аляев В.А.
Казанский национально-исследовательский технологический университет,
E-mail: iratushin@gmail.com

Во многих отраслях промышленности широко используется технология пропитки изделий из различных материалов жидкими и жидко–дисперсными средами. Главная трудность данной технологии заключается в недостаточной степени проникновения пропитывающей среды в мелкие поры и каналы. В конечном итоге это приводит к снижению качества изделий и повышению их себестоимости. Поры в пропитываемых заготовках всегда заполнены воздухом, который мешает проникновению пропитывающих составов в них. Вследствие этого, даже если процесс пропитки повторяется, обеспечить полное заполнение пор и необходимое качество изделий трудно [1].

В современной промышленности широко используются процессы вакуумной пропитки. Вакуумная пропитка – это процесс насыщения капиллярно-пористых материалов различными составами при воздействии вакуума и давления.

Капиллярно-пористые материалы – это твердые тела, содержащие большое количество пустот, характерный размер которых весьма мал по сравнению с характерным размером тела.

Описание экспериментального стенда и методика проведения эксперимента

С целью возможности исследования скорости пропитки капиллярно-пористых материалов при различных условиях предлагается модернизация собранного на кафедре «Вакуумной техники электрофизических установок» ФГБОУ ВО «КНИТУ» экспериментального стенда, на котором проводились исследования процессов пропитки пиломатериалов и костных матриксов [2,3].

Экспериментальный стенд (рис.1) включает в себя: систему откачки на базе спирального вакуумного насоса ISP 250C; рабочую камеру; камеру с пропиточной жидкостью; ресивер; соединительную и запорную арматуру; краны для напуска жидкости; средства измерения давления и измерительный комплекс для определения скорости импрегнации.

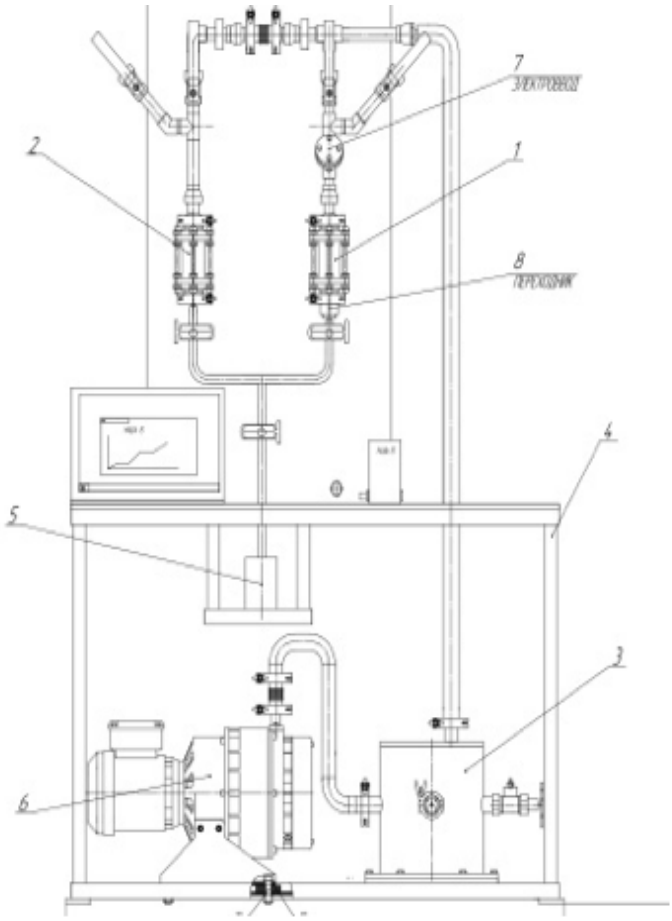


Рис. 1 Экспериментальный стенд: 1 – рабочая камера; 2 – камера для пропиточной жидкости; 3 – ресивер; 4 – рама; 5 – сосуд с пропиточной жидкостью; 6 – вакуумный насос; 7 – электроввод; 8 – вакуумный переходник

Рабочая камера 1, камера с пропиточной жидкостью 2 и ресивер 3 представляют собой цилиндрические камеры с быстросъемными фланцевыми соединениями стандарта KF для подключения средств откачки и измерения.

Подача и слив пропиточной жидкости в камеру 2 осуществляется при помощи системы заполнения, включающей сосуд 5, что минимизирует контакт жидкости с окружающей средой. Стенд выполнен на единой раме 4.

Для вывода контактов исследуемого образца из вакуумной камеры спроектирован электроввод Также разработан вакуумный переходник для возможности измерения скорости «сквозной» пропитки.

Методика проведения эксперимента

Исследуемый образец представляет собой цилиндр из древесины диаметром 16 мм и длиной 70 мм.

Для сравнения предлагается провести процесс импрегнации тремя различными методами:

1) Выдержка в пропитывающем растворе под атмосферным давлением;

2) «Традиционная» вакуумная пропитка: образец помещается в камеру 1, которая откачивается до давления 10-15 мм рт. ст. Затем пропиточная жидкость под действием разности давлений перетекает из камеры 2 в камеру 1, где образец выдерживается в жидкости под вакуумом определенное время. После чего откачивается камера 2 и под действием разности давлений жидкость перетекает обратно в камеру. Камера 1 опять откачивается до давления 10-15 мм рт. ст., после чего в нее напускается сухой воздух до давления равного атмосферному и образец извлекается;

3) «Сквозная» пропитка: один конец образца находится в сосуде с пропиточной жидкостью под атмосферным давлением. Другой конец находится в камере 1, которая откачивается до давления 10-15 мм рт. ст. Образец выдерживается определенное время, после чего в камеру 1 напускается сухой воздух до давления равного атмосферному и образец извлекается.

Литература:

1. Гаврилов А.В. Исследование процесса вакуумно-импульсной пропитки пиломатериалов / Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2011. - №8. – С. 65-67.

2. Игнатьев Н.В., Аляев В.А., Гаврилов А.В. Установка для импрегнации капиллярно-пористых материалов органическими соединениями при давлениях ниже атмосферного / В книге: Интенсификация тепло-массообменных процессов в химической технологии. Тезисы докладов Седьмой Российской научно-технической студенческая конференции, приуроченной к юбилейной дате 100-летию со дня рождения А.Г. Усманова. - 2020. - С. 82-84.

3. Фазуллин А.Р., Игнатьев Н.В., Гаврилов А.В., Максудов Р.Н., Аляев В.А. Исследование процесса вакуумной импрегнации капиллярно-пористых материалов / В сборнике: Вакуумная техника и технология. Десятая Российская студенческая научно-техническая конференция: материалы конференции. Казань, - 2021. С. - 163-164.

УДК 621.521

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПИРАЛЬНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

Савинова А.В., Назаренко Д.С., Фахретдинов М.Ф., Тюрин А.В.
Казанский национально-исследовательский технологический университет,
АО «Вакууммаш»,
E-mail: tyrin92@mail.ru

В химической промышленности достаточно широко распространены пластинчато-роторные и золотниковые насосы, но в последнее время они все чаще стали заменяться на безмасляную альтернативу – насосы вакуумные спиральные (НВСп) [1 -3].

НВСп относятся к бесконтактным машинам, поскольку перемещение подвижного спирального элемента происходит при наличии гарантированных зазоров. В связи с этим основные характеристики НВСп в первую очередь определяются обратными перетеканиями через щелевые каналы. Спецификой спирального насоса является очень широкий интервал рабочих давлений (от 1 до 10^5 Па), за счет чего режим течения в каналах изменяется от молекулярного через переходный до вязкостного. Соответственно в математической модели, в условиях разрежения, перетекания газа через каналы должны рассчитываться во всех режимах течения, причем с обязательным учетом подвижности стенки. В работе [4] учет подвижности стенок достигается за счет решения дифференциального уравнения, описывающего течение газа в канале. Именно эта модель спирального насоса учитывает влияние теплообмена, тепловых и силовых деформаций рабочих элементов, сопротивления входа и выхода. Поэтому базовые расчеты характеристик спирального насоса в настоящей работе будем проводить именно с помощью матмодели, представленной в работе [4].

Для дальнейшего использования разрабатываемой матмодели требуется проверка ее адекватности. С этой целью можно, например, использовать быстроту действия насоса. При экспериментальном определении быстроты действия согласно ГОСТ Р 32974.1 – 2016. «Вакуумная технология. Стандартные методы измерения характеристик вакуумных насосов. Часть 1. Общие положения» [5] измеряется поток газа, напускаемый в камеру, и среднее давление в откачиваемом объеме. Поэтому быстрота действия не очень чувствительна к изменению факторов, влияющих на процесс откачки. Гораздо более чувствительны к изменению любых конструктивных и эксплуатационных факторов индикаторные диаграммы, т.е. зависимости давления внутри рабочей полости насоса от угла орбитального движения подвижной спирали..

Объектом теоретического и экспериментального исследования в данной работе являлся НВСп (рис. 1), имеющий геометрическую быстроту действия 3,5 л/с при 1500 об/мин. Подробно описание стенда испытаний и методики проведения эксперимента представлено в работах [6, 7].

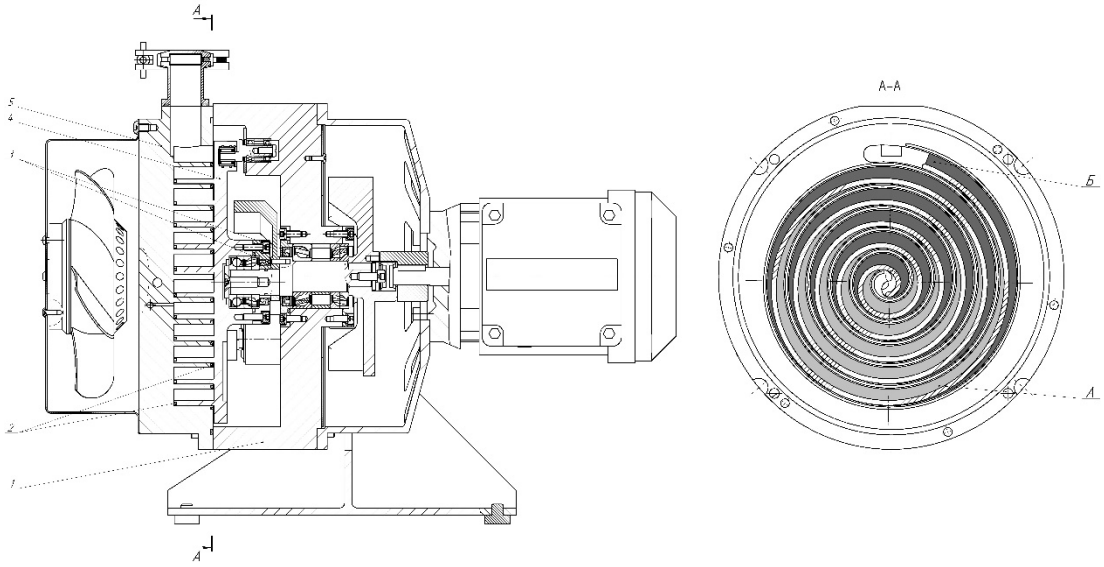


Рис. 1. Схема спирального вакуумного насоса НВСп:
1 – корпус насоса с электродвигателем; 2 – торцевой уплотнитель;
3 – манжеты; 4 – подвижный СЭ; 5 – неподвижный СЭ

Экспериментальные индикаторные диаграммы получены при варьировании следующих факторов, влияющих на процесс откачки:

- величина монтажного радиального зазора между спиралями устанавливалась равной 0,09; 0,11 и 0,16 мм за счет использования приводных валов с эксцентриситетами 4,61; 4,59 и 4,54 мм соответственно;
- частота вращения приводного вала изменялась от 500 до 1750 об/мин с шагом в 250 об/мин при помощи частотного преобразователя;
- давление на входе в насос изменялось от 1,33 кПа до 26,6 кПа за счет напуска газа в откачиваемый объем.

Индикаторные диаграммы были получены для внешней и внутренней полостей спирального механизма с тремя вариантами радиального зазора, при шести разных частотах вращения приводного вала и шести разных давлениях на входе в насос. Внешняя рабочая полость Б (рис.2) образована внутренней стенкой неподвижной спирали и внешней стенкой подвижной спирали. Внутренняя А – внешней стенкой неподвижной спирали и внутренней стенкой подвижной спирали.

На рис. 2 показаны индикаторные диаграммы для внешней рабочей полости при различных входных давлениях. Можно видеть, что наибольшие отклонения эксперимента и расчета наблюдаются при низких входных давлениях, что связано с ростом погрешности при измерении давления, а также погрешностями при

расчете, связанными с ростом влияния подвижности стенок спирали при понижении давления.

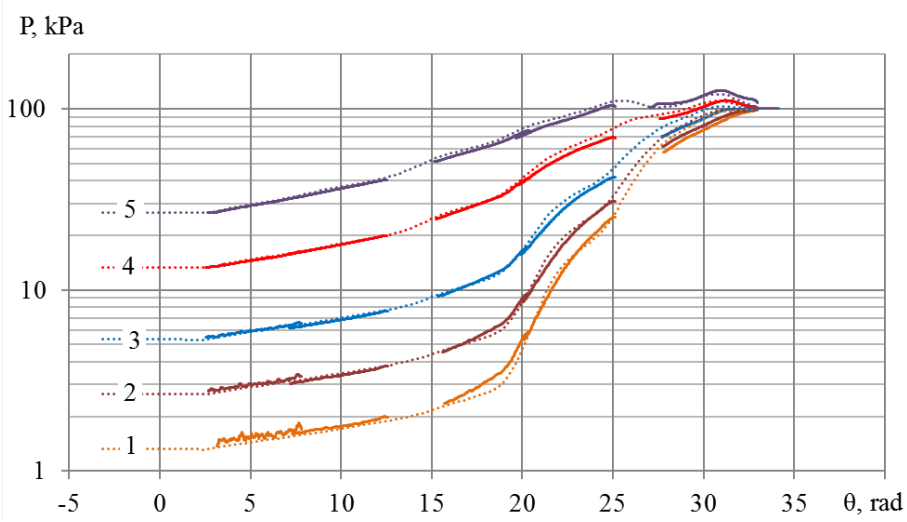


Рис. 2. Индикаторные диаграммы (n = 1500 об/мин) для внешней полости НВСп при различных давлениях на входе в насос:
1 – 1,33 кПа, 2 – 2,66 кПа, 3 – 5,32 кПа, 4 – 13,3 кПа, 5 – 26,6 кПа

При давлениях выше 10 кПа в отсеченных полостях, ближайших к выходу, наблюдается пережатие. т.е. давление в полости превышает давление на выходе насоса.

Сравнение расчетных и экспериментальных индикаторных диаграмм, показывает хорошую сходимость, максимальное отклонение не превышает 15 %. Существующее различие экспериментальных и расчетных диаграмм вызвано сложностью определения действительного зазора между спиралями, который зависит от точности изготовления, величин зазоров в подшипниках. Наибольшее отклонение наблюдается ближе к концу процесса сжатия, что объясняется накоплением ошибки в процессе решения дифференциальных уравнений рабочего процесса в математической модели.

Литература:

1. Бурмистров, А.В. Некоторые аспекты выбора безмасляных насосов среднего вакуума / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев, А.А. Райков // Вестник Казанского технологического университета. - 2013, Т.16. – № 10. - С.220-223.

2. Хабланян М.Х Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.1. Инженерно-физические основы: учеб. пособие / М.Х. Хабланян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. - 237 с.

3. Бурмистров А.В. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: дис…докт.техн.наук / А. В. Бурмистров; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2006. - 363с.

4. Burmistrov A., Salikeev S., Raykov A., Fomina M. Mathematical model of working process of oil free scroll vacuum pump: Influence of leakage and heat transfer on pumping characteristics//Vakuum in Forschung und Praxis. 2017. Vol. 29. Is. 6. P. 28-31.

5. ГОСТ Р 32974.1 – 2016. Вакуумная технология. Стандартные методы измерения характеристик вакуумных насосов. Часть 1. Общие положения.

6. Бурмистров А.В. Стенд исследовательских испытаний безмасляных спиральных вакуумных насосов / А.В. Бурмистров, А.А. Райков, С.И. Саликеев, А.В. Гаврилов, В.П. Матвеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2013 , Т.16. - № 14 С. 174-177.

7. Tyurin A., Burmistrov A., Salikeev S., Raykov A., Fomina M. Indicator diagrams of oil free scroll vacuum pump//Vakuum in Forschung und Praxis. 2019. Vol. 31. Is. 4. P. 34-37.

УДК 621.514

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В РАБОЧЕЙ ПОЛОСТИ РОТОРНОГО КОМПРЕССОРА ВНУТРЕННЕГО СЖАТИЯ

Сайфетдинов А. Г., Куликов А.С.
Казанский национально-исследовательский технологический университет,
E-mail: almazy_kstu@mail.ru

При математическом моделировании рабочего процесса в роторной машине учет теплообмена между газом её рабочей полости и стенками представляется затруднительным. Это связано с особенностью конструкции таких машин, которая усложняет установку измерительных датчиков.

В этой работе предлагается методика определения коэффициента теплоотдачи в рабочей полости воздушного роторного компрессора внутреннего сжатия [1].

Температура внутренней поверхности стенок замеряется термопарными датчиками, установленными от патрубка всасывания до патрубка нагнетания (рис.1). Диаметр проволоки хромель-копелевых термопар (ХКТ) этих датчиков составляет 0,02 мм. Температура газа замеряется таким же термопарным датчиком, расположенным на вращающемся роторе компрессора.

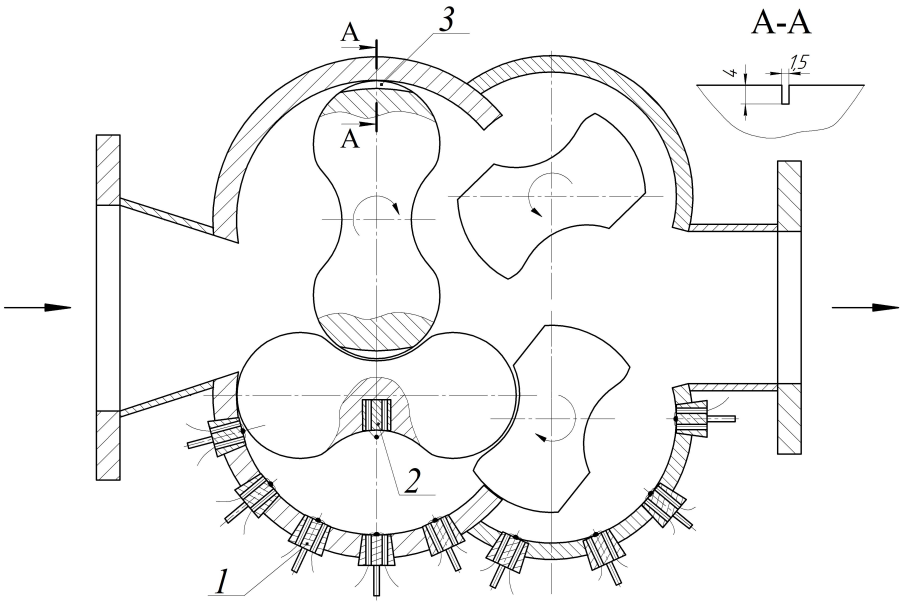


Рис. 1. Расположение датчиков на корпусе и роторе компрессора:
1 – датчик замера температуры внутренней стенки цилиндра; 2 – датчик замера температуры газа рабочей полости; 3 – проточка

Для замера давления в полости машины на этом же роторе установлен чувствительный элемент давления (ЧЭД). Сигнал с вращающейся ХКТ и ЧЭД снимается через ртутно-амальгамированный токосъемник ТРАК-8. Температура

наружной поверхности стенки замеряется при помощи ХКТ, приваренных непосредственно к её поверхности. Диаметр проволоки ХКТ 0,5 мм**.**

Спай ХКТ датчика замера температуры газа, установленного на вращающемся роторе, выступает над поверхностью ротора на 3,5 мм. Чтобы избежать повреждение спая во время работы компрессора, на внешних поверхностях ответного ротора выполнена проточка глубиной 4 мм и шириной 1,5 мм.

Снятие и обработка сигнала с термопарных датчиков, чувствительного элемента давления и углового отметчика производится созданным на базе персонального компьютера специализированным измерительным комплексом, предназначенным для исследования быстропротекающих процессов. Он включает в себя сам измерительный прибор и плату ввода-вывода L-780, с помощью которой прибор подключается к персональному компьютеру (рис.2).

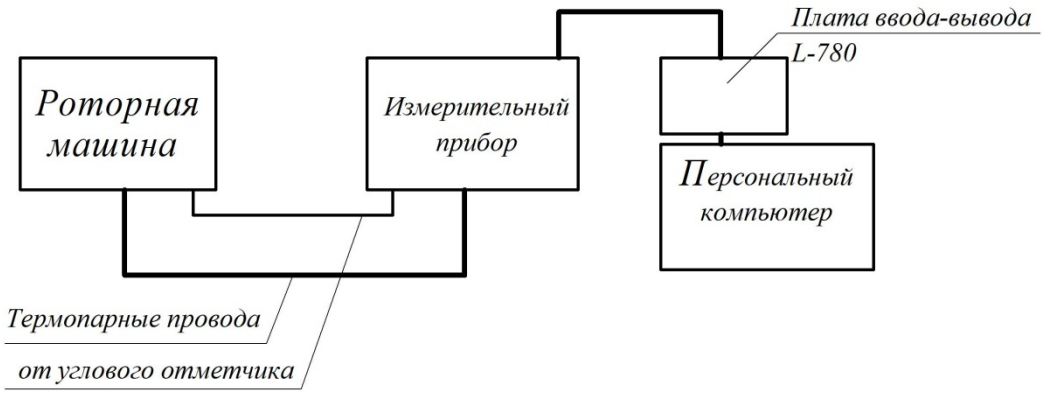


Рис. 2. Схема измерительного комплекса

Плата L-780 является быстродействующим и надежным устройством для многоканального сбора информации и обработки сигналов на уровне программирования. Для выполнения измерений может быть задействовано любое количество измерительных каналов из числа имеющихся (16), причем в любой последовательности.

Для сбора и обработки сигналов используется программное обеспечение Temperature Lab, разработанное в среде программирования LabVIEW. К параметрам измерений данной программы относятся (рис.3):

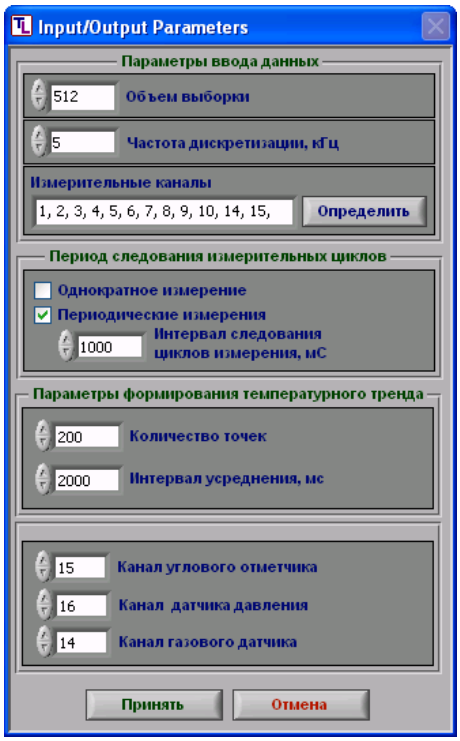


Рис. 3. Меню задания параметров измерений:
1. объем выборки; частота;2. дискретизации; 3. количество измерительных каналов; 4. периодичность измерений; 5. периодичность записи данных в тренд; 6.максимальная длина тренда (количество точек); 7. номера измерительных каналов платы ввода/вывода, используемых для подключения углового отметчика, датчика давления и газового датчика

Могут быть установлены следующие значения объема выборки (количества отсчетов): 512, 1024, 2048, 3072 или 4096.

В отличие от объема выборки, значение частоты дискретизации может быть установлено любым в пределах до 400 кГц (максимальная частота дискретизации платы L-780).

Температурное поле внутри стенки при экспериментально определенных температурах на ее границах (внутренняя и наружная поверхность) вычисляется с применением численного метода решения задачи нестационарной теплопроводности – метода элементарных балансов (метод Ваничева) [2].

Коэффициент теплоотдачи определяется из совместного решения уравнений Фурье и Ньютона-Рихмана по формуле

$$\alpha = \lambda_{ст}(t_{вн} - t_1)/(\delta(t_г - t_{вн}))$$

где $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки; δ - толщина элементарного участка стенки; $t_г$, $t_{вн}$ – мгновенные температуры газа и внутренней стенки, t_1 – температура первого элементарного участка стенки в методе Ваничева.

Примененный метод позволяет получить зависимость изменения температуры стенки и газа от угла поворота ротора, необходимую для определения мгновенных коэффициентов теплоотдачи.

Литература:

1. Хамидуллин М.С. Разработка и исследование роторного компрессора внутреннего сжатия на основе геометрического анализа и моделирования процессов в рабочих камерах: дис. … к. т. н. / М.С. Хамидуллин. – Казань: Изд-во Казан. химико-технол. ин-та им. С.М. Кирова, 1992. – 193 с.

2. Теоретические основы тепло- и хладотехники: в 2ч./Под ред. Э.И. Гуйго. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1976. Ч.2. 224с.

УДК 66.021.3/4

УПРАВЛЕНИЕ РАСХОДАМИ ПАРОЖИДКОСТНЫХ ФАЗ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕКТИФИКАЦИИ

Санников И.В., Мадышев И.Н.
Нижнекамский химико-технологический институт,
E-mail: shadowise@bk.ru

Одним из ключевых направлений оптимизации производственного процесса в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности является снижение энергозатрат [1]. Процесс ректификации достаточно хорошо изучен, но еще оставляет возможности для повышения его эффективности и снижения энергозатрат. В качестве направления повышения эффективности рассматривается процесс термической ректификации, где посредством отвода тепла с тарелок можно создавать определенные температурные условия. Так же при отводе тепла происходит процесс внутреннего флегмообразования, так как поднимающиеся пары частично конденсируют внутри колонны.

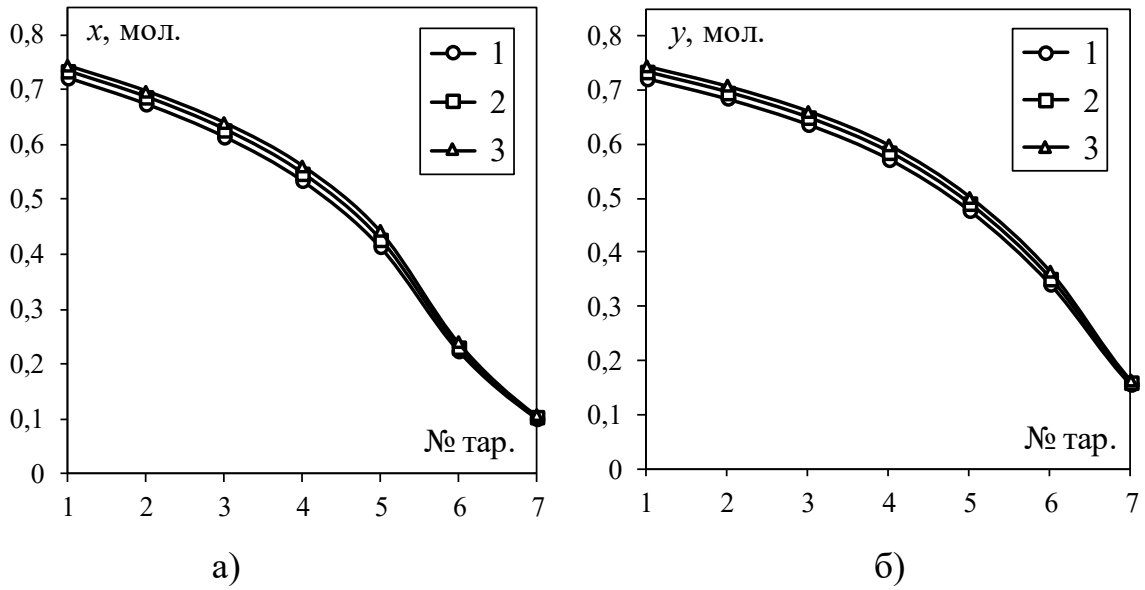
Целью исследования является определение влияния количества отведенного из тарелки тепла на расходы паров и флегмовой жидкости в ректификационной колонне.

В колонну, состоящую из 11 тарелок, поступает исходная бинарная смесь, этиловый спирт–вода, при температуре 80°С [2]. Тарелка питания принята 6. Массовый расход исходной смеси принимался равным 1000 кг/ч. Массовая доля этанола в исходной смеси составляла 0,4. Температура верха колонны составляла 79°С, давление верха – 101,325 кПа. Перепад давлений в колонне задавался равным 30 кПа. Содержание этилового спирта в кубе допускается не более 0,00006 масс. Были произведены расчеты колонны без отвода тепла и с отводом тепла из верхней тарелки. Расчеты по определению расходов и составов жидкой и паровой фаз на каждой тарелке производились при помощи аналитического метода расчета «от тарелке к тарелке» изложенным в литературе [3-4]. Вне зависимости от количества отведенного тепла из 1-й тарелки колонны суммарный тепловой поток в конденсаторе и дефлегматоре оставался неизменным.

На графиках рис. 1 видно, как меняются мольные концентрации этилового спирта в жидкой и паровой фазах на тарелках колонны в зависимости от количества отведенного тепла.

Чем выше количество отведенного тепла, тем более высокие значения мольных концентраций будут достигаться. Это связано с тем, что при отводе тепла из верхней тарелки пары преимущественно высококипящего компонента начинают частично конденсироваться, а низкокипящий компонент испаряется. Таким

образом, дополнительный отвод тепла приводит к повышению концентраций легколетучего компонента.



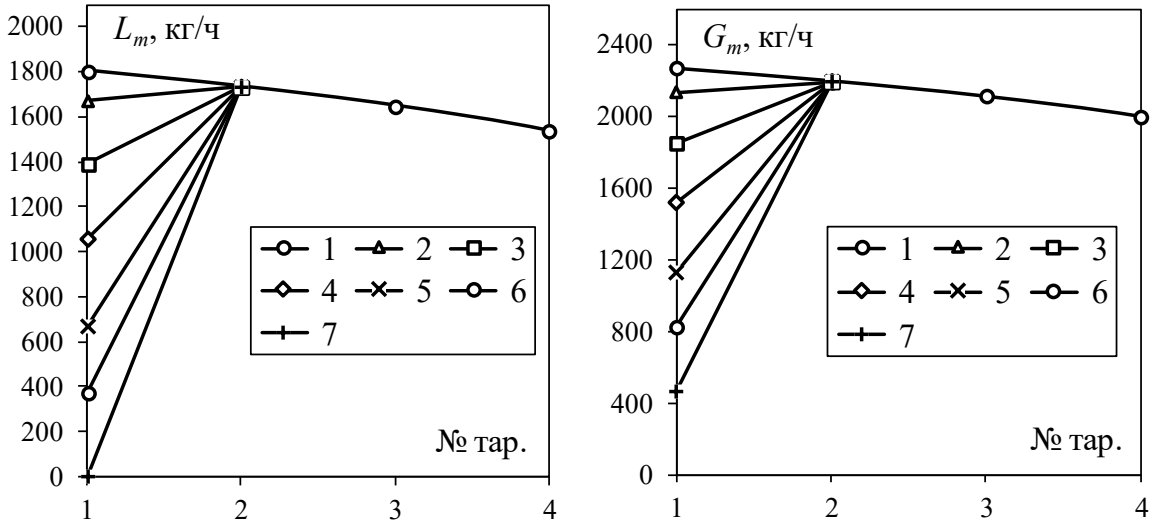
а) б)

Рис. 1. Мольные концентрации этилового спирта в жидкой (а) и паровой (б) фазах в зависимости от номера тарелки при различном количестве отводимого тепла из верхней тарелки $Q_{отв}$, кВт: 1 – 0; 2 – 125; 3 – 333,3.

Далее посредством расчетов были определены изменения массовых расходов разделяемой смеси в жидкой и паровой фазах в зависимости от количества отведенного из верхней тарелки тепла. Результаты данных расчетов отображены в виде графиков на рис. 2. Видно, что при увеличении количества отводимого тепла снижается массовый расход как жидкой, так и паровой фаз. Чем больше тепла отводится, тем более интенсивен данный процесс. Связано это с конденсацией поднимающихся паров посредством отвода тепла, что ведет к снижению массового расхода паров и поступающей в колонну жидкости в виде флегмы. Так, при отводе теплоты равной 416,7 кВт от верхней тарелки массовый расход жидкой фазы уменьшается в 4,5 раза по сравнению с отводом 41,7 кВт тепла.

Далее при помощи расчетов было определено влияние количества отведенного тепла из верхней тарелки на значение флегмового числа колонны. Данная зависимость отражена в виде графика, представленного на рис. 3. С увеличением количества отведенного тепла происходит снижение значения флегмового числа. Объясняется это тем, что посредством отвода тепла происходит конденсация паров и образование флегмы внутри колонны. Количество паров, поступающих в конденсатор, снижается и, следовательно, изменяется расход жидкости на выходе из конденсатора, что напрямую влияет на флегмовое число. При этом, чем больше тепла будет отводиться из тарелки, тем более низкие значения флегмового числа будут. Как видно из графика рис. 3, при значении соотношения

количества отведенного тепла из верхней тарелки к суммарному тепловому потоку в конденсаторе и дефлегматоре равному 0,65 флегмовое число имеет значение 0,8, что в 4 раза меньше, чем при значении соотношения $Q_{отв}/Q_{\Sigma} = 0{,}35$.



а) б)

Рис. 2. Массовые расходы жидкой (а) и паровой (б) фаз разделяемой смеси в зависимости от номера тарелки при различном количестве отводимого тепла из верхней тарелки $Q_{отв}$, кВт: 1 – 0; 2 – 41,7; 3 – 125; 4 – 222,2; 5 – 333,3; 6 – 416,7; 7 – 522,2.

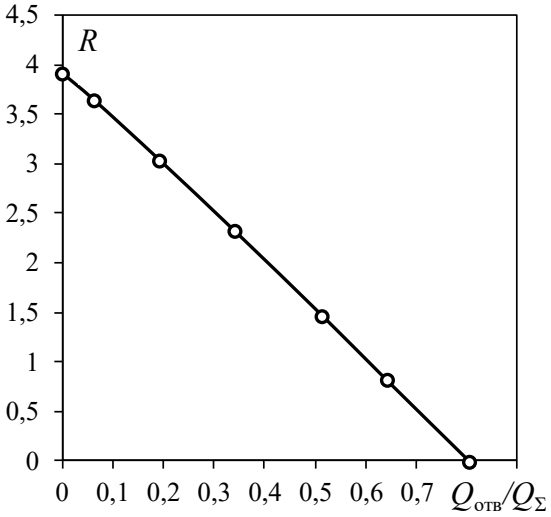


Рис. 3. Изменение флегмового числа в зависимости от соотношения количества отведенного тепла из верхней тарелки к суммарному тепловому потоку в конденсаторе и дефлегматоре

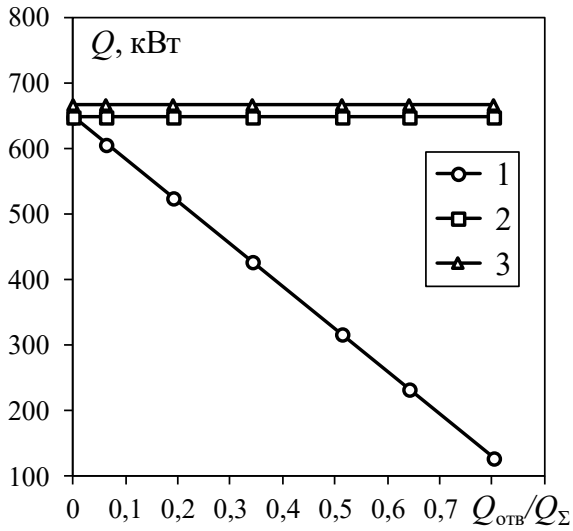


Рис. 4. Зависимость тепловой мощности от соотношения количества отведенного тепла из верхней тарелки к суммарному тепловому потоку в конденсаторе и дефлегматоре: 1 – конденсатор; 2 – конденсатор и встроенный дефлегматор; 3 – кипятильник колонны

График на рис. 4 показывает, что с увеличением количества отводимого тепла из верхней тарелки суммарное значение количества дополнительно отводимого тепла и количества теплоты, отводимого конденсатором, остается неизменным. Следовательно, чем больше тепла отводится из верхней тарелки, тем более низкие значения тепловой мощности в конденсаторе будут. Количество теплоты, подаваемое в кипятильник, так же оставалось неизменным и составляло 666,67 кВт.

В результате проведенного исследования было выявлено влияние количества отведенного тепла из верхней тарелки на мольные концентрации разделяемых веществ, массовые расходы жидкой и паровой фаз, а также флегмовое число. При отводе тепла наблюдаются более высокие значения мольных концентраций, что оказывает положительное влияние на качество получаемого продукта. Также отвод тепла ведет к уменьшению флегмового числа, что приводит к снижению энергозатрат насоса, перекачивающего флегму и дистиллят, так как снижается массовый расход жидкости на выходе из конденсатора и, как следствие, общий объем перекачиваемой жидкости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00001, https://rscf.ru/project/21-79-00001/.

Литература:

1. Олевский, В.М. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура / В.М. Олевский, В.Р. Ручинский, А.М. Кашников, В.И. Чернышев. – М.: Химия, 1988. – 240 с.

2. Рабинович Г.Г. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки: Справочник/ Г.Г. Рабинович, П.М. Рябых, П.А. Хохряков и др.; Под ред. Е.Н. Судакова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1979. – 568 с.

3. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии/ К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – М.: Альянс, 2013.– 576 с.

4. Стабников В.Н. Расчет и конструирование контактных устройств ректификационных и абсорбционных аппаратов/ В.Н. Стабников. – Киев: Техника, 1980. – 208 с.

УДК 504.06

РЕЖИМ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКА В УСЛОВИЯХ ЕГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ

Семанина Н.Д., Бадретдинова Г.Р., Дмитриев А.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Казанский государственный энергетический университет,
E-mail: natali_nk09@mail.ru
E-mail: nice.badretdinova@mail.ru

Теплообменные аппараты являются неотъемлемой частью технологических процессов на производствах нефтяной и газовой отрасли, пищевой промышленности, водоподготовки на химических объектах, целлюлозно-бумажном производстве и т. д. [1-4]. Применение теплообменников необходимо с целью эффективного использования энергоносителей и снижения затрат на потери энергии. Однако во время эксплуатации промышленного теплообменного оборудования могут происходить различного типа ситуации или процессы, приводящие к ухудшению характеристик аппаратов, нарушению их работоспособности, вследствие чего снижается производительность и экономия предприятия. Одной из таких проблем является загрязнение поверхности теплообмена твердыми частицами, которое приводит к изменению тепловых хакрактеристик аппаратов.

Загрязнения – это нежелательные отложения или твердые частицы, которые содержатся и транспортируются в воздухе, и образуются в результате технологических процессов таких как, переработка твердых или жидких отходов и сжигание топлива, при производстве бумаги санитарно-гигиенического назначения, в молочных комбинатах, на цементных заводах и др. Поэтому данной проблеме уделяют большое внимание. Среди многих зарубежных и отечественных авторов наблюдается большое количество экспериментальных и численных исследований по прогнозированию механизмов осаждения твёрдых частиц на поверхность теплообмена, их влияние на процесс теплопередачи, а также способов снижения загрязнений [5, 6]. Удаление загрязнений или по крайней мере снижение количества осаждаемых твердых частиц на поверхность теплообмена способствует улучшению процесса теплопередачи, а также снижению гидравлического сопротивления потоку.

В данной работе перед авторами была поставлена задача по определению режима работы теплообменного аппарата, предназначенного для передачи тепла от парогазовой смеси, содержащей твердые частицы на предприятии «ПАЛП Инвест». В ходе исследования была получена зависимость для расчета времени, через которое необходимо восстанавливать поверхность путем смывания ее водой.

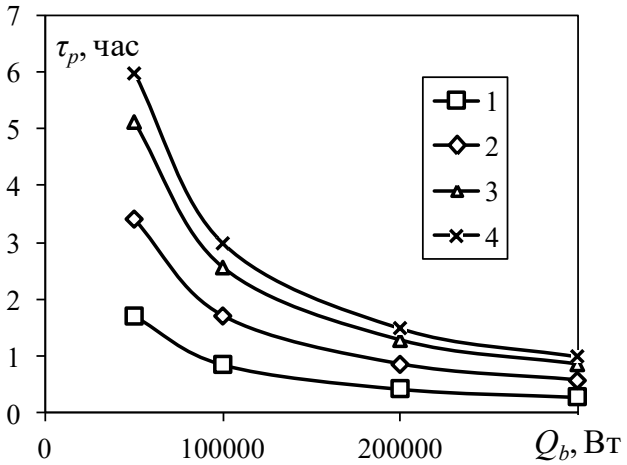


Рис. 1. Зависимость времени работы между процессом восстановления от теплового потока и объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности. P_{V1} = 750 руб./м^3; $P_1 = 1{,}23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2{,}7 \cdot 10^{-7}$ 1/с; V_1, м^3: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 1,75

Из рис. 1 видно, что период восстановления поверхности заметно снижается с увеличением значения восстановленного теплового потока. Это объясняется необходимостью снижения термического сопротивления создаваемого слоем осадка. Например, если для поддержания теплового потока 50 кВт необходимо смывать осадок каждые 6 часов, то для поддержания теплового потока в 200-300 кВт необходимо восстанавливать поверхность каждые 30 минут. Также прослеживается сильная зависимость от объема подаваемой воды на одну промывку. Подавая 0,5 м^3 воды необходимо повторять процедуру восстановления каждые 1,7 часов, а при 1,75 м^3 это значение составит 6 часов.

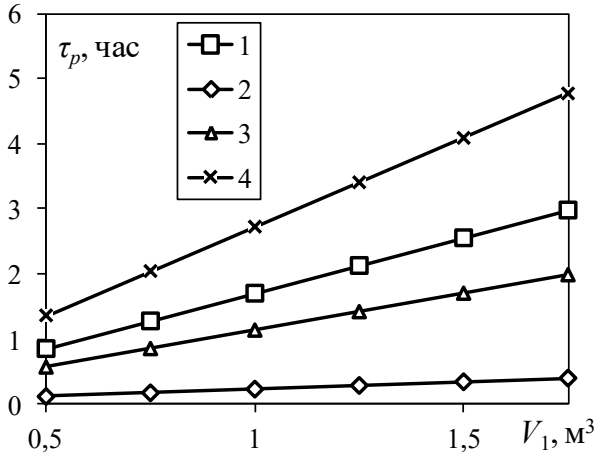


Рис. 2. Зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности и стоимости использования воды. $P_1 = 1{,}23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2{,}7 \cdot 10^{-7}$ 1/с; Q_b = 100 кВт. P_{V1}, руб./м^3:1 – 750; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 1200

Ожидаемая зависимость получилась от стоимости воды (рис. 2). Если подавать на одну промывку 1,75 м^3 воды при ее стоимости 100 руб./м^3 то время работы составит 0,44 часа, а если стоимость увеличится в 12 раз то и время, соответственно, должно быть увеличено примерно в 12 раз.

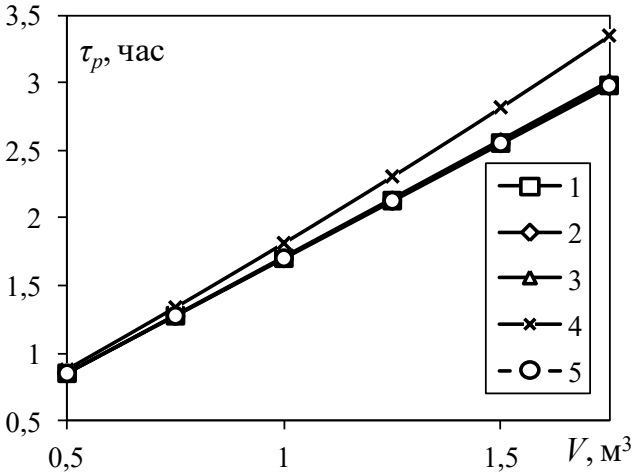


Рис. 3. Зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности и стоимости использования воды. P_{V1} = 750 руб./м^3; $P_1 = 1{,}23\cdot10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2{,}7\cdot10^{-7}$ 1/с; Q_b = 100 кВт. B, 1/с: 1 – $2{,}7\cdot10^{-7}$; 2 – $2\cdot10^{-8}$; 3 – $2\cdot10^{-6}$; 4 – $2\cdot10^{-5}$; 5 – линия полученная по формуле $\tau_p = \frac{P_{V1}}{P_1}\frac{V_1}{Q_b}$

Достаточно интересная зависимость получилась при выявлении влияния параметра B на режим восстановления поверхности (рис. 3). Исследования демонстрируют очень слабую зависимость от параметра B. Также исследования показали, что с достаточной для инженерных расчетов точностью можно использовать упрощенную формулу для определения время работы между процессом восстановления поверхности:

$$\tau_p = \frac{P_{V1}}{P_1}\frac{V_1}{Q_b} \qquad (1)$$

Эта формула позволяет упростить понимание рационального режима работы теплообменника, работающего в условиях интенсивного загрязнения поверхности.

В заключение можно отметить, что выбор рационального режима эксплуатации теплообменного аппарата позволит значительно сэкономить расход воды на восстановление поверхности, а также извлечь наибольшее количество тепла из парогазовой смеси. Кроме того, решается еще и экологическая проблема, связанная с выбросами частиц в атмосферу вместе с парогазовой смесью.

Уловленные частицы целлюлозы можно спрессовать и высушить, а полученные брикеты использовать, например, в качестве топлива.

Литература:

1. Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., Дмитриев А.В. Определение эффективности тепломассопереноса на контактной ступени струйно-пленочного устройства. Инженерно-физический журнал, 2017. – Т. 90. – № 3. – С. 685-690.

2. Дмитриев А.В., Мадышев И.Н., Дмитриева О.С., Николаев А.Н. Исследования диспергирования жидкости и газа в контактных устройствах с увеличенным диапазоном устойчивой работы. Экология и промышленность России, 2017. – Т. 21. – № 3. – С. 12-15.

3. Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н. Определение объемного коэффициента массоотдачи в градирнях со струйно-пленочными контактными устройствами. Инженерно-физический журнал, 2021. – Т. 94. – № 1. – С. 121-126.

4. Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н. Использование дополнительного охлаждения масляных трансформаторов при совместной работе термоэлектрических преобразователей и грунтовых теплообменников. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика, 2018. – Т. 18. – № 1. – С. 61-67.

5. Davoudi E., Vaferi B. Chemical Engineering Research and Design. 2018. V. 130, pp. 138-153.

6. Hosseini S.B., Khoshkhoo R.H., Malabad S.M.J. Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 115, pp. 406-417

УДК 621.521

РАЗРАБОТКА БЕЗМАСЛЯНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА С ДВУХСТОРОННИМ СПИРАЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Ситдиков Т.А., Райков А.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: timursitdikov1@gmail.com

Во многих технологических процессах для создания чистой безмасляной среды используются бесконтактные насосы [1, 2]. Одним из таких насосов является спиральный вакуумный насос (НВСп). С 2013 года КНИТУ совместно с ОАО «Вакуумаш» разработана и внедрена в производство серия спиральных насосов с быстротой действия от 4 до 60 м^3/ч [3].

Одной из ранних моделей является насос НВСп-12 с односторонним спиральным элементом и геометрической быстротой действия 3.5 л/с. В данной работе предложена конструкция с двухсторонним спиральным элементом, которая при незначительном изменении массогабаритных характеристик позволит увеличить быстроту действия этого насоса до 4.7 л/с (17 м^3/ч).

На рис. 1 представлена схема спирального насоса с двухсторонним спиральным элементом.

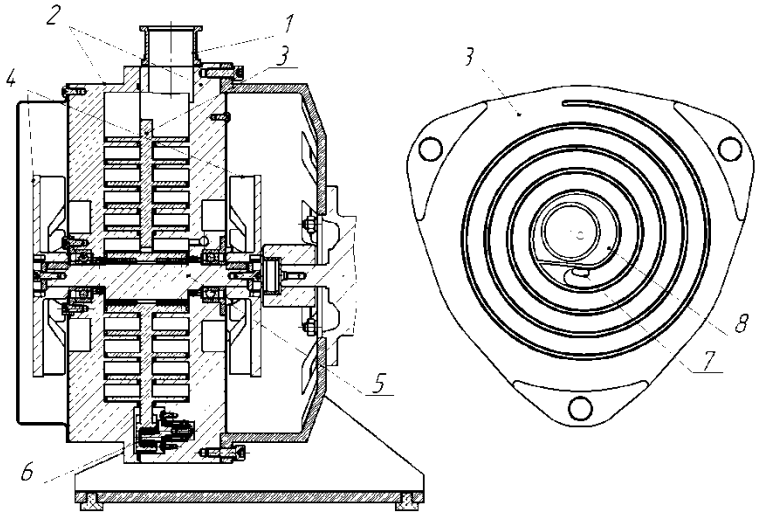


Схема насоса с двухсторонней спиралью:
1 –входной патрубок; 2 – неподвижные спирали; 3 – подвижная спираль; 4 – противовес-вентилятор; 5 — вал приводной; 6 – противоповоротное устройство; 7 – перепускное отверстие; 8 — центральныйй участок спирали

Первым этапом разработки насоса является подбор геометрических размеров спиральных элементов. Основным параметром при этом является число витков спирали, определяемое по формуле [4]

$$\phi = \pi - \frac{b}{2r_Б} + \frac{S_Г}{4k_h n \pi r_Б (b - \pi r_Б)^2} \qquad (1)$$

где $S_Г$ – геометрическая быстрота действия насоса, b – толщина стенки спирали, выбираемая из условия прочности в диапазоне от 3 до 4.5 мм, rБ – радиус базовой окружности, n – частота вращения ротора 1500 об/мин, $k_h = h/e$ – отношение высоты спирали к эксцентриситету.

На втором этапе проводится построение центрального участка спирали. С одной стороны, его размеры должны быть достаточны для установки вала и подшипников, с другой – слишком большой размер уменьшает количество последовательно соединенных отсеченных полостей, что негативно сказывается на остаточном давлении. Исходя из вышеперечисленного были выбраны следующие размеры спирали: радиус базовой окружности – 2.54 мм, толщина спирали – 4 мм, угол закрутки спирали – 36.6 радиан, высота спирали – 41.98 мм.

На третьем этапе проводится математическое моделирование [5, 6] рабочего процесса с целью определения действительных откачных характеристик насоса.

Таким образом, разработанная конструкция насоса с двухсторонним спиральным элементом позволит повысить быстроту действия при незначительном увеличении массы, габаритов и потребляемой мощности.

Литература:

1. Бесконтактные вакуумные насосы: учебное пособие / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев; Федер. Агенство по образованию. Казан. гос. технол ун-т. – Казань: КГТУ, 2010. – 104 с.

2. Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с., ил.

3. Капустин Е.Н., Капустин А.Е., Бурмистров А.В., Саликеев С.И. Создание высокотехнологичного производства безмасляных спиральных вакуумных насосов в России. Вестник Казанского технологического университета, 2014.– 280-283с.

4. Райков А.А.Спиральные вакуумные насосы / А. А. Райков, С. И. Саликеев, А. В. Бурмистров – Казань: Издательство КНИТУ, 2018. Вып. Минобрнауки России, Казан.нац. исслед. технол. ун-т.– 220с.

5. Burmistrov A. Mathematical model of working process of oil free scroll vacuum pump : Influence of leakage and heat transfer on pumping characteristics / A. Burmistrov, S. Salikeev, A. Raykov, M. Fomina // Vakuum in Forschung und Praxis – 2017. – Т. 29 – № 6 – 28–31с.

6. Бурмистров А.В. Расчет быстроты действия безмасляных спиральных вакуумных насосов / А. В. Бурмистров, С. И. Саликеев, А. А. Райков, В. А. Аляев, Р. Р. Якупов // Вакуумная техника и технология – 2020. – Т. 27 (4) – 1–6с.

УДК 66.081.6-278

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ ГАЗОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ МЕМБРАН С ПРИМЕНЕНИЕМ «IN-SITU» МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ

Смородин К.А., Крючков С.С., Степакова А.Н., Атласкин А.А.
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
E-mail: atlaskin@muctr.ru

В отличие от широко распространенного в настоящее время подхода к моделированию с использованием идеальных газотранспортных характеристик мембраны (полученных для индивидуальных газов) настоящее исследование сфокусировано на моделировании мембранных процессов с учетом эффективных «реальных» значений проницаемости и селективности мембраны на каждой стадии разделения, полученных для конкретных состава, температуры, перепада давления и доли отбора, а также в присутствии паров воды или летучих органических соединений.

В настоящем исследовании рассматриваются эффективные «реальные» газотранспортные характеристики мембраны (коэффициенты проницаемости, диффузии и сорбции) полученные с помощью «in-situ» масс-спектрометрического подхода. Как известно, ряд промышленных газовых сред содержит значительное количество паров воды и летучих органических соединений, которые являются сильными пластификаторами. Этот факт делает необходимым проведение оценки влияния их присутствия в смеси газов на газотранспортные характеристики полимерных газоразделительных мембран. В связи с этим для наиболее точного моделирования подобных процессов экспериментальный стенд на основе масс-спектрометрического комплекса Pfeiffer PrismaPro® QMG 250 был модифицирован системой CEM (Controlled Evapcohol and Mixing), которая позволяет осуществлять приготовление газовых смесей с парами воды или летучих органических соединений методом динамического смешения потоков, т.е. в реальном времени.

В результате настоящего исследования были получены газотранспортные характеристики половолоконных асимметричных мембран из полисульфона (PSF) с применением «in-situ» масс-спектрометрии, при разделении модельной смеси природного газа. Кроме того, эти «реальные» газотранспортные характеристики были сравнены с ранее полученными данными для индивидуальных газов, и было определено влияние концентрации (разности парциальных давлений) паров воды и одновременного переноса всех компонентов системы на газотранспортные характеристики мембраны. Наконец, эффективные газотранспортные

характеристики мембраны на основе полисульфона были использованы для моделирования процесса подготовки природного газа на основе метода мембранного разделения.

Выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-79-00222

УДК 66.045.129.9

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ

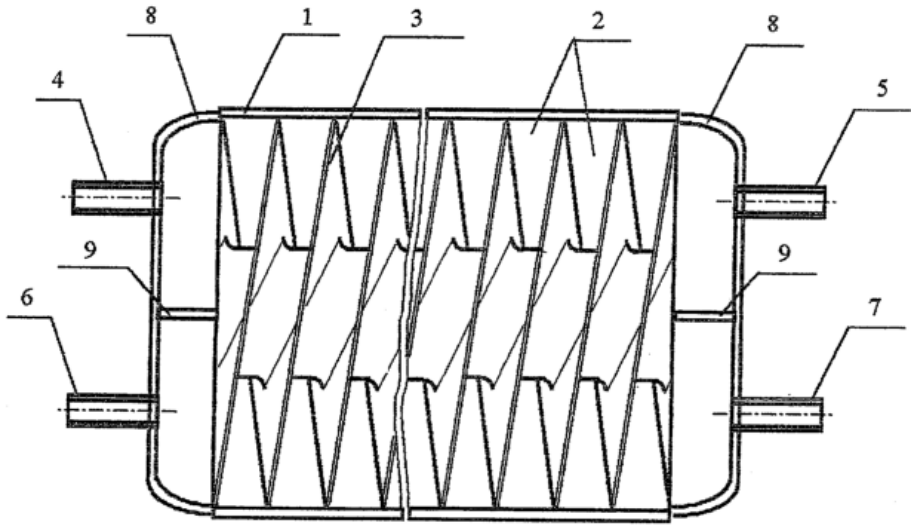
Соколов А.Е., Косырев В.М., Сидягин А.А.
Дзержинский политехнический институт филиал НГТУ имени Р.Е Алексеева,
E-mail: mahp@dpingtu.ru

В силу широчайшего использования процессов передачи тепла в промышленности задача интенсификации рекуперативного теплообмена весьма актуальна. Решение задачи связано со снижением термических сопротивлений с обеих сторон поверхности теплообмена.

Известно, что главным фактором, снижающим эффективность теплоотдачи, является сопротивление пограничного слоя. Для его понижения простое увеличение скорости теплоносителя не всегда рационально, т. к. требует дополнительных затрат энергии. Поэтому применяют методы дополнительной интенсификации теплообмена. По классификации эти методы могут быть: активные и пассивные. К активным методам относятся: вращение и перемешивание теплоносителя, вибрация теплообменной поверхности, воздействие на поток электрическим и акустическим полями, подача теплоносителя через пористую поверхность, пульсации давления и др. В основе пассивных методов – воздействие на теплоноситель самой формы канала или поверхности теплообмена. Пассивный метод реализуется с использованием винтовых и пластинчатых завихрителей потока, оребренных поверхностей теплообмена и др.

Одним из путей интенсификации теплообмена является создание закрученного потока. Способ применяется как для активной интенсификации, так и для пассивной. Отличие активного способа заключается в наличии подвода энергии извне, например, с помощью двигателя, вращающего мешалку. Вращение потоков усиливает турбулентность, выравнивает температурные поля за счёт конвективного перемешивания.

Рассмотрим известные конструкции, где применяются закрученные потоки. На рисунке 1 показан теплообменник [1], имеющий цилиндрический корпус (1), теплообменная поверхность, выполнена в виде двухзаходного винтового шнека (3). Для прохода теплоносителей служат два винтовых канала равного сечения (2). При движении теплоносителя по винтовым каналам происходит турбулизация потока, что интенсифицирует теплообмен. Все части этого аппарата статичны.



1 – корпус; 2 – винтовой канал; 3 – шнек; 4 – патрубок входа горячего теплоносителя; 5 – патрубок выхода горячего теплоносителя; 6 – патрубок выхода холодного теплоносителя; 7 – патрубок входа холодного теплоносителя; 8 – коллекторы; 9 – перегородка

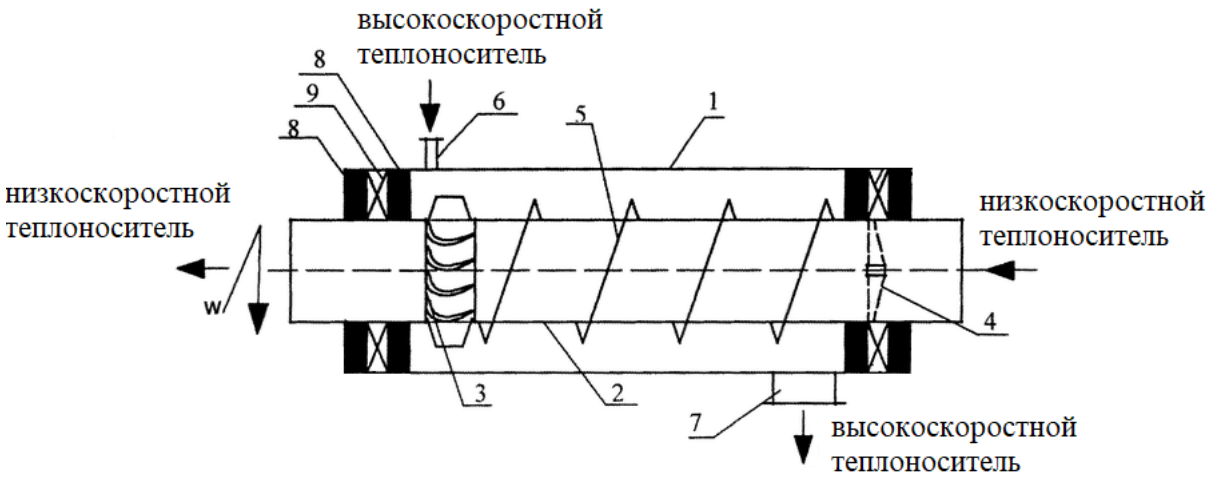
Рисунок 1 – Теплообменник с винтовой теплообменной поверхностью

Недостатками аппарата является сложность изготовления и неучастие в теплообмене центральной трубы шнека. Низкий расход одного из теплоносителей приведёт к снижению коэффициента теплопередачи *К*.

Решение последней проблемы возможно при помощи другого устройства (рисунок 2) типа «труба в трубе» [2]. Устройство имеет внешнюю неподвижную (1) и внутреннюю вращающуюся (2) трубу. Радиальная турбина (3) закреплена на внутренней трубе (2). Во внутренней трубе установлена осевая турбина (4). При работе, кинетическая энергия высокоскоростного теплоносителя используется для вращения внутренней трубы, турбулизации потоков в межтрубном пространстве и во внутренней трубе, что позволяет интенсифицировать процесс теплопередачи. Теплообменник [2] – интересное решение проблемы в случае, когда расход одного из теплоносителей мал.

Недостатком конструкции [2] является сложность герметизации вращающихся элементов, особенно по ходу низкоскоростного теплоносителя.

В рассмотренных аппаратах применён пассивный (конструкция [1]) и активный метод интенсификации теплообмена (конструкция [2]). Вместе с тем устройствам [1,2] не требуется подвода внешней энергии на перемешивание или какое-либо внешнее воздействие на теплоносители. Подвод энергии происходит с теплоносителем и расходуется на преодоление гидравлического сопротивления и на вращение трубы (2) в [2].

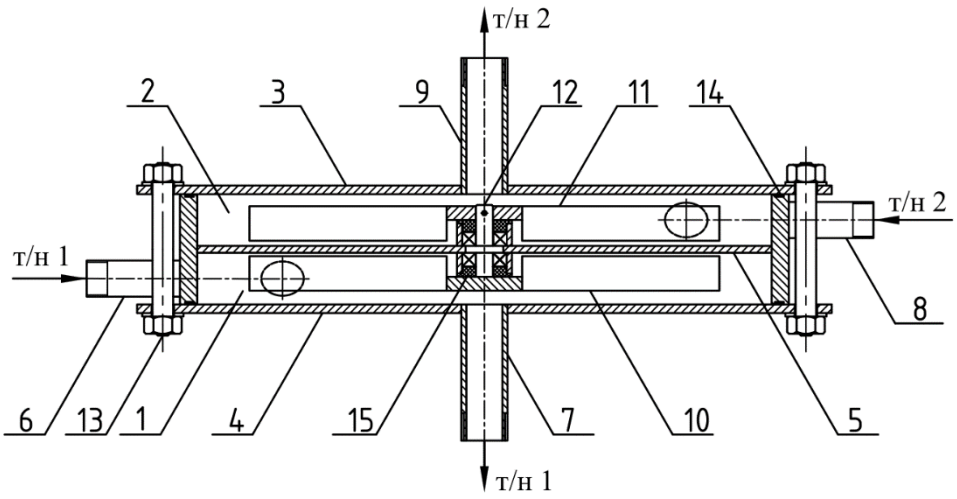


1 – внешняя труба; 2 – внутренняя труба; 3 – радиальная турбина; 4 – осевая турбина; 5 – спиральная лента (турбулизатор); 6 – патрубок входа высокоскоростного теплоносителя; 7 – патрубок выхода высокоскоростного теплоносителя; 8 – уплотнения; 9 – подшипники

Рисунок 2 – Теплообменник «труба в трубе» с вращающейся трубой

В конструктивном плане интенсификация теплообмена с использованием принципа закрученных потоков представляет заслуженный интерес. На кафедре ТОТС ДПИ НГТУ ведутся работы в этом направлении. В частности, был предложен «Вихревой теплообменный аппарат» [3], реализующий вращательно-поступательное движение теплоносителей. Все части аппарата статичны. Позже, на его основе был разработан вихревой роторный аппарат (ВРА) [4]. Лабораторный образец ВРА показан на рисунке 3. Основу аппарата составляют две вихревые камеры. Аппарат содержит три диска, средний из которых, (5) является поверхностью теплообмена. Вращающийся ротор, содержит крыльчатки (10,11) и вал (12). Для интенсификации теплообмена в аппарате происходит передача части кинетической энергии к теплоносителю, расход которого ниже.

Аппарат работает следующим образом. Горячий теплоноситель подается в тангенциальный патрубок (6) вихревой камеры (1), совершает сложное движение по окружности и от периферии к центру, взаимодействует с лопатками крыльчатки (10), приводя ее во вращение. Вращение с помощью вала (12) передается на крыльчатку (11). Движение теплоносителей за счёт тангенциального входа сопровождается вихреобразованием и турбулизацией потока. Теплоноситель выходит через центральный патрубок (7). Низкий расход на одну из камер компенсируется величиной расхода теплоносителя на другую камеру.



1 – верхняя вихревая камера; 2 – нижняя вихревая камера; 3 – верхняя крышка; 4 – нижняя крышка; 5 – теплообменный диск; 6 – входной патрубок горячего т/н; 7 – выходной патрубок горячего т/н; 8 – входной патрубок холодного т/н; 9 – выходной патрубок холодного т/н; 10,11 – крыльчатка; 12 – вал; 13 – шпилька; 14 – уплотнение; 15 – подшипниковый узел

Рисунок 3 – Вихревой роторный аппарат (ВРА)

Холодный теплоноситель подается в тангенциальный патрубок (8) вихревой камеры (2). Вращение холодного теплоносителя в камере усиливается благодаря вращению крыльчатки (11). В камере возникает развитое вихревое движение, что имеет место даже при низком расходе холодного теплоносителя.

Холодный теплоноситель выводится через центральный патрубок (9). Таким образом, на теплообменном диске (5) имеет место прямоток теплоносителей.

Для обеспечения противотока теплоносителей, холодный теплоноситель необходимо подавать через центральный патрубок (9). Тогда движение теплоносителя в камере (2) к патрубку (8) будет обеспечено крыльчаткой (11). Такая схема обеспечит большую движущую силу – среднюю разность температур $\Delta t_{ср}$.

Максимальный коэффициент теплопередачи K в опытах на воде достигал 1700 Вт/(м^2·К) при прямотоке. Он был в среднем на 11% выше, чем у конструкции без ротора, а для наилучшего результата преимущество составило 60%. Максимальная частота вращения ротора n составляла 149 об./мин. Гидравлическое сопротивление вихревой камеры не превышало 30 кПа.

Таким образом, из анализа конструкций теплообменников с закрученными потоками, можно сделать вывод об их перспективности.

Вихревой роторный аппарат [4] обладает следующими достоинствами: высокая эффективность работы, простота конструкции, возможность очистки поверхности теплообмена, небольшая масса, технологичность изготовления. Испытания лабораторного образца подтвердили высокие показатели интенсивности рассмотренного аппарата.

Литература:

1. Патент РФ 2269080, МПК F28D7/10, Теплообменник / Лядухин В.И, Болдов В.Ю.- опубл. 27.01.2006, Бюл № 03.

2. Патент РФ 2645861, МПК F28D 7/10 Теплообменник типа «труба в трубе» с вращающейся трубой / Бальчугов А.В., Кустов Б.О., Баденников А.В. и др.- опубл. 28.02.2018, Бюл. № 7.

3. Патент РФ 2711569, МПК F28D 9/00 Вихревой теплообменный аппарат / Косырев В.М., Диков В.А., Суханов Д.Е. и др.- опубл. 17.01.2020, Бюл. № 2.

4. Патент РФ 2766504, МПК F28D 20/00 Вихревой теплообменный аппарат / Косырев В.М., Соколов А.Е., Сидягин А.А.- опубл. 15.03.2022, Бюл. № 8.

УДК 66.02

МОДИФИКАЦИИ КОНТАКТНЫХ СИТЧАТЫХ УСТРОЙСТВ

Попова Н.С., Христиченко К.В., Таранова Л.В.
Тюменский индустриальный университет,
E-mail: general@tyuiu.ru

Процесс ректификации занимаем значительную часть в нефтегазопереработке. Массообменный процесс в основном проводится при использовании контактных устройств, которые являются основным элементов в колонне. Контактные устройства делятся по типу на тарельчатые или насадочные. Тарельчатые по конструкции делятся на колпачковые, клапанные, ситчатые, решетчатые и S-образные. Ситчатые тарелки используют в колоннах, диаметр которых составляет менее 4 метров. Основными преимуществами данного вида тарелок является простота изготовления, малая металлоемкость, большое свободное сечение и высокая производительность по пару. Но исходя из конструкции этих тарелок можно отметить несколько недостатков, а именно возможность забивки отверстий при работе с загрязненными средами, жесткость закрепления тарелок в горизонтальном положении. Ситчатые тарелки очень чувствительны к горизонтальной установке, любой «перекос» тарелки введет к изменению нагрузки по паровой и жидкой фазе, что в свою очередь негативно сказывается на самом процессе теплообмена, поэтому применяют различные модификации к этим тарелкам. В данной работе представлены три современных патента на конструкционные новшества ситчатых тарелок, а также их сравнительный анализ.

Контактная тарелка [1], содержащая перегораживающие барьеры для течения жидкости, содержит полотно тарелки колонны с зоной впуска и расположенным на расстоянии выпускным отверстием для соответственно приема жидкости на полотне тарелки колонны, а затем выпускания жидкости, после того как она протечет через полотно тарелки колонны и вступит во взаимодействие с другой текучей средой на полотне тарелки колонны и над ним. (Рисунок 1).

Между зоной впуска и выпускным отверстием расположено множество барьеров. Каждый из этих барьеров имеет расположенные на расстоянии друг от друга пластины и проемы в промежутках между любыми соседними пластинами. Пластины препятствуют протеканию жидкости и увеличивают жидкостную нагрузку на полотно тарелки колонны выше по течению, по мере того как жидкость протекает от зоны впуска, через проемы, а затем в выпускное отверстие. Изобретение обеспечивает повышение паропропускной способности тарелки при низких значениях расхода жидкости.

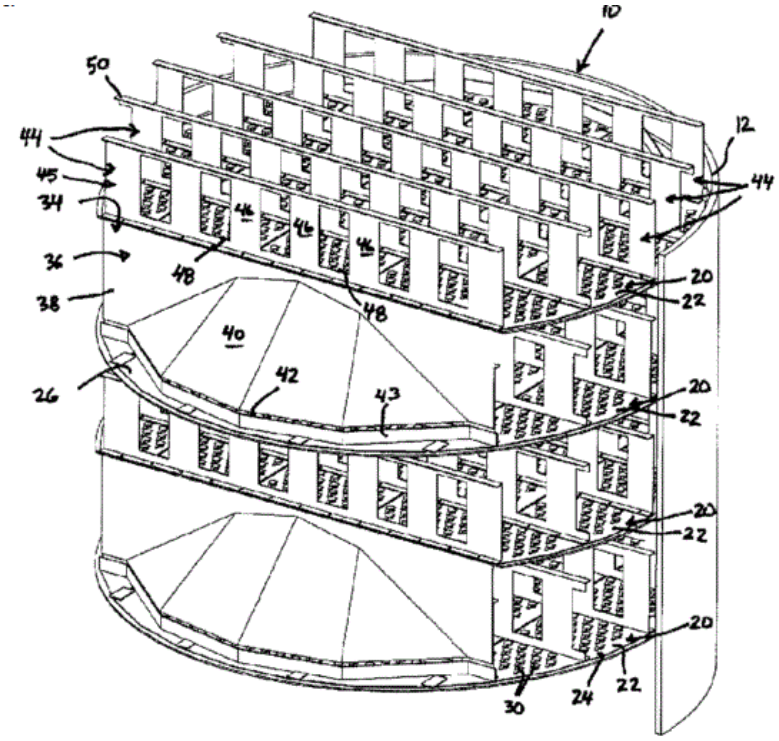


Рисунок 1 - Контактная тарелка, содержащая перегораживающие барьеры для течения жидкости

Контактная тарелка [2] содержит множество перегородок, которые обеспечивают изменение направления течения жидкости, протекающей по верхней поверхности полотна тарелки колонны, и сужение ее пути течения по ширине, а также увеличение длины пути течения, когда жидкость протекает от зоны впуска к выпускному отверстию на полотне тарелки колонны. (Рисунок 2)/

Сливной стакан проходит вниз от выпускного отверстия для приема жидкости, поступающей в выпускное отверстие, а затем ее передачи вниз к отводному отверстию, расположенному на нижнем конце сливного стакана. Причем указанный сливной стакан включает наклонный или горизонтальный участок, который обеспечивает размещение отводного отверстия под зоной впуска на полотне тарелки колонны и в положении вертикального выравнивания с ней, при этом зона впуска и выпускное отверстие расположены диагонально напротив друг друга на противоположных концах полотна тарелки колонны. Группа изобретений обеспечивает увеличение объемного расхода жидкости на любом участке полотна за счет сужения пути течения и уменьшение вероятности уноса жидкости паром при низких значениях расхода жидкости.

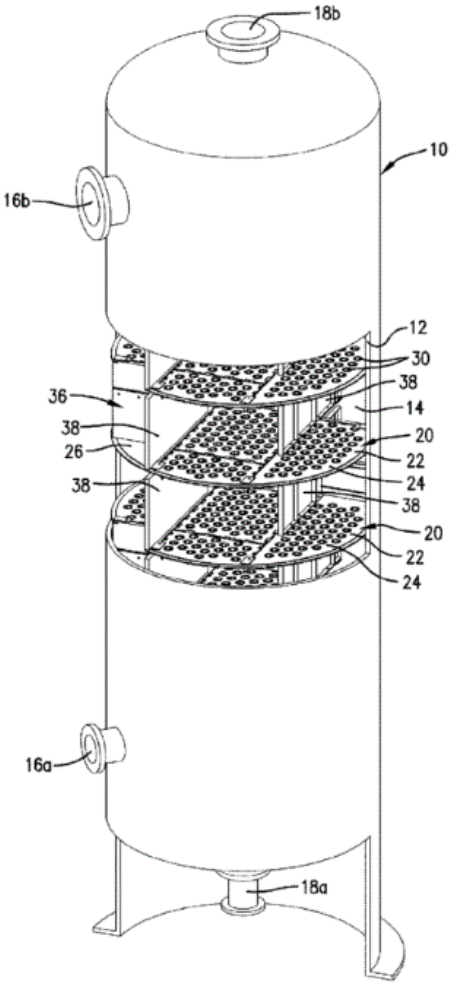


Рисунок 2 – Контактная тарелка, имеющая перегородку для концентрирования жидкости при низком расходе

Техническим результатом, достигаемым при использовании устройства [3], является повышение эффективности работы вихре-ситчатого контактного устройства за счет увеличения пропускной способности и снижения брызгоуноса. (Рисунок 3).

Указанный технический результат достигается тем, что вихре-ситчатое контактное устройство тепломассообменного аппарата содержит цилиндрический корпус, в котором установлены аксиальный завихритель, ситчатая тарелка с центральной переливной трубкой, стакан гидрозатвора, при этом аксиальный завихритель размещен между полотном ситчатой тарелки и стаканом гидрозатвора на расстоянии от 0,6 до 1,5 диаметров цилиндрического корпуса от тарелки. На полотне ситчатой тарелки напротив сливных щелей переливной трубки закреплены отбойные пластины, изогнутые навстречу вращению газожидкостного потока, а по периметру ситчатой тарелки закреплено уплотнение, примыкающее к цилиндрическому корпусу.

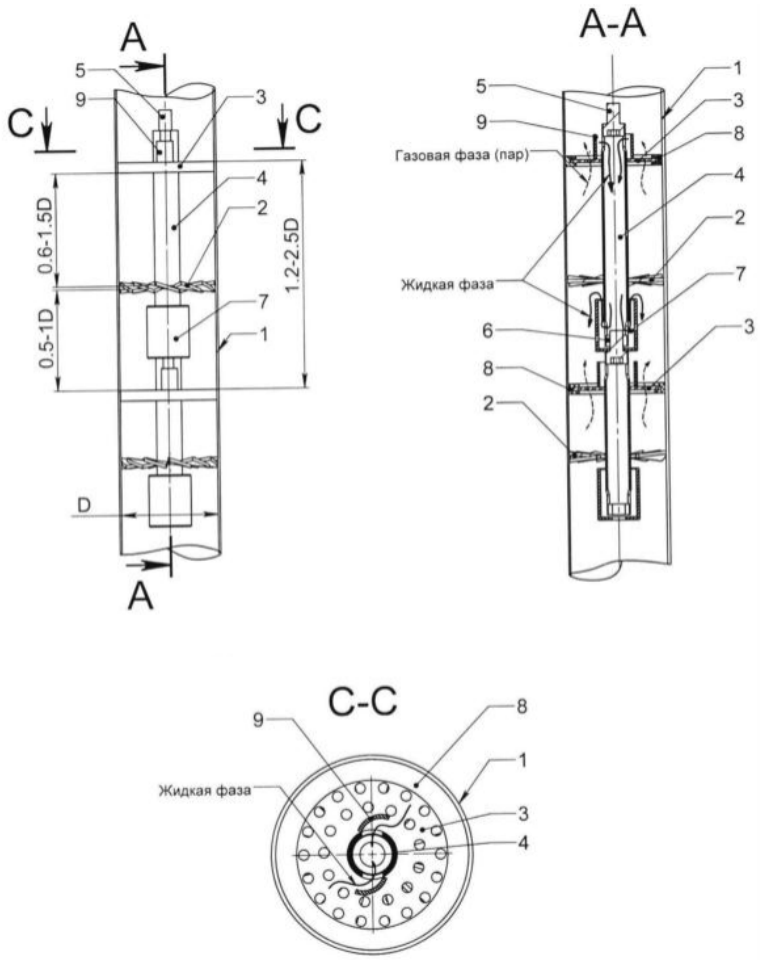


Рисунок 3 – Вихре-ситчатое контактное устройство тепломасообменного аппарата

Таблица 1

Тарелка	Контактная тарелка, содержащая перегораживающие барьеры для течения жидкости	Контактная тарелка, имеющая перегородку для концентрирования жидкости при низком расходе	Вихре-ситчатое контактное устройство
Преимущество	повышение паропропускной способности при низких значениях расхода жидкости	увеличение объемного расхода жидкости и уменьшение уноса жидкости паром	увеличение пропускной способности и снижения брызгоуноса

Выводы по трем тарелкам представлены в Таблице 1.

Научный руководитель: Таранова Любовь Викторовна

Литература:

1. Пат. 2726531 Российская Федерация, МПК B01D 3/16 B01D 3/22 B01D 3/32. Контактная тарелка, содержащая перегораживающие барьеры для течения жидкости, и способ ее действия : № 2019121637 : заявл. 27.12.2017 : опубл. 14.07.2020 / Ниевоудт Изак, Гризел Чарльз ; патентообладатель КОХ-ГЛИЧ, ЛП. – Текст : непосредственный.

2. Пат. 2741428 Российская Федерация, МПК B01D 3/16. Контактная тарелка, имеющая перегородку для концентрирования жидкости при низком расходе, и способ ее действия : № 2019122404 : заявл. 10.01.2018 : опубл. 26.01.2021 / Ниевоудт Изак, Гризел Чарльз ; патентообладатель КОХ-ГЛИЧ, ЛП. – Текст : непосредственный.

3. Пат. 200612 Российская Федерация, МПК B01D 3/00 B01D 3/24.Вихре-ситчатое контактное устройство тепломассообменного аппарата: № 2020105116: заявл. 03.02.2020 : опубл. 02.11.2020 / Саранцев В. Ф.; патентообладатель Саранцев В. Ф. – Текст : непосредственный.

УДК 615.322

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОИЗОДСТВА АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ

Хайруллин И.Ф., Сафин Р.Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: himikfizik@mail.ru

В России уровень переработки отходов довольно низок. Каждый год скапливаются миллионы тонн отходов сельского хозяйства и лесной промышленности, но переработке подвергается лишь 15-20% от общего объема. Основным методом переработки отходов по сей день является сжигание. Данный метод малопродуктивен и вреден для экологии. Есть современные методы переработки органических отходов. Один из таких методов это пирогенетическое разложение или пиролиз. Данный метод безопасен для окружающей среды и имеет высокий выход конечной продукции. Отходы подвергаемые пиролизу разлагаются на твердый углеродистый остаток и пиролизные газы. Углеродистый остаток это уголь, из которого можно получить отличный адсорбент с высокой поглотительной способностью. Процесс в результате, которого уголь значительно улучшает свои адсорбционные свойства, называется активацией. Существует 2 вида активации - активация водяным нагретым паром и химическая активация. Последняя обеспечивает более высокий выход угля, но имеет большой недостаток, а именно необходимость промывания угля от химических реагентов, что ведет к образованию большого количества сточных вод. Активация водяным паром позволяет получить достаточный выход активированного угля без вреда экологии [1÷4].

На кафедре переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета была разработана энерго- и ресурсосберегающая непрерывно действующая установка, предназначенная для производства активированного угля [5÷10]. Установка работает по принципу кондуктивного пиролиза с последующей активацией угля. Активация сложный процесс, требующий учета множества факторов.

Непрерывно-действующая энерго-и ресурсосберегающая установка для производства активированного угля (рис. 1) представляет собой вертикальную реторту, в которой за счет действия гравитационных сил происходит движение органических отходов из накопителя 1 через шлюзовые питатели 2 в зоны сушки – 3, пиролиза – 4, активации – 5, охлаждения – 7 с превращением их в активированный уголь. Движение парогазовой смеси происходит через рекуперативный теплообменник 6, систему сепарации 8 и адсорбер 9. Измельчение отходов происходит в подготовительной зоне 10 [11].

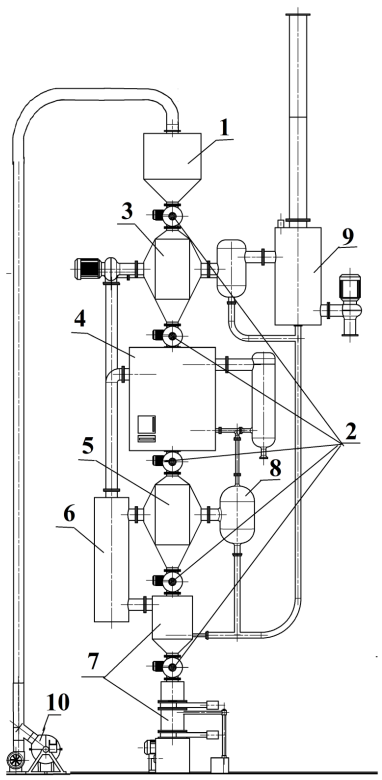


Рис. 1. Установка для производства активированного угля: 1 – накопитель; 2 – питатель шлюзовый; 3 – зона сушки; 4 – зона пиролиза; 5 – зона активации; 6– рекуперативный теплообменник; 7 – зона охлаждения; 8 – сепаратор; 9 – система газоочистки; 10 – зона подготовки

Сырьем для производства активированного угля служат: древесные отходы хвойных и лиственных пород такие как: опилки, стружка, мусорная древесина, предварительно измельченная до состояния щепы, а также: скорлупа грецкого ореха, косточки абрикоса, лузга подсолнечника, характеризующиеся высоким содержанием целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина.

Конечный продукт это активированный уголь с частицами от 2 до 5 мм. Качественно соответствует ГОСТ 6217-74.

Разработанная конструкция камеры активации позволяет с большей эффективностью активировать угли благодаря разделению потоков перегретого пара, а движение угля сверху вниз обеспечивает смешанный противоточный и перекрестный режим обработки древесного угля. Построенные зависимости позволяют анализировать процессы протекающие в зоне активации.

Активированный уголь, полученный при активации в зоне активации, установки производства активированного угля из измельченных органических отходов соответствует марке ДАК и БАУ-МФ по ГОСТ 6217-74. Данный уголь может применяется в качестве адсорбента фильтровальных установках и для очистки парового конденсата от различных примесей.

УДК 66.066

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОВОРОТНЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЛОПАТОК В ЦЕНТРИФУГАХ

Халилов А.И., Кондрашева С.Г., Лашков В.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: lashkov_dm@kstu.ru

Разделения обеззараженных грунтов от промывных жидкостей [1] по методу экстракции углеводородов нефти низкокипящими растворителями (например, метиленхлоридом) осуществляется в центрифугах [2, 4]. Независимо от принципа действия центрифуги имеют общий недостаток, заключающийся в сложности регенерации фильтрующей поверхности. Неполное удаление дисперсных частиц с фильтрующей поверхности, их внедрение в поры фильтрующего элемента и уплотнение центробежными силами приводит к возрастанию сопротивления разделения.

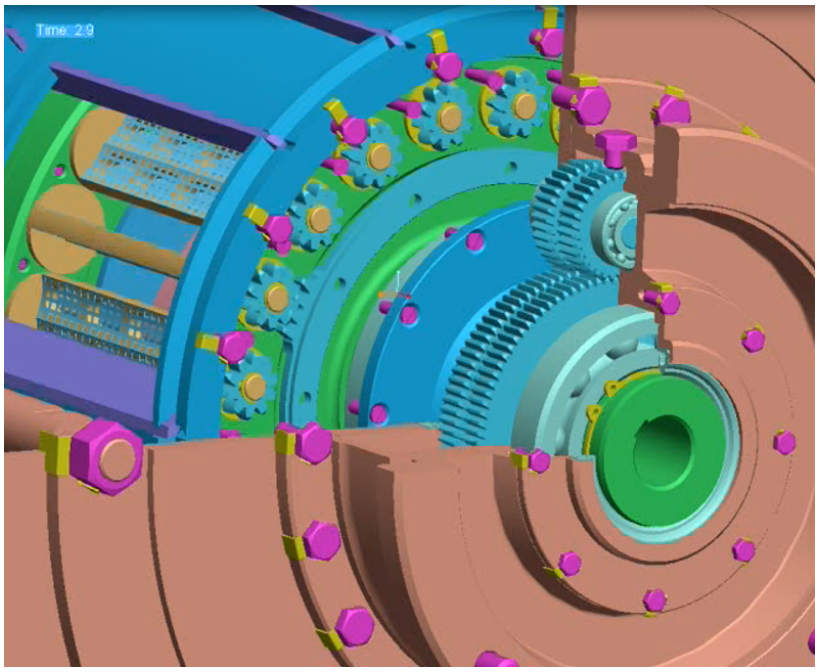
На основе проведенных исследовании было выявлено перспективное направление по восстановлению активности фильтрующей поверхности, состоящей из отдельных элементов (лопаток), имеющих возможность поочередного поворота с ускорением вокруг собственной оси. На рис 1 представлена 3D модель фильтрующей центрифуги и отдельно фильтрующей поверхности, выполненных в системе Компас-3D.

Центрифуга состоит из корпуса и коаксиально размещенного в нем ротора, цилиндрическая поверхность которого образована набором перфорированных элементов. Элементы установлены с возможностью поворота на своих осях, для этого на одной из полуосей элементов закреплены зубчатые шестерни.

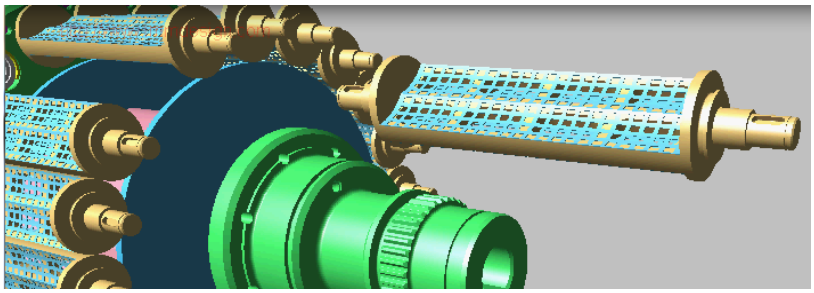
Внутрь ротора помещен питатель с загрузочным отверстием. Ротор заключен в обечайку с отверстиями для слива жидкой фазы. Обечайка снабжена зубчатым сектором. Зубья сектора приводятся в зацепление с зубчатыми шестернями, расположенными в этой зоне.

При работе центрифуги ротор и питатель с обечайкой приводятся во вращение. В питатель подается исходная суспензия, которая под действием центробежной силы отбрасывается на поверхность перфорированных лопаток, где и происходит разделение жидкой и твердой фаз. Процесс фильтрования продолжается в течение одного оборота ротора относительно питателя с обечайкой. По завершении одного оборота зубчатые шестерни входят в зацепление с зубчатым сектором обечайки. Происходит поворот с ускорением фильтрующих элементов вокруг своих осей на 180^0, в результате чего осадок сбрасывается в разгрузочное окно. Разгрузившийся элемент занимает свое рабочее положение, на фильтрующую поверхность которого подается исходная суспензия. Благодаря повороту

лопаток на 180º, происходит переориентация их фильтрующей поверхности относительно направления центробежных сил и обеспечивается их непрерывная центробежная регенерация.



а

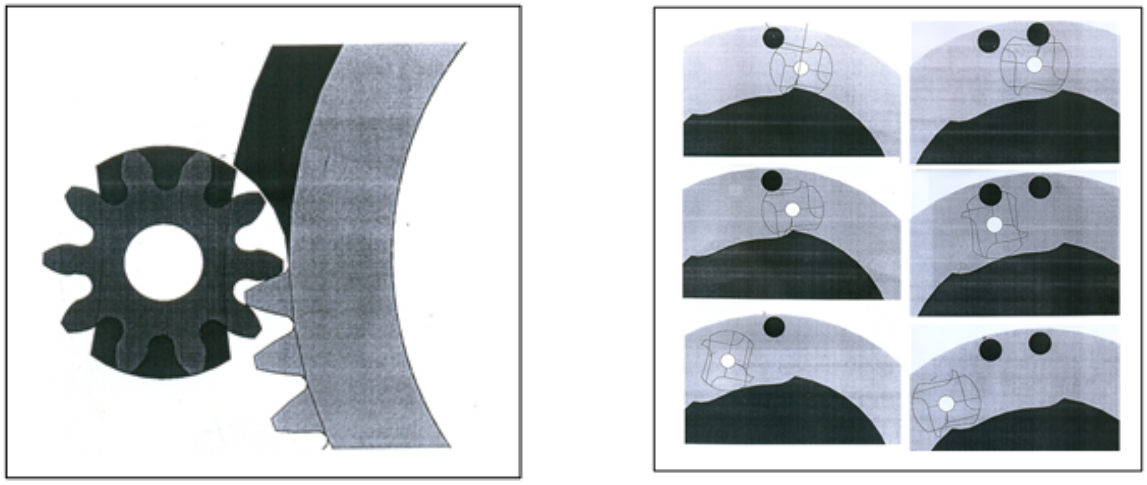


б

Рис. 1. Фильтрующая центрифуга с поворотными фильтрующими элементами (лопатками): а - общий вид, б - фильтрующая поверхность

Анализ работы поворотного устройства производился в системе комплексного моделирования машин и механизмов ADAMS. Система ADAMS позволяет рассчитывать динамику и кинематику механизмов и машин, выполнять анимацию движения и выводить результаты в требуемой форме.

Компьютерные исследования выявили недостатки поворотного устройства системы регенерации фильтрующих элементов, которые заключаются в том, что количество зубьев и их модуль должны быть подобраны так, чтобы при выходе из зацепления последнего зуба фиксатор без удара ложился на фиксирующую поверхность (в противном случае происходит соударение этих конструктивных элементов (рис.2, а)).



а б

Рис. 2. Результаты анализа работы поворотного механизма в системе ADAMS: а - зубчатой пары, б - крестообразного кулачкового механизма со штифтами

Для устранения недостатков были проведены исследования с различными по форме деталями поворотного устройства - кулачками: крестообразным кулачком с фиксатором и одним штифтом; крестообразным кулачком с фиксатором и двумя штифтами; вильчатым кулачком.

При повороте крестообразным кулачком с фиксатором и одним штифтом установлено:

- присутствует отскок от удара по линейной части кулачка до входа в зацепление штифта и зуба;

- угол поворота лопатки носит случайный характер и зависит от трения на оси лопатки;

- контакт фиксирующей поверхности происходит с отскоком.

Для устранения отскока при повороте модифицированным крестообразным кулачком с фиксатором и одним штифтом заходная часть кулачка была изменены с прямой на радиальную. С целью упорядочения вращения фильтрующего элемента в конструкцию был введен дополнительный штифт. В результате поворот элементов стал более предсказуемым, однако отскок фиксирующего устройства устранен не был (рис.2, б).

Таким образом, все рассмотренные механизмы имеют один общий недостаток. Разные элементы геометрии, отвечающие за поворот и фиксацию лопатки, приводят к ударному взаимодействию их поверхностей.

Поставленная задача решена применением вильчатого кулачка. При использовании данного устройства возникла необходимость в определении геометрической линии центров осей. В результате математической обработки были получены следующие соотношения между углами:

$$\beta = \beta_0 - (\beta_0 t),$$

$$\theta = 90 - \varphi_0 + t\varphi_0 + \operatorname{arctg}((l/2\sin\beta)/(R_c - l/2\cos\beta)),$$

$$R = \sqrt{(R_c - l/2\cos\beta)^2 + (l/2\sin\beta)^2},$$

$$\varphi = \varphi_0 - \varphi_0 t,$$

где $l = 10$; $R_c = 78$; $\beta_0 = 90$; $\varphi_0 = 12$.

Выражение для линейного изменения угла β может быть задано более сложной зависимостью, обеспечивающей плавное ускорение на конечных участках траектории

$$\beta = \beta_0 - \beta_0(\sin(180t - 90) + 1)/2.$$

Полученное решение масштабируется и пересчитывается на любой размер (угол поворота, плечо вилки, межосевое расстояние.

Литература:

1. Мухтаров Я.С. и др. Анализ источников образования нефтесодержащих отходов // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2012. Т.15. №17. С. 220-223.

2. Мухтаров Я.С. и др. Моделирование процесса обращения с нефтезагрязненными грунтами // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2012. Т.15. №11. С. 201-204.

3. Лашков В.А. и др. Определение кинетических параметров процесса экстрагирования углеводородов из нефтесодержащих грунтов // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2013. Т.16. №14. С. 208-209.

4. Лашков В.А. и др. Моделирование процесса экстрагирования углеводородов из нефтесодержащих грунтов // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2015. Т.18. №16. С. 120-122.

УДК 66.092.89

ВОЗМОЖНОСТЬ ОПТИМИЗАЦИИ И МОДЕРНИЗАЦИИ КОЛОННЫ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ УСТАНОВКИ ЗАМЕДЛЕННОГО КОКСОВАНИЯ

Харитонова О.С., Зиннурова О.В., Фирсин А.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: os_kharitonova@mail.ru

Проблема переработки утяжеленных нефтей и тяжёлых нефтяных остатков (ТНО) является актуальной в виду их огромных запасов на территории Российской Федерации. Одним из самых эффективных и недорогих процессов переработки ТНО является процесс замедленного коксования.

Данный процесс направлен на углубление переработки нефти и предназначен для максимальной выработки светлых фракций, из которых в последующем получают компоненты товарных продуктов. Нефтяной кокс, получаемый в процессе замедленного коксования, представляет собой целевой продукт [1]. Область применения напрямую зависит от качества кокса. Структура потребления нефтяного коса на территории Российской Федерации представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Структура потребления нефтяного кокса в Российской Федерации.

Оптимизация и модернизация колонны фракционирования установки замедленного коксования проводятся с целью получения максимального выхода светлых нефтепродуктов, снижение энергозатрат и энергоемкости, а также увеличить межремонтный период установки.

Учеными [2] была изобретена ректификационная колонна для установки замедленного коксования. Снижение энергоемкости процесса замедленного коксования было главной задачей исследования. Решение задачи заключается в том, что:

- промывочная камера и наклонная перегородка с карманом устанавливается в отгонной части колонны;

- промежуточная перегородка, которая снабжена карманами и патрубками с отбойными пластинами (для отвода тяжелого загрязнённого газойля промывка);

- колонна оснащена насадкой из просечных листов для улучшения качество продуктов.

Предлагаемый изменения позволяют снизить энергоемкость процесса в 1,1-1,3 раза.

Разработана схема, направленная на получение одновременно разных видов кокса на одной установке [3]. Этому способствует смешение сырьевого потока с газойлем коксования (в количестве 4-15% на сырье) и последующую подачу в промежуточную емкость, которая соединена по парам с ректификационной колонной. Нагретое сырье, смешенной с газойлем, отправляется в коксовые печи для получения нефтяного кокса.

Таким образом, оптимизация и модернизация колонны фракционирования для установки замедленного коксования приводят к существенному снижению энергоемкости и, соответственно, энергозатрат и увеличению межремонтного периода, а также возможно получение кокса разного качества одновременно на этой установке.

Литература:

1. Валявин Г.Г., Запорин В.П., Габбасов Р.Г., Калимуллин Т.И. Процесс замедленного коксования и производство нефтяных коксов, специализированных по применению // Территория Нефтегаз. - 2011. - № 8. - С.44-48.

2. Патент № 2548415 Российская Федерация, C10B 55/00. Ректификационная колонна для установки замедленного коксования: №2013142519/05 : заявл. 17.09.2013 : опубл. 20.04.2015 / Хайрудинов И.Р., Тихонов А.А., Теляшев Э.Г. ; заявитель ГУП "ИНХП РБ". – 6 с.

3. Патент № 2206595 Российская Федерация, C10B 55/00. Способ замедленного коксования нефтяных остатков: №2001129262/04 : заявл. 30.10.2001 : опубл. 20.06.2003 / Анисимов П., Малыгин И., Мурамович В. Туев С.; заявитель ГУП "ИНХП РБ". – 6 с.

УДК 66.048

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ВЫПАРИВАТЕЛЯ ЭКСТРАКТОВ С БЛОКОМ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАТОРА

Царева А.А., Гришин Н.С.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

Рассматривается модернизация концентратор-выпаривателя, патент 2257243 РФ.

Многомодульный концентратор-выпариватель (рис.1) необходим для получения микропримесей в жидких смесях методом концентрирования. Аппарат выполнен многоячеечным и содержит три испарительные чаши. Он позволит срочно определить необходимый анализ. Особенно эта конструкция поможет определить быстро и качественно анализ ядовитых продуктов при авариях на химических предприятиях.

Характеристика основного устройства, анализ всего процесса, формулы и последовательность расчета.

Уравнение Гиббса-Гельмгольца:

$$\Delta U_s = \sigma - T\left(\frac{\partial\sigma}{\partial T}\right)_P, \quad (1)$$

т.е. ΔU_s - поверхностная энергия вещества при контакте с воздухом уменьшается с повышением температуры.

Уравнение Л.Этвеша:

$$\sigma \cdot V_M^{2/3} = K \cdot (T_{\text{кр}} - 6 - T), \quad (2)$$

где $K = 2{,}1 \cdot 10^{-7}$для неполярных жидкостей, для полярных – $K < 2{,}1 \cdot 10^{-7}$, а для жидкостей, которые имеют большую молекулярную массу – $K > 2{,}1 \cdot 10^{-7}$; σ – коэффициент поверхностного натяжения; V_M – молярный объем жидкости; $T_{кр.}$ - критическая температура жидкости, Т - температура жидкости.

Результаты эксперимента, обычно, записываются в виде критериальной зависимости (стр. 165, [1]):

$$Nu = f(Re, Gr, \text{Pr}) \quad (3)$$

благодаря чему уменьшается число аргументов с восьми размерных величин до четырех безразмерных критериев. Применительно к нашему случаю величина критерия Gr незначима для вынужденного потока, тогда:

$$Nu = f(Re, \text{Pr}). \quad (4)$$

В режиме молекулярной теплопроводности тепловой поток, переносимый через единицу поверхности, определяется законом Фурье:

$$Q = \frac{\alpha dt}{dx} \quad (5)$$

или

$$Q_1 = \alpha_1 \cdot (t_л - t_н) \quad (6)$$

где α_1 – коэффициент теплопроводности; $t_л$ и $t_н$ – температура ядра потока и стенки, Q_1 – нагрев от стенки испарительной чаши к самой жидкости

Жидкость-воздух (зависит от процесса испарения, затрачивается на преодоление поверхностного натяжения):

$$Q_2 = \alpha_2 \cdot (t_в - t_л) \quad (7)$$

подача тепла воздухом:

$$Q_в = \alpha_в \cdot (t_н - t_{во}) \quad (8)$$

где $t_{во}$ – температура подающего воздуха; α_1, α_2, $\alpha_в$ – коэффициенты теплопроводности.

Q_3 – подача тепла от змеевика, который находится снаружи испарительной чаши.

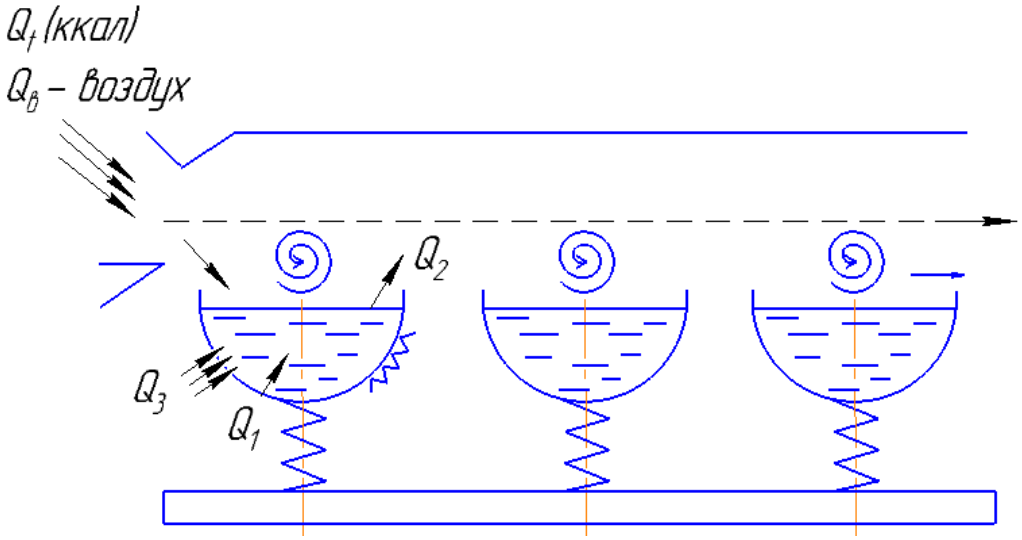


Рисунок 1 – Схема 3-х модульной конструкции концентратор-выпаривателя, на которой изображены все составляющие теплообмена

На рисунке 1 схематично показаны все составляющие процесса теплообмена.

Суммарный расход тепла:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_в. \quad (9)$$

Теплоотдача при свободной конвекции в ограниченном объеме (в узких щелях, плоских и кольцевых зазорах и т.д.) может быть оценена приближенно по формуле (стр. 165, [1]):

$$Nu = 0{,}18 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0{,}25} \quad (10)$$

при $Gr \cdot Pr > 1000$.

Физические свойства в (17) выбираются при $T_р = 0{,}5(T_{с1} + T_{с2})$, где $T_{с1}$, $T_{с2}$ – температура стенок зазора, а за определяющий размер принимается ширина зазора δ. При значениях $Gr \cdot Pr < 1000$ передача теплоты от горячей стенки

к холодной в прослойках осуществляется только теплопроводностью. Конвекция отсутствует также в горизонтальных щелях, если нагретая поверхность расположена сверху[1].

Математическая зависимость (стр. 162, [1]):

$$q_c = \tau_c \frac{C_p(t_c - t)}{W} = \frac{k}{8}\rho W^2 \frac{C_p(t_c - t)}{W} \quad (11)$$

где k – коэффициент гидравлического сопротивления.

В основном, теплопередача от твердой стенки к воздушному потоку рассчитывается по двум слагаемым [2]:

- тепловое излучение стенкой:

$$Q_л = 5{,}67\varepsilon_{пр}F\left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4\right] \quad (12)$$

- теплопотери в окружающую среду, учитываемые коэффициентом общих теплопотерь:

$$\alpha_{общ} = 9{,}3 + 0{,}058t. \quad (13)$$

Теплоотдача получится равной:

$$Q = Q_k + Q_л = \alpha_{общ}F(t_{ст} - t_г). \quad (14)$$

Учитывая потери в окружающую среду, общий расход тепла на выпаривание будет равен:

$$Q = Q_н + Q_в + Q_о. \quad (15)$$

На основании проведенных расчетов определены геометрические размеры концентратор-выпаривателя с конденсатором.

Литература:

1. Аметистов С.В. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / под ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с., ил. – (Теплоэнергетика и теплотехника).

2. Перри Дж.Г. Справочник инженера-химика / Дж.Г. Перри; пер. с англ. под ред. Н.Н. Жаворонкова, П.Г. Романкова. – Л.: Химия, 1969. – Т. 1, Т. 2.

3. Р. М. Латыйпов, Э. В. Осипов, Э. Ш. Теляков, Р. И. Фахрутдинов, Вестник Казанского технологического университета, 11, 145-148 (2016).

4. Пат. 2257243 Российская Федерация, МПК B 01 D 1/00, B 01 L 7/00. Концентратор-выпариватель / Гришин С.Н.; заявитель и патентообладатель Гришин С.Н. - №2004111085/15; заявл. 12.04.2004; опубл. 27.07.2005, Бюл. № 21 – 8 с

УДК 629

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ АППАРАТОВ ТЕПЛО-МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Щукина С.А., Альтапов А.Р.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: altapov@kstu.ru

В рамках работы студенческого конструкторского бюро, существующего на кафедре ИКГАП, проводится разработка конструкторской документации аппаратов химической промышленности. Одной из таких работ стало проектирование сдвоенного аксиально-поршневого регулируемого насоса типа 223.20.

Насос аксиально-поршневой – это техническое устройство, относящееся к категории гидравлических машин, механическая энергия рабочего органа которых преобразуется в энергию движущегося потока жидкости. Если такие машины совершают обратное действие (другими словами, энергия потока жидкости преобразуется в механическую), они называются гидромоторами.

Проект разрабатывался в САПР Autodesk Inventor, и включал в себя следующие этапы:

1. **Изучение принципа работы аксиально-поршневых насосов.** Насос гидравлический аксиально-поршневой, как и радиально-поршневой, является устройством объемного типа, которое функционирует за счет изменения объема рабочих камер. В гидравлических насосах аксиально-поршневой группы такие рабочие камеры сформированы расточками, которые выполнены в цилиндрическом блоке. В отличие от радиально-поршневых насосов, у аксиально-поршневых машин внутренние рабочие камеры располагаются параллельно по отношению к поршням и оси самого устройства. В ходе перемещения поршней такого насоса при вращении цилиндрического блока происходит увеличение или уменьшение объема рабочих камер, что и позволяет устройству всасывать и отдавать перекачиваемую им жидкость[1].
2. **Моделирование деталей аксиально-**поршневого насоса. На этом этапе проводилось моделирование деталей насоса на основе чертежей, а также проводилось проектирование деталей. В качестве примера приведена модель корпусной детали (рис.1).
3. **Моделирование сборок.** На этом этапе проводилось моделирование сборочных единиц, входящих в состав насоса, и сборка самого насоса (рис.2).
4. **Разработка конструкторской документации**. Этап включал в себя разработку рабочих чертежей деталей, сборочных чертежей и спецификаций (рис. 3).

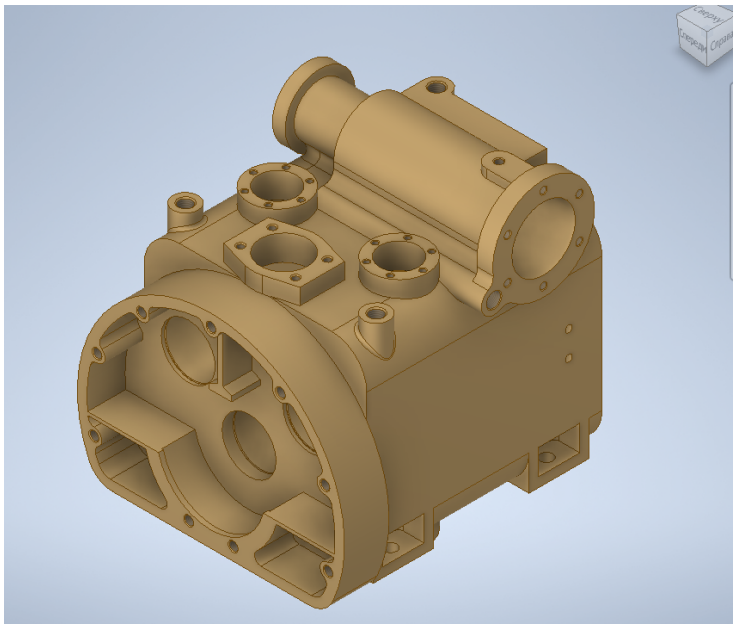


Рис.1. Корпус насоса

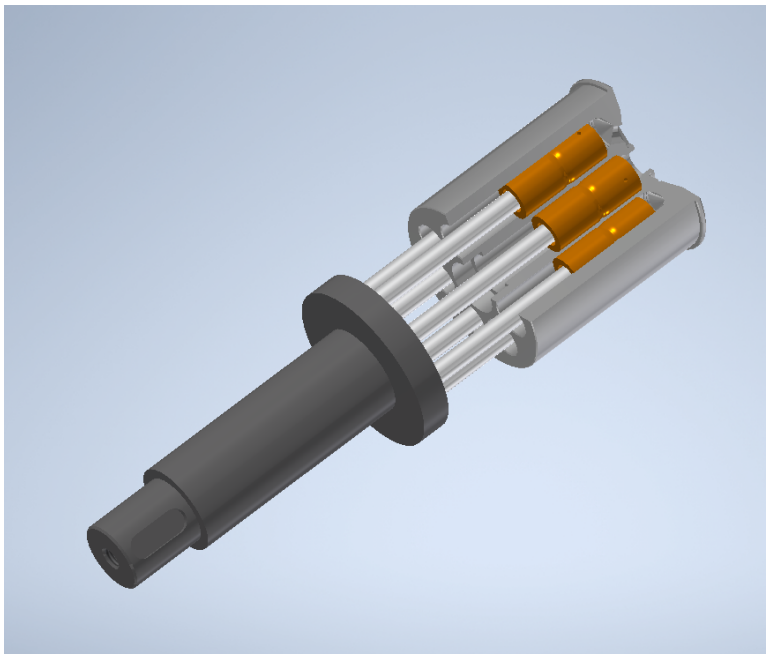


Рис.2. Сборочная единица Узел качающий

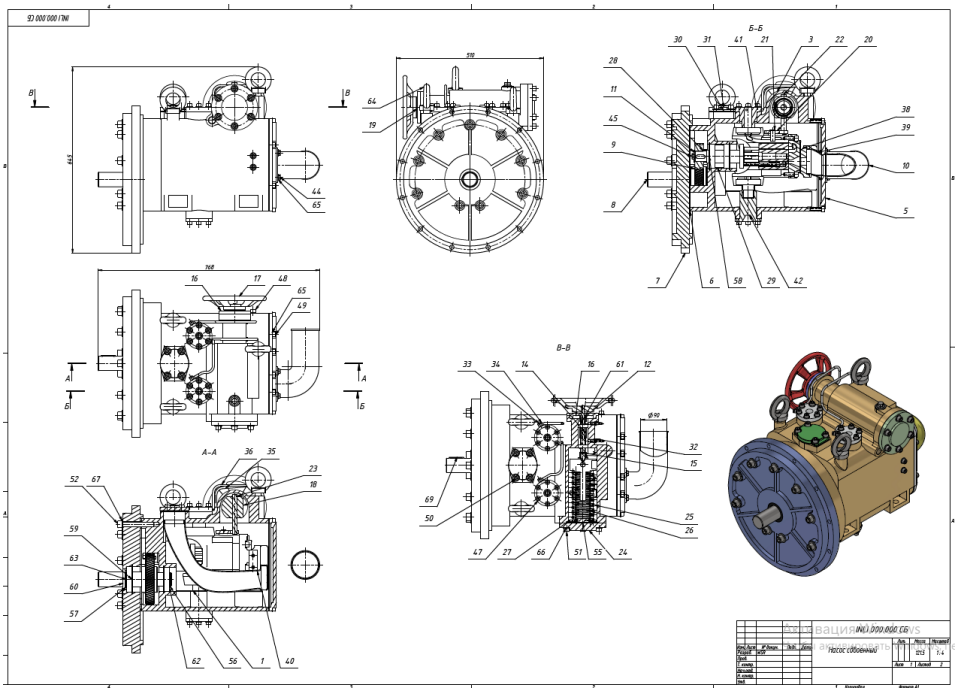


Рис. 3. Сборочный чертеж насоса

5. **Презентация проекта** является неотъемлемой частью разрабатываемого проекта. САПР Autodesk Inventor обладает встроенным модулем для создания презентаций. Inventor Studio — это среда визуализации и анимации для деталей Autodesk Inventor. В этой среде имеется собственный набор команд и уникальных узлов браузера, предназначенных для визуализации и анимации [2]. Команду визуализации можно выполнить без улучшения геометрии, полученной непосредственно из деталей Autodesk Inventor, или добавить освещение и точки обзора камеры, улучшающие качество восприятия и создающие ощущение масштаба или пространства при визуализации, а также основание, фон (рис. 4).

Созданием анимационного видеоролика можно показать процесс работы насоса, или процесс сборки-разборки насоса с целью профилактики и ремонта.

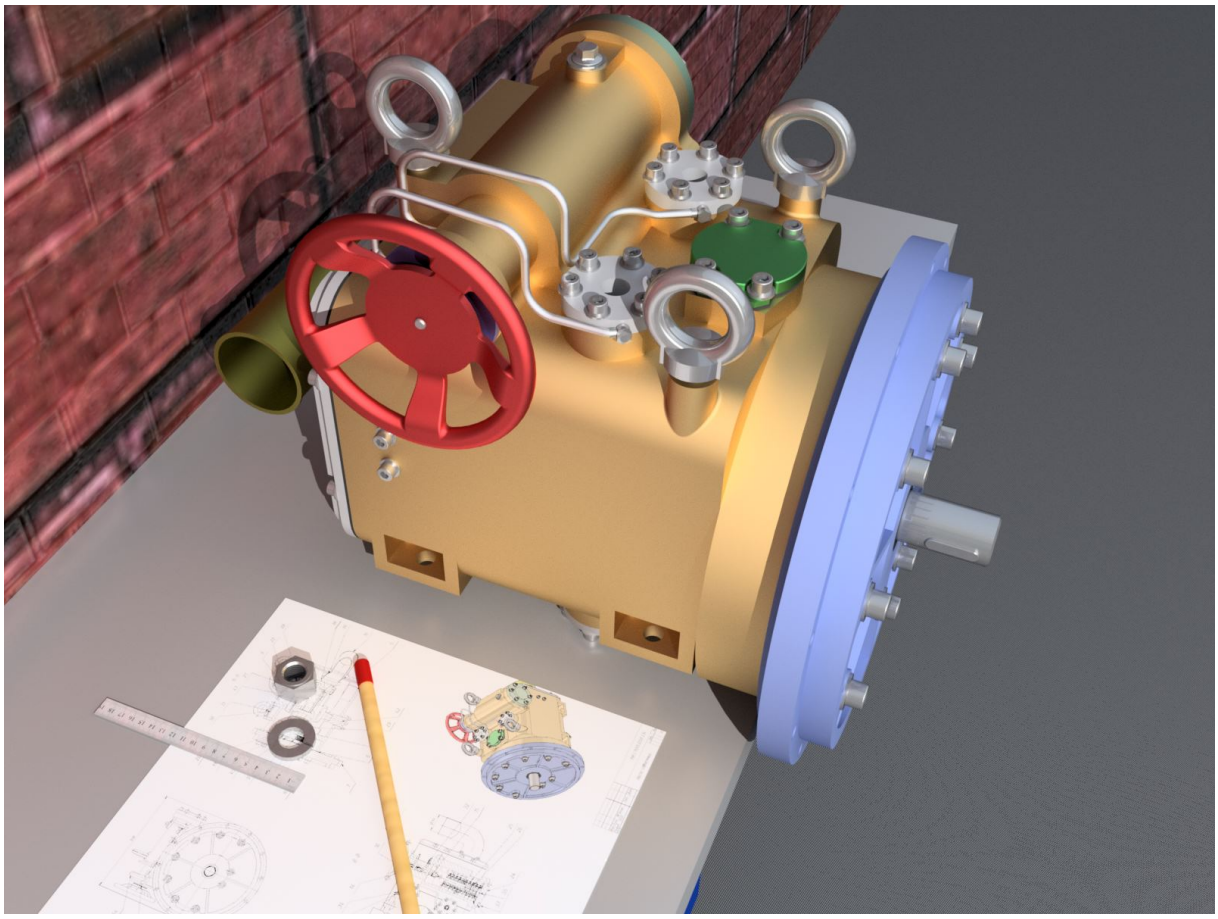


Рис. 4. Фотореалистичное изображение насоса

Таким образом, мы прошли все этапы разработки проекта сдвоенного аксиально-поршневого регулируемого насоса типа 223.20 от изучения принципов работы до презентации проекта. Данная разработка может быть использована в учебном процессе при изучении тепло-массообменных процессов и аппаратов.

Литература:

1. https://www.gidrosila.ru/info/aksialno-porshnevoj-nasos/
2. https://www.autodesk.ru/products/inventor/overview

УДК 378.1

ВНЕАУДИТОРНАЯ РАБОТА СТУДЕНТОВ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Юрченко Я.А., Мухаметзянова А.Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: YanaYurchenko0407@gmail.com

С каждым годом системы автоматизированного проектирования (САПР) укрепляют свои позиции в области технологической подготовки производства. Сегодня вопрос автоматизации процессов конструкторско-технологической разработки новых изделий является скорее риторическим. В англоязычной литературе программы этого класса обычно называют CAD/CAM/CAE/PDM-системы.

CAD-технологии обеспечивают автоматизацию конструкторских работ на основе широкого применения средств компьютерной графики и геометрического моделирования. Объемные (3D) электронные модели изделия, созданные в CAD-системах, служат основой для выполнения инженерного анализа (CAE-технологии) и технологического моделирования (CAM-технологии). Системы управления техническим документооборотом (PDM) обеспечивают защиту и хранение всех инженерных данных в электронном архиве, а также поддерживают организацию коллективной работы над проектами сложных технических изделий в едином информационном пространстве предприятия.

Комплексное решение задач технологической подготовки производства и внедрение достижений прикладных компьютерных технологий в промышленности сдерживается целым рядом объективных и субъективных причин. В качестве одной из самых острых проблем экспертами отмечается нехватка квалифицированных специалистов, профессионально владеющих средствами обеспечения современных САПР.

Для решения этой проблемы необходимо внедрить в учебный процесс подготовки кадров метод сквозного обучения, который заключается в комплексном подходе к освоению систем автоматизированного проектирования: последовательное изучение всех модулей графических дисциплин, начиная с основ инженерной графики и начертательной геометрии и заканчивая системами автоматизированного проектирования, которые требуют соответствующей подготовки.

В современной высшей школе при общей тенденции сокращения аудиторного времени и невозможности уменьшения объема содержания курса создаются трудности, как при преподавании, так и при усвоении графических дисциплин студентами. Именно поэтому внеаудиторная работа занимает одно из ведущих мест и является неотъемлемой частью всей системы обучения. Внеаудиторная работа – это специально организуемые внеучебные занятия, которые

способствуют углублению знаний, развитию умений и навыков, удовлетворению и развитию интересов и способностей. В ходе внеаудиторной деятельности студенты привлекаются к выполнению научно-исследовательской работы, которая органично сочетается с учебной деятельностью и помогает им овладеть современными методами поиска, обработки и использования информации, нацеливает на творческую реализацию приобретаемых в вузе знаний, умений и навыков.

На кафедре инженерной компьютерной графики и автоматизированного проектирования (ИКГАП) ФГБОУ ВО «КНИТУ» во внеурочное время проводятся занятия, которым можно дать название - научный кружок «Инженерный дизайн CAD» по компьютерному 3D-моделированию и программированию с использованием CAD-систем. Программа кружка ориентирована на углубление и расширение графических знаний студентов, приобретение опыта графической профессионально-ориентированной деятельности.

Под термином «Инженерный дизайн CAD» подразумевается процесс использования САПР при подготовке графических моделей, чертежей, бумажных документов и файлов, содержащих всю информацию, необходимую для создания физического прототипа изделия.

Технические и рабочие чертежи конструкций и изображения с помощью соответствующих обозначений должны передавать такую информацию как материалы, технологические процессы, допуски и размеры. С помощью САПР строятся кривые и составляются двухмерные (2D) изображения, а также трёхмерные (3D) кривые, поверхности и объёмные фигуры. С помощью САПР можно реализовать специальные эффекты в виде анимации, например, с целью рекламы или для использования в технических инструкциях.

В ходе выполнения внеаудиторной работы студентами приобретаются такие знания и умения [1]

- трехмерное моделирование детали (твердотельной детали, детали из листового металла, рамные, сварные, механические конструкции, детали и узлы);

- трехмерное моделирование сборочных узлов; - создание сборки;

- создание тонированных изображений фотографического качества (рендеринг); - создание симуляций (принципа работы изделия);

- обратное конструирование физической модели (реинжениринг).

За основу развития таких навыков был выбран программный комплекс Autodesk Inventor, который имеет в своем арсенале:

- встроенный видеокурс обучения;

- наглядный и понятный интерфейс;

- возможность бесплатного использования в образовательной деятельности;

- возможность создавать изделия, повысить производительность проектирования и документирования;

- широкие возможности по 3D моделированию;

- возможность выполнить расчет физических характеристик и подобрать подходящие материалы;

- обширную библиотеку, что позволяет не вычерчивать стандартные детали (болты, шайбы, подшипники и прочее);

- возможность создания анимации и проведения кинематических анализов;

- и др.

Основной формой работы в научном кружке является метод проектов, направленный на выработку самостоятельных исследовательских умений, способствующий развитию творческих способностей и логического мышления, объединяющий знания, полученные в ходе учебного процесса и приобщающий к конкретным жизненно важным проблемам.

Проект от других видов самостоятельной творческой работы (доклад, реферат и др.) отличает соблюдение определенной последовательности работы, соответствующей этапам поисковой исследовательской деятельности человека: проблемная ситуация → определение проблемы → поиск методов решения проблемы → получение продукта (решение проблемы).

Таким образом, выполнение проекта – это работа, направленная на решение конкретной проблемы, на получение заранее запланированного результата. На начальном этапе работы в проекте должны присутствовать: анализ исходной ситуации; выделение определенной проблемы и формулировка цели; описание ожидаемого результата; план предстоящей работы.

Работа над проектом считается завершенной, если - исходная проблема решена; - создан проектный продукт; - представлен письменный отчет о работе; - проведена публичная презентация проекта.

Занятия в кружке проводятся по следующим разделам: Раздел 1. «Механические сборки и детальные чертежи для производства»; Раздел 2. «Машиностроительное производство»; Раздел 3. «Внесение изменений в конструкцию»; Раздел 4. «Обратное конструирование по физической модели».

По итогам выполнения разделов приобретаются следующие навыки и умения:

- чтение чертежей,

- чтение эскизов,

- построение с помощью выбранного программного обеспечения 3D-моделей, сборок, пространственных рам, деталей из листового металла, создание чертежей, схем сборки-разборки, анимационных видеороликов.

- внесение изменений в модели, сборки в соответствии с заданием;

- создание анимационных видеороликов процесса функционирования сборки;

- работа с параметрическими сборками;
- создание фотореалистичных изображений;
- 3D-печать;
- умение работать с измерительным инструментом;
- эскизирование [1].

Особенности, выполняемых студентами расчетно-графических заданий:

- имеют прикладной характер (их решение раскрывает взаимосвязь теории и практики, применение графических знаний, умений и навыков в смежных учебных дисциплинах, в профессиональной деятельности);
- преимущественно творческого содержания (включают элемент неизвестности, требуют использования нестандартных методов решения);
- различаются по уровню сложности и требуют от студента применения разных мыслительных операций.

Таким образом, расчетно-графические задания рассматриваются как проблемные, решение которых осуществляется в ходе поисковой деятельности, где происходит ознакомление студентов с некоторыми аспектами будущей профессиональной деятельности, развиваются умения поиска и обработки информации, работы с нормативно-справочной литературой, стандартами ЕСКД.

Преподаватель научного кружка выполняет все организаторские функции: обеспечивает активную учебно-познавательную деятельность, осуществляет координацию, наблюдение за текущей работой студентов, оказывает консультационную помощь, оценивает результаты деятельности.

Принимая участие в работе кружка, студенты продемонстрировали способность разрабатывать конструкторскую технологическую документацию, компьютерные модели изделий и технологических процессов машиностроительного производства с помощью современных САПР, показали знания и умения профессиональных САПР-ориентированных компетенций. Такая технология внеаудиторной работы со студентами по компьютерному 3D-моделированию с использованием CAD-систем оказалась достаточно эффективной.

В заключение отметим, что научный кружок «Инженерный дизайн CAD» способствует повышению уровня инженерно-графической подготовки, расширению знаний о графических способах решения задач в профессиональной деятельности; позволяет привить навыки самостоятельного отбора, изучения специальной литературы, умения ставить цели, делать выводы и обобщения, т.е. приобщить студентов к элементам научно-исследовательской деятельности, которая является обязательным условием эффективной работы вуза.

Литература:

1. Техническое описание компетенции «Инженерный дизайн CAD» // https://www.spo.mosmetod.ru/docs/safety-and-health/requirements/11_Inzhenernyj_dizajn_CAD(SAPR)/05_2017_TO_Inzhenernyj_dizajn_CAD(SAPR).pdf. Открытый доступ.

УДК 67.06: 66.040.287

ПИРОЛИЗНЫЙ РЕАКТОР С ЛОТКАМИ

Родионов А.С., Сафин Р.Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: rodionov2014@bk.ru

На (рис. 1) изображена схема реактора, в котором может быть осуществлен способ низкотемпературного пиролиза биомассы растительного и животного происхождения.

Реактор состоит из вертикального корпуса 1, имеющего в верхней части узел загрузки 2, а в нижней части - узел выгрузки 3 биомассы. В корпусе 1 реактора имеются лотки 4 и 5, на которых осуществляется процесс низкотемпературного пиролиза. Лотки имеют отверстия для выгрузки биомассы на нижний лоток (на схеме не показаны).

Лотки 4 и 5 имеют рубашки, в которые подается высокотемпературный теплоноситель, нагреваемый во внешнем источнике (на фигуре 1 не показан). Днище лотков 4 и 5 также обогревается высокотемпературным теплоносителем. Нижний лоток 6 имеет рубашку для подачи охлаждающей воды, в его боковой стенке также расположена форсунка 7 для подачи охлаждающей воды.

Биомасса растительного или животного происхождения с одного на другой лоток реактора перемещается с помощью лопастей мешалки 8, установленных на валу мешалки 9.

Выделяющиеся при пиролизе газообразные продукты удаляются из реактора по трубопроводу 10.

Установка работает следующим образом. В рубашки лотков 4 и 5 корпуса реактора 1 подается высокотемпературный теплоноситель, нагретый во внешнем источнике. После того как температура во внутреннем объеме лотков достигнет необходимой величины (230-250°С), через узел загрузки 2 в верхний лоток 4 подается порция биомассы растительного или животного происхождения. При прогреве из загруженной биомассы, непосредственно соприкасающейся с боковыми стенками и днищем лотка, выделяются газообразные продукты пиролиза, которые, поднимаясь, способствуют быстрому прогреву всего объема биомассы, загруженной в лоток. Прогрев биомассы, расположенной на лотках 4 и 5, происходит также за счет кондуктивного теплообмена частиц биомассы друг с другом, с боковыми стенками и днищем лотков [1].

После выдержки в течение 30-40 мин биомасса с лотка 4 перегружается с помощью мешалки 8 в лоток 5, а во внутренний объем лотка 4 загружается следующая порция биомассы. По истечении следующих 30-40 мин биомасса из

лотка 5 выгружается в лоток 6, а во внутренний объем лотка 5 загружается биомасса из лотка 4.

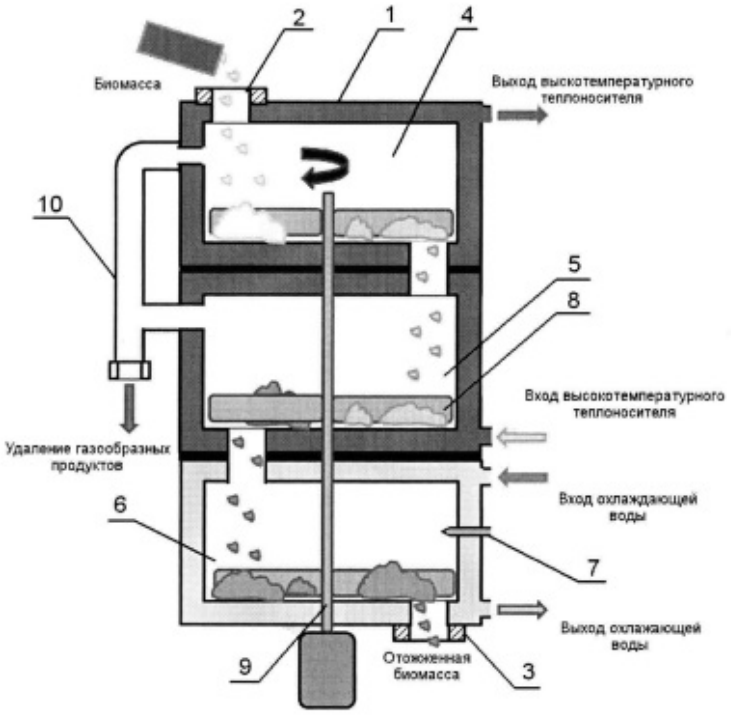


Рис. 1. Пиролизный реактор с лотками

Во внутренний объем лотка 6 через форсунку 7 подается охлаждающая вода. Поскольку биомасса, загруженная в лоток 6, имеет температуру 230-250°С, то эта вода испаряется, охлаждая биомассу до температуры не ниже 160°С, но не смачивая ее. После снижения температуры биомассы до 160°С подача воды через форсунки прекращается и биомасса охлаждается до температуры 45-60°С благодаря холодной воде, подаваемой в рубашку лотка 6.

Охлажденная биомасса выгружается через узел выгрузки 3, пары воды удаляются из внутреннего объема реактора по трубопроводу 10 [2,3].

Литература:

1. Патент 2644908 (РФ) C10B 53/02 (2006.01) Способ получения сорбента органических соединений / Михайлов О.Ю., Исьемин Р.Л., Кузьмин С.Н., и др.;заявлено 15.11.2016; опубл. 14.02.2018.

2. Родионов А.С. «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы». УСТАНОВКА ПИРОЛИЗАШАХТНОГО ТИПА. с. 7-9.

3. Родионов А.С. «Интеллектуальный потенциал общества как драйвер инновационного развития науки». КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ. с. 7-9.

УДК 67.05: 66.040.287

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПИРОГЕНЕТИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

Родионов А.С., Сафин Р.Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: rodionov2014@bk.ru

Установка пирогенетической переработки органических отходов (рис. 1) включает камеру пиролиза 3, муфельную печь 2, обогреваемую трубку 4, смолоуловитель 9, конденсатор 11, мерник жижки 13, емкость для сбора газа 15, гидрозатвор 14. Камера пиролиза 3, нагреваемая муфельной печью 2, выполнена из стали 15Х25Т и имеет цилиндрическую форму. Крышка 20 присоединяется к корпусу посредством фланцевого соединения с шип-пазом 18, 19, что обеспечивает достаточную герметичность камеры. Патрубок пиролизной камеры, отводящий пиролизные газы, соединяется с обогреваемой трубкой 4 для поддержания паров высококипящих компонентов (пиролизной смолы) в газообразном состоянии. Ее нагрев осуществляется электронагревателем 6. Для снижения потерь тепла электронагреватель 6 снабжен асбестовой теплоизоляцией 7. Терморегулятор 8 поддерживает заданную температуру обогреваемой трубки, измеряя ее хромель- копелевой термопарой 5. В смолоуловителе 9 происходит конденсация высококипящих компонентов. Металлическая стружка 10 предназначена для увеличения поверхности конденсации и сборки пиролизной смолы. Конденсатор 11 предназначен для охлаждения паров жижки. Для его охлаждения применяется проточная вода, проходящая через конденсатор в режиме противотока. Расход проточной воды замеряется расходомером 12. Сконденсированная жижка отбирается в мерник жижки 13. Несконденсированные газы попадают в сборник газа через гидрозатвор 14.

При подготовке установки к работе в паз 18 фланца укладывается термостойкая прокладка 17, толщиной около 1 мм (выполняется из паронита или термостойкого герметика). Затем в камеру пиролиза засыпается исходное сырье и закрывается крышка 20. Собранная камера помещается в муфельную печь 2 и последовательно присоединяется обогреваемая трубка 4, смолоуловитель 9, конденсатор 11, мерник жижки 13 и сборник газов 14,15. [1].

Исходные данные эксперимента: температура муфельной печи – 500℃, внутри обогреваемой трубки – 350 ℃, давление – атмосферное, масса сырья – 180 гр, продолжительность эксперимента – до прекращения выделения жижки и несконденсированного газа, расход проточной воды – 0,5 $м^3$/ч. Сырье для пиролиза: скорлупа грецкого ореха; хлопчатые текстильные отходы, измельченные

до размеров 20÷25 мм; отходы резинотехнических изделий (автомобильные коврики), измельченные до размеров 10÷15.

В ходе эксперимента фиксируются следующие параметры: продолжительность эксперимента; начало выделения жижки и несконденсированного газа; продолжительность наполнения емкости для сбора несконденсированных газов 15; текущий объем жижки в мерной колбе 13; окончание выделения жижки и несконденсированного газа. По мере прогрева пиролизной камеры воздух, находящийся в ней расширяется, вследствие этого в емкость 15 подается воздух. Это может внести погрешность в расчет массы пиролизного газа. Во избежание этого отсчет объема газа начинается с момента выхода жижки из конденсатора [2].

После завершения эксперимента муфельная печь отключается и открывается дверка 21, для ускорения процесса охлаждения включается вентилятор 19. Когда температура внутри муфельной печи опускается до 300℃, отключается подача воды в конденсатор 2, сливается жижка из мерника 3 и отправляется на анализ. После полного остывания установка разбирается, из муфельной печи 5 извлекается пиролизная камера 1, снимается ее крышка, полученный уголь взвешивается и отправляется на анализ для дополнительного исследования [3].

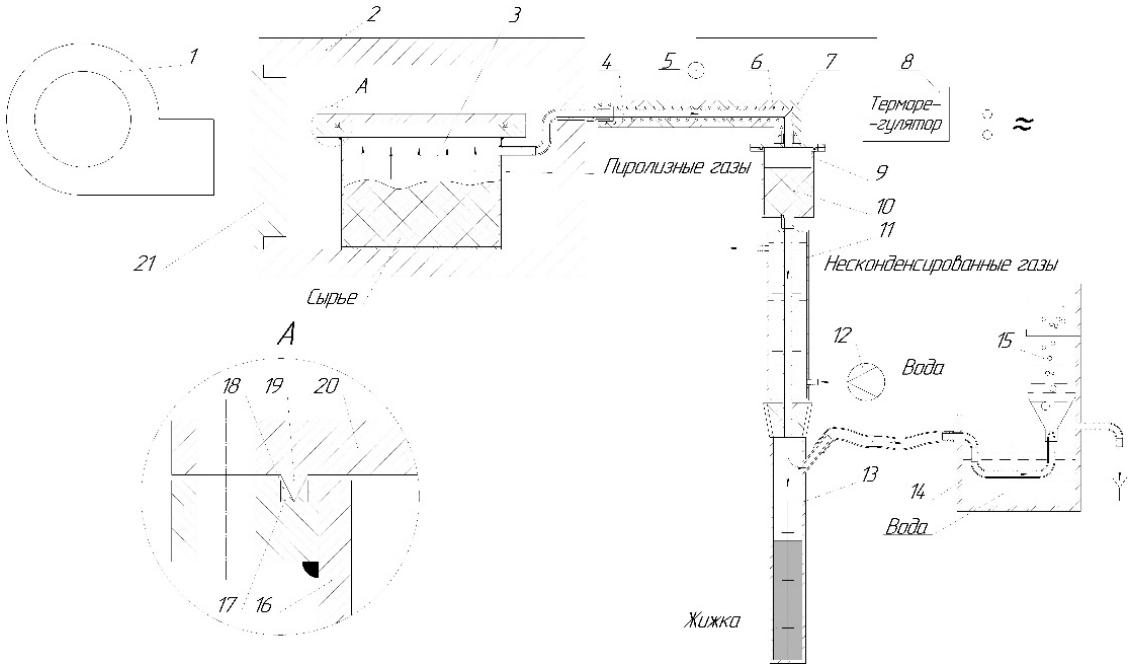


Рис 1. Схема экспериментальной установки пиролиза: 1 – вентилятор; 2 – муфельная печь; 3 – камера пиролиза; 4 – обогреваемая трубка; 5 – термопара; 6 – нагревательный элемент; 7 – теплоизоляция; 8 – терморегулятор; 9 – смолоуловитель; 10 – металлическая стружка; 11 – конденсатор; 12 – расходомер; 13 – мерник жижки; 14 – гидрозатвор; 15 – емкость для сбора газа; 16 – корпус; 17 – уплотнитель; 18 – шип; 19 – паз; 20 – крышка

Литература:

1. Кислицын А.Н. Пиролиз древесины: кинетика, продукты, новые процессы. – М.: Лесн.про-сть, 1990. – 312 с.

2. Применение процесса быстрого абляционного пиролиза древесных отходов для выработки жидкого топлива. Грачев А.Н., Семенов Ю.П., Николаев А.Н., Кашапов Н.Ф., Макаров А.А. Лесной вестник. 2009 № 3. С. 88-94.

3. Химический сотав фенольной фракции смолы абляционного пиролиза древесины. Микулинцева М.Ю., Пономорев Д.Р., Грачев А.Н., Покрышкин С.А., Косяков Д.С. Лесной журнал. 2019 № 3. С. 76-87.

УДК 67.05: 66.040.287

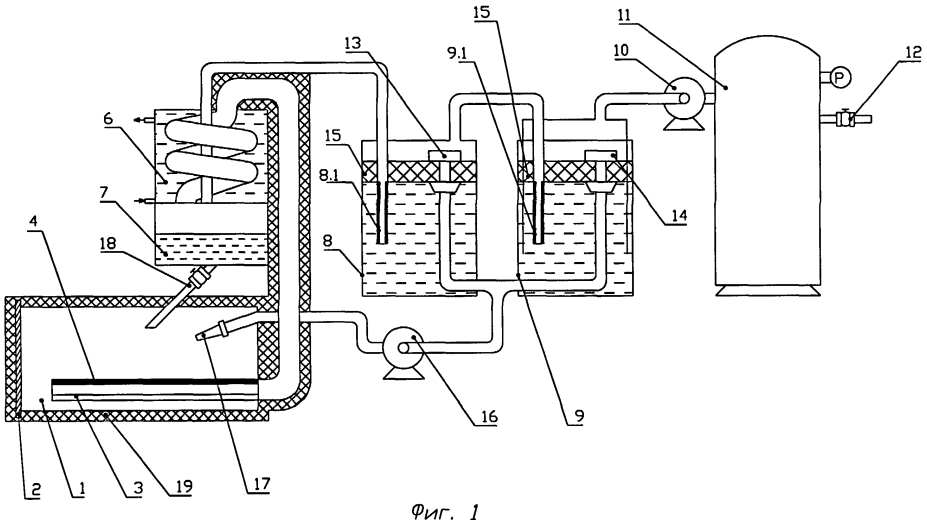
УСТАНОВКА ПИРОЛИЗА С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ

Хайруллин И.Ф., Сафин Р.Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: himikfizik@mail.ru

Установка для пиролиза (рис. 1) углеводородных отходов содержит термореактор 1 с герметично закрывающейся крышкой 2. Внутри термореактора 1 размещен электронагреватель 3 с катализатором 4. Термореактор 1 через электронагреватель 3 с газоприемной щелью 5 соединен с конденсатором 6, выполненным в виде холодильника с проточной водой и соединенным с отстойником 7 для жидких осадков. Отстойник 7 соединен газоотводной трубой с гидрозатвором 8, соединенным газоотводной трубой с измерительным гидрозатвором 9. На внутренней поверхности участков газоотводных труб, размещенных в водном объеме гидрозатворов 8, 9 имеются катализаторы 8.1, 9.1. Гидрозатвор 9 соединен с компрессором 10, который соединен с ресивером 11. Ресивер 11 соединен с вентилем 12, через который газ подается потребителю. Приемники 13, 14 жидких углеводородов 15 гидрозатворов 8, 9 через насос 16 соединены с форсункой 17, расположенной в термореакторе 1. Приемник отстойника 7 для жидких осадков через патрубок с вентилем 18 соединен с термореактором 1. Термореактор 1 и труба газохода для пиролизных газов имеют теплоизоляционное покрытие 19 [1].

Установка для пиролиза углеводородных отходов работает следующим образом. В термореактор 1 загружают углеводородные отходы и герметично закрывают его крышкой 2. На электронагреватель 3 подается напряжение питания. Температура внутри термореактора 1 поднимается, и происходит пиролиз загруженной биомассы. В результате деструкции биомассы в термореакторе 1 вокруг электронагревателя 3 образуется угольный осадок, а газовая составляющая, пройдя через него, уходит через приемную щель 5 электронагревателя 3 в конденсатор 6. Охлаждаясь и конденсируясь, кислотные и масляные составляющие попадают в отстойник 7 для жидких осадков. Более легкие топливные фракции газа, проходя через газоотводную трубу с катализатором 8.1 и гидрозатвор 8, очищаются, образуют жидкие углеводороды 15 и поступают через газоотводную трубу с катализатором 9.1 в гидрозатвор 9 измерительный, где также образуют слой жидких углеводородов 15. Охлажденный и очищенный топливный газ компрессором 10 закачивается в ресивер 11, откуда подается потребителю через вентиль 12. После прекращения процесса пиролиза полученные отделенные от газа жидкие углеводороды 15 через приемники 13, 14 насосом 16 подаются в форсунку 17. Кислотно-органические фракции из отстойника 7 гравитационно

поступают в термореактор 1 через патрубок с вентилем 18 и попадают на термоактивный уголь. При этом реагентами, подаваемыми через форсунку 17 и патрубок 18, осуществляется ворошение биомассы и пирокарбона. Поверхность угля увеличивается, он становится более активным. Углерод, отбирая кислород у кислотно-органических фракций, превращает их в топливные газы. Процесс пиролиза жидких составляющих повторяется [2,3]



Фиг. 1

Рис. 1. Пиролизер с нагревом от электронагревателя

Литература:

1. Патент 2225573 (РФ) F 23 G 5/027, 7/00 Установка для пиролиза углеводородных отходов / Глушков В.А.;заявлено 29.07.2002; опубл. 10.03.2004.

2. Родионов А.С. «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы». УСТАНОВКА ПИРОЛИЗАШАХТНОГО ТИПА. с. 7-9.

3. Родионов А.С. «Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы». ПИРОЛИЗАТОР ШАХТНОГО ТИПА. с. 13-14.

Секция 2

УДК 66.023:[66.048+66.071.7]001.2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПЕННОМ СЛОЕ

Аласгарли С.У., Лаптев А.Г.
Казанский государственный энергетический университет,
E-mail: tvt_kgeu@mail.ru

Процессы охлаждения (нагрева) газов и жидкостей при непосредственном контакте фаз широко применяется в химической технологии и энергетике. Межфазный контакт организуется в градирнях, скрубберах и барботажных колоннах различных конструкций. Причем часто такие процессы сопровождаются сепарацией дисперсной фазы из газов (мокрой очистки). Для расчета таких аппаратов в основном применяются эмпирические и полуэмпирические методы, так как в таких аппаратах режим, как правило, интенсивный турбулентный и площадь поверхности контакта фаз в большинстве случаев неизвестна, особенно в барботажных и вихревых аппаратах.

Целью данной работы является представить математическую модель и алгоритм расчета колонны-скруббера с барботажными тарелками охлаждения жидкости газом. При заданном расходе жидкости и термодинамических характеристиках газа требуется выбрать конструктивные и режимные параметры барботажной тарелки.

Тепловая эффективность охлаждения воды воздухом

$$E_{ж} = \frac{T_{жн} - T_{жк}}{T_{жн} - T_{м.т.}}, \quad (1)$$

где $T_{жн}$, $T_{жк}$ – начальная и конечная температура воды, °С; $T_{м.т.}$ – температура мокрого термометра, °С (теоретический предел охлаждения).

Тепловая эффективность нагрева воздуха водой в виде разности температур

$$E_{г} = \frac{T_{гк} - T_{гн}}{T_{ж.ср} - T_{гн}}, \quad (2)$$

где $T_{гн}$, $T_{гк}$ – начальная и конечная температура воздуха, °С; $T_{ж.ср}$ – средняя температура воды в барботажном слое °С.

Тепловая эффективность по газовой фазе в виде разности энтальпий

$$E_{г} = \frac{I_{гк} - I_{гн}}{I_{гр} - I_{гн}}, \quad (3)$$

где $I_{гн}$, $I_{гк}$ – начальная и конечная удельные энтальпии воздуха, Дж/кг; $I_{гр}$ – среднее значение энтальпии на границе раздела фаз при средней температуре жидкости $T_{ж.ср}$ на линии насыщения, т.е. при относительной влажности $\varphi = 100\%$.

Тепловой баланс

$$Q = Lc_{\text{рж}}(T_{\text{жн}} - T_{\text{жк}}) + Q_{\text{и}} = G(I_{\text{гк}} - I_{\text{гн}}), \tag{4}$$

где Q – поток теплоты, Вт; L, G – массовые расходы жидкости и газа, кг/с; $Q_{\text{и}}$ – поток теплоты с испарившейся жидкостью, Вт; $Q_{\text{и}} = c_{\text{рж}} T_{\text{ж.ср}} G(C_{\text{к}} - C_{\text{н}})$; $c_{\text{рж}}$ – средняя удельная теплоемкость жидкости фазы, Дж/(кгК); $C_{\text{н}}$, $C_{\text{к}}$ – начальное и конечное влагосодержание воздуха, кг/кг.

Эффективность испарения воды

$$E_x = \frac{C_{\text{к}} - C_{\text{н}}}{C^*_{\text{ср}} - C_{\text{н}}}, \tag{5}$$

где $C^*_{\text{ср}}$ – среднее влагосодержание насыщенного воздуха на выходе из барботажного слоя при температуре $T_{\text{ж.ср}}$ и относительной влаги $\varphi = 100\%$.

Из выражения (5) поток теплоты представим в форме $Q_{\text{и}} = c_{\text{рж}} T_{\text{ж.ср}} G E_x (C^*_{\text{ср}} - C_{\text{н}})$.

С применением тепловых эффективностей (1) и (3) тепловой баланс (4) запишется в следующем виде

$$Q = Lc_{\text{рж}} E_{\text{ж}} (T_{\text{жн}} - T_{\text{м.т}}) + Q_{\text{и}} = GE_{\text{г}} (I_{\text{гр}} - I_{\text{гн}}). \tag{6}$$

При термодинамических параметрах влажного воздуха ($T_{\text{гн}}$, $C_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$), массовом расходе воздуха G и заданных температурном режиме охлаждения воды (L, $T_{\text{жн}}$, $T_{\text{жк}}$) и, соответственно, тепловой эффективности $E_{\text{ж}}$ (1), требуемая тепловая эффективность по газовой фазе составит значение

$$E_{\text{г}} = \frac{Lc_{\text{рж}} E_{\text{ж}} (T_{\text{жн}} - T_{\text{м.т.}}) + Q_{\text{и}}}{G(I_{\text{гр}} - I_{\text{гн}})}, \tag{7}$$

где $I_{\text{гн}} = c_{\text{рсв}} T_{\text{гн}} + (r_{\text{о}} + c_{\text{рп}} T_{\text{гн}}) C_{\text{гн}}$; $I_{\text{гр}} = c_{\text{рсв}} T_{\text{ж.ср}} + (r_{\text{о}} + c_{\text{рп}} T_{\text{ж.ср}}) C^*_{\text{ср}}$, где $c_{\text{рсв}}$ – теплоемкость сухого воздуха, Дж/(кгК); $c_{\text{рп}}$ – теплоемкость водяного пара, Дж/(кгК); $r_{\text{о}}$ – удельная теплота парообразования, Дж/кг.

Если из выражения (7) будет получено $E_{\text{г}} > 1$, то тепловой баланс нарушается и следует увеличить массовой расход воздуха G до $E_{\text{г}} < 1$, например до значения $E_{\text{г}} \approx 0{,}8$.

Важной задачей в рассмотренной постановке является определение тепловой эффективности нагрева воздуха в барботажном слое. Известно, что на барботажных тарелках при устойчивом режиме принимается практически идеальное вытеснение газа.

Тогда эффективности $E_{\text{г}}$ и E_x записываются в форме

$$E_{\text{г}} = 1 - \exp(-N_{\text{ог}}), \tag{8}$$

$$E_x = 1 - \exp(-N_{\text{ох}}), \tag{9}$$

где $N_{ог}$ – общее тепловое число единиц переноса в барботажном слое; N_{ox} – массообменное число. При охлаждении или нагреве газов при непосредственном контакте с жидкой фазой основное сопротивление переносу тепла и влаги сосредоточено в газовой фазе, тогда общее число единиц переноса равно частному $N_{ог} = N_{г} = \alpha_{г} F / (c_{рг} G)$, где $\alpha_{г}$ – средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^{2}К); F – площадь межфазной поверхности, м^2; $c_{рг}$ – удельная теплоемкость газа, Дж/(кгК).

Аналогично $N_{ox} = N_{x} = \rho_{г} \beta_{г} F / G$, $\beta_{г}$ – коэффициент массоотдачи, м/с.

Для определения произведений $\alpha_{г} F$ и $\beta_{г} F$ используются два подхода. Первый заключается в раздельном исследовании коэффициентов $\alpha_{г}$ и $\beta_{г}$ и величины межфазной поверхности F. Второй в исследовании произведений $\alpha_{г} F$ и $\beta_{г} F$ экспериментально или методами математического моделирования.

Результаты расчета $E_{г}$ по формуле (8) согласуются (± 5%) с экспериментальными данными [1].

Для ситчатой тарелки далее использован второй подход [2].

Пример расчета

Вода поступает на охлаждение с начальной температурой $T_{жн} = 40$ °С и расходом $L = 1{,}0$ кг/с. Требуется охладить воду до температуры $T_{жк} = 25$ °С воздухом с расходом $G = 1{,}0$ кг/с и начальной температурой $T_{гн} = 18$ °С, относительной влажностью $\varphi = 60$ % ($C_{н} = 0{,}0075$ кг/кг). Температура смоченного термометра $T_{м.т} = 14{,}4$ °С. Энтальпия воздуха на входе $I_{гн} = 36770$ Дж/кг. Средняя температура воды $T_{жср} = 32{,}5$ °С. Энтальпия при $\varphi = 100$ % и $T_{жср}$ равна $I_{гн} = 108150$ Дж/кг. Тепловая эффективность охлаждения воды по выражению (1) $E_{ж} = 0{,}585$ и требуемая тепловая эффективность по газовой фазе (7) $E_{г} = 0{,}876$. Получили, что заданном температурном режиме и расходах фаз охлаждение воды возможно.

Для ситчатой тарелки рабочая скорость газа в колонне $w_{г} = 1{,}2$ м/с. Тогда диаметр колонны $D_{к} = 0{,}92$ м. Принимаем $D_{к} = 1{,}0$ м и уточняем скорость газа $G / \rho_{г} = S_{к} w_{г}$, получаем $w_{г} = 1{,}1$ м/с при $S_{к} = 0{,}785$ м^2. Далее необходимо для заданного режима ($w_{г} = 1{,}1$ м/с и $L = 1{,}0$ кг/с) выбрать такие конструктивные характеристики ситчатой тарелки, которые обеспечивают $E_{г} = 0{,}84$, если с запасом на 5%, то $E_{г} = 0{,}882$. С применением выражений (8), (10) при $h_{ст} = 0{,}03$ м получаем $E_{г} = 0{,}89$, т. е. требуемая тепловая эффективность обеспечивается без запаса. Например, при $h_{ст} = 0{,}04$ м имеем $E_{г} = 0{,}929$, т.е. с запасом 6 %.

Для полученного режима $w_{\text{г}} = 1{,}1$ м/с и удельного расхода воды к длине переливной планки $l_{\text{сп}}$ имеем $V_{\text{ж.сп}} = L / (\rho_{\text{ж}} l_{\text{сп}}) = 5{,}0$ м^3/(м час). С применением известных эмпирических зависимостей для расчета $h_{\text{ст}}$ выбирается высота переливают планки, обеспечивающая $h_{\text{ст}} = 0{,}04$ м.

Таким образом, разработанный алгоритм расчета охлаждения воды в барботажном слое позволяет выбрать режимные и конструктивных характеристики тарелки в скруббере и может применяться в решении инженерных задач.

Литература:

1. Тарат, Э. Я. Пенный режим и пенные аппараты: монография – Л.: Химия, 1977. – 303 с.

2. Лаптев А. Г., Башаров М. М., Лаптева Е. А. Математические модели и методы расчетов тепломассообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах : – Казань : КГЭУ; Старый Оскол : ТНТ, 2021. – 288 с.

УДК 66.011, 66.048.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕГЕНЕРАЦИИ РАСТВОРИТЕЛЕЙ МЕТОДОМ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ АЗЕОТРОПНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ

Алексеев К.А., Латыпов Д.Р.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ООО Инженерно-Внедренческий Центр «Инжехим»,
E-mail: konstantin_aleks@inbox.ru

Благодаря низкой токсичности, растворители на основе этилацетата получили широкое распространение в химической, лесохимической, фармацевтической и других отраслях промышленности. Объем их мирового производства непрерывно возрастает, параллельно возрастает и актуальность разработки и совершенствования промышленного способа очистки и регенерации этих растворителей, так как регенерируемые системы, как правило, характеризуются сложной азеотропией, что затрудняет использование стандартных приемов для их разделения. Выбор эффективного варианта схемы разделения является одной из ключевых задач современной технологии, решение которой во многом обуславливается составом исходного сырья, что приводит к сложной и энергоемкой системе выделения целевого продукта [1] с использованием методов гетероазеотропной или экстрактивной ректификации [2].

В данной работе решается задача регенерации системы Метанол (37,1 % мол.) – Этанол (0,8 % мол.) – Этилацетат (17,3 % мол.) – Толуол (44,8 % мол.) методом математического моделирования процесса периодической азеотропной ректификации с помощью программного пакета ChemCAD (Chemstations Inc.).

Для описания фазового равновесия использована групповая модель UNIFAC, которая обеспечивает точность предсказания коэффициентов активности и парожидкостного равновесия достаточную для технологических целей. Адекватность моделирования проверялась путем сопоставления экспериментальных и расчетных значений азеотропных характеристик, среднее абсолютное отклонение по температурам кипения и составу азеотропа не превысило 1,5 % мол. и 0,7°С соответственно (табл. 1). Из таблицы 1 также видно что, азеотропы Метанол – Этилацетат и Метанол – Толуол имеют близкие температуры кипения, и, по всей видимости, образуют тройной азеотроп (79,1% М – 14,7% ЭА – 6,2% Т) с минимальной температурой кипения, наличие которого еще больше усложняет задачу разделения.

Таблица 1. Литературные [3] и расчетные азеотропные характеристики для расчетных бинарных систем

Бинарная система	Тип азеотр.	$x_1^{эксп}$, % мол.	$x_1^{расч}$, % мол.	$T^{эксп}$, °С	$T^{расч}$, °С
Метанол – Этилацетат	Гом.	71,0	71,0	62,3	62,3
Метанол – Толуол	Гом.	86,0-88,2	89,0	63,5	63,8
Этанол – Этилацетат	Гом.	44,5-46,0	46,7	71,8	71,2
Этанол – Толуол	Гом.	81,0-81,8	81,0	76,8	76,8
с разделяющим агентом					
н-Гексан – Этилацетат	Гом.	65,6	65,4	65,0	64,8
Метанол – н-Гексан	Гет.	49,1	50,8	49,9	49,2
Этанол – н-Гексан	Гом.	33,4-34,1	33,4	58,5	58,5

В литературе приводится способ получения этилацетата с высокой степенью чистоты из фракции производства н-бутилового спирта или масляного альдегида [4], который предполагает применение метода азеотропной ректификации исходной смеси с метанолом для отделения этилацетата от примесей и азеотропной ректификации полученного гомогенного азеотропа с углеводородами для выделения этилацетата из смеси с метанолом. В качестве разделяющего агента на второй стадии предлагается использовать предпочтительно парафиновые углеводороды C_6 – C_8, с которыми метанол образует расслаивающиеся азеотропы кипящие в интервале 60-110°С.

Однако указанный способ не подходит для заданной смеси, так как образуется тройной азеотроп с толуолом, но отдельные его элементы могут быть использованы. Так, если подобрать разделяющий агент соответствующим образом, из исходной смеси методом азеотропной ректификацией можно выделить Метанол и Этанол с разделяющим агентом в виде дистиллята, а кубовый остаток (Этилацетат – Толуол) разделить методом классической ректификации. Моделируя процесс разделения смеси в присутствии различных углеводородов C_6 – C_8, в качестве разделяющего агента был выбран н-Гексан, который образует с Метанолом гетероазеатроп и имеет минимальную температуру кипения. Азеотропные характеристики бинарных смесей с н-Гексаном также приводятся в табл. 1.

Таким образом весь процесс регенерации растворителя предполагается осуществлять периодически на одной ректификационной колонне в три стадии.

Первая стадия. Исходную смесь и н-Гексан загружают в куб периодической колонны, количество н-Гексана выбирается исходя из свойств азеотропной смеси Метанол – н-Гексан, т.е. на 100 кг сырья указанного выше состава нужно добавить 46,8 кг н-Гексана. При температуре 49-53°С отбирают фракцию азеотропа Метанол – н-Гексан, которая в дальнейшем направляется в отстойник на разделение. Метанольный слой отбирается в качестве готового продукта, а углеводородный слой используют в следующем цикле. К сожалению, наличие азеотропа н-Гексан – Этилацетат приводит к уносу некоторого количества Этилацетата (см. рис. 1), однако бóльшая его часть возвращается на регенерацию вместе с н-Гексаном.

Вторая стадия. Отгонка фракции товарного Этилацетата при температурах 65-77°С. Для увеличения качества товарных фракций при переходе от одной стадии к другой необходимо выдерживать колонну в режиме «бесконечной флегмы», а промежуточные фракции направлять на регенерацию в следующий цикл.

Третья стадия. Получение фракции товарного толуола при температурах 77-111°С.

Материальный баланс процесса регенерации растворителя (без учета переходных фракций) представлен в табл. 2; график изменения концентрации компонентов в дистилляте – на рис. 1; расчетная математическая модель – на рис. 2.

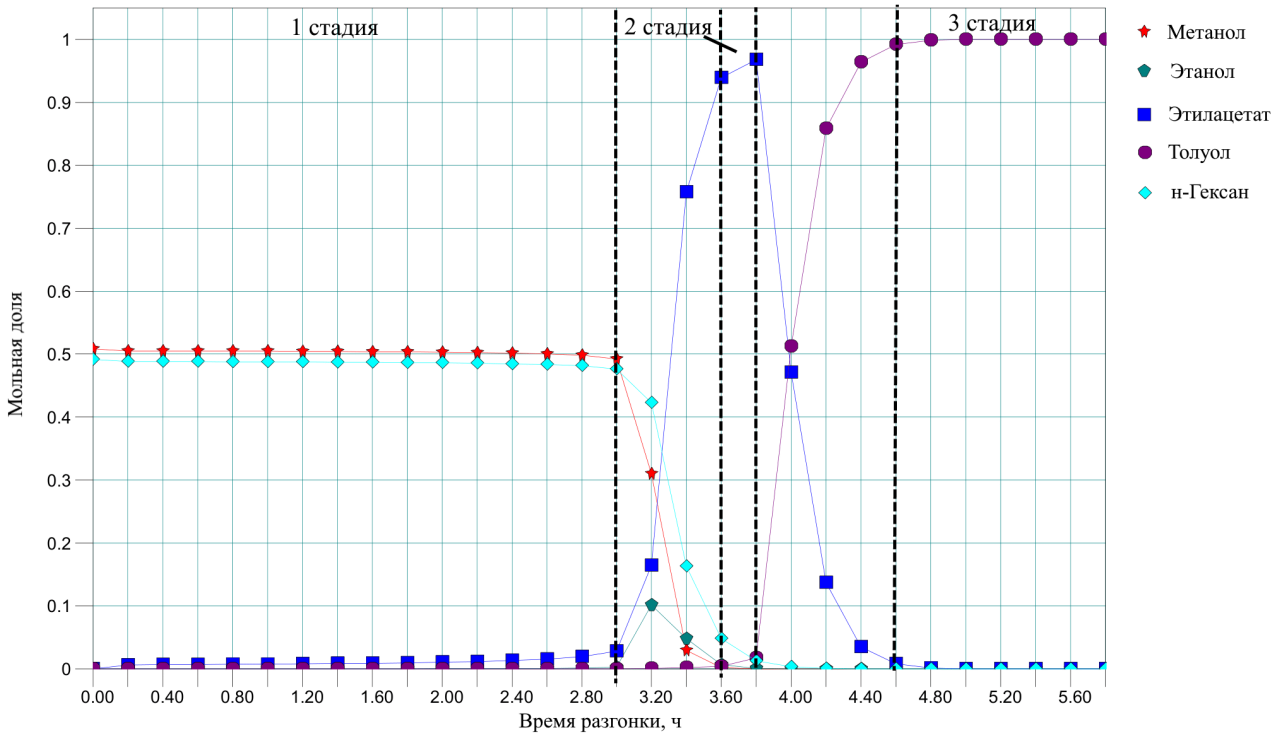


Рис. 1. Изменение состава дистиллята в процессе ректификации

Таблица 2. Материальный баланс процесса регенерации растворителя в расчете на 100 кг сырья

Содержание, кг / % масс. от потенциала	Стадия 1	Стадия 2	Стадия 3
Метанол	17,1 / 98,8	-	-
Этанол	0,04 / 8,0	-	-
Этилацетат	1,11 / 5,0	17,1 / 77,8	-
Толуол	0,8 / 1,3	0,2 / 0,3	50,5 / 84,2
Выход, кг	62,7	17,3	50,5

Для подтверждения результатов моделирования на лабораторной установке вакуумной ректификации смесей термически нестабильных органических жидкостей был поставлен эксперимент по методике, описанной выше. В ходе эксперимента выделены: расслаивающаяся фракция Метанол – н-Гексан, фракции Этилацетата и Толуола, которые были проанализированы на хроматографе. В результате было установлено хорошее согласование эксперимента с данными математического моделирования; расчетный и экспериментальный температурный режим колонны в ходе эксперимента представлены на рис. 3.

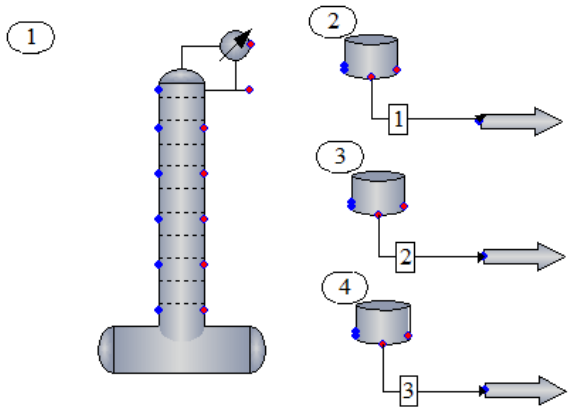


Рис. 2. Модель схемы ректификации

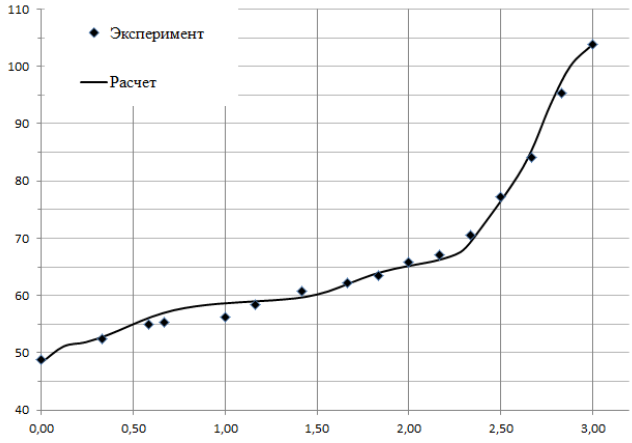


Рис. 3. Температурный режим колонны

Литература:

1. Чащин А.М., Глухарева М.И. Производство ацетатных растворителей в лесохимической промышленности. М.: Лесная промышленность, 1984. – 360 с.

2. Фролкова А.К. Разделение азеотропных смесей. М.: Владос, 2010. – 187 с.

3. Огородников С.К., Лестева Т.М., Коган В.Б. Азеотропные смеси. Справочник. Л.: Химия, 1971. – 848 с.

4. А.с. 371201 СССР. Способ выделения этилацетата / Кива В.Н., Надуткина С.И.; заявлено 02.12.70; опубл. 22.02.73, Бюл. 12. – С. 3.

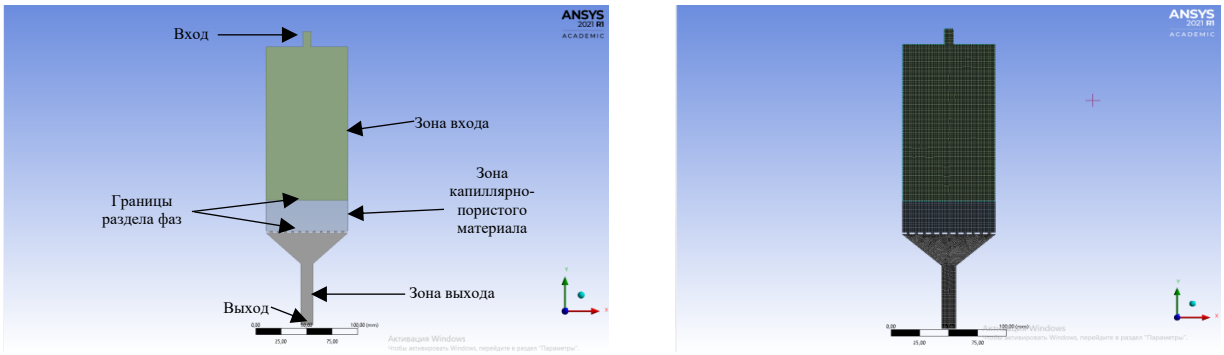
УДК 66.08; 66.011; 661.728.7

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВАКУУМ-ИМПУЛЬСНОМ НИТРОВАНИИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Алимов А.Р., Мадякин В.Ф., Петров В.А., Лившиц А.Б.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

Вакуум-импульсное нитрование целлюлозы рассматривали как нестационарный гетерогенный, многофазный процесс, численное моделирование которого проводилось при помощи программного обеспечения вычислительной гидродинамики *ANSYS Workbench 2021 R1,* пакет *Fluid flow (Fluent)* [1,2].

Первоначально были построены геометрическая и сеточная модели расчетной области, которые представлены на рисунке 1. Геометрическая модель представляет собой двумерное продольное сечение внутреннего объема реактора, в котором протекает вакуум-импульсное нитрование целлюлозы.



а) б)

Рисунок 1 –а) геометрическая модель; б) сеточная модель

При помощи разбития твердотельной геометрической модели на контрольные элементы, так называемые ячейки, построили сеточную модель расчетной области, характеристики которой представлены ниже:

- максимальный размер контрольного элемента (ячейки) – 1 мм^2;
- количество контрольных элементов – 16666;
- количество поверхностей – 34013;
- количество разделений – 3;
- количество зон – 3;
- количество граней – 17;
- максимальное ортогональное качество – 0,733618;
- максимальное соотношение сторон – 3,49041.

Гидродинамическое моделирование диффузионных процессов при вакуум-импульсном нитровании основано на численном решении следующих уравнений.

Уравнение неразрывности, которое является формой закона сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{T}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

где, p – статическое давление; $\bar{\bar{T}}$ – тензор напряжений; ρ – плотность; $\vec{g}$ – ускорение сводного падения; $\vec{F}$ – внешняя приложенная сила.

Для учета многофазности процесса применяли Эйлерову модель *Volume of fluid* (метод объема жидкости). При этом рассматривали взаимодействие двух фаз: основная фаза – воздух, и второстепенная фаза – реакционная кислотная смесь (РКС) следующего состава: HNO_3 – 25,0 %; H_2SO_4 – 60,0 %; H_2O – 15,0 %. Характеристики фаз, таки как, плотность, вязкость, а также поверхностное натяжение были приняты или определены по литературе [3].

Отслеживание границы раздела фаз между компонентами осуществляли путем решения уравнения неразрывности для объемной доли двух фаз. Для q-той фазы это уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\rho}{\partial t}\alpha_q \rho_q + \nabla \cdot \left(\alpha_q \rho_q \overrightarrow{v_q}\right) = S_{\alpha q} + \sum_{p-1}^{n} (\dot{m_{pq}} - \dot{m_{qp}})\right] \quad (3)$$

где, $\dot{m_{qp}}$ - массоперенос из фазы q в фазу p; $\dot{m_{pq}}$ - массоперенос из фазы p в фазу q; $S_{\alpha q} = 0$ - исходный член, задаваемый при необходимости пользователем.

Для описания турбулентности процесса использовали модель разработанную Ментером *k-omega SST*, учитывающую перенос напряжений сдвига.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

А также

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (5)$$

где, G_k – представляет генерацию кинетической энергии турбулентности из-за градиентов средней скорости; G_ω – представляют генерацию уравнения турбулентности ω; Γ_k и Γ_ω – представляют эффективную диффузионную способность k и ω, соответственно; Y_k и Y_ω – представляют рассеивание k и ω из-за турбулентности; D_ω – член обратной диффузии; S_k и S_ω – определяемые пользователем исходные функции.

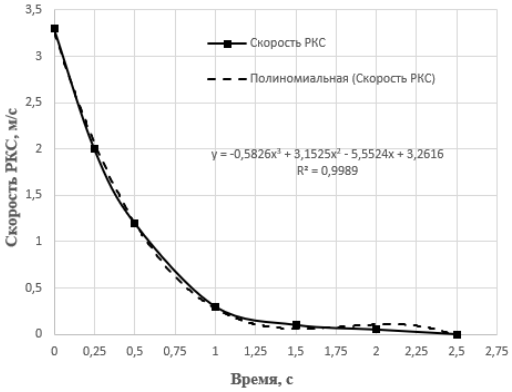
В качестве рабочих условия процесса приняли следующие значения:

- рабочие давление (вакуум) P_0=5066 Па;
- координаты точки давления, x=0 м, y =0,2 м;

- гравитационного ускорения g = -9,81 кг/см^2;

- рабочая плотность - плотность воздуха $\rho_в$=1,225 кг/м^3.

В качестве граничных условий задавали следующие параметры. Для входа потока задавали скорость подачи кислотной смеси в реакционную зону. Импульсный характер подачи кислотной смеси приводит к изменению скорости в зависимости от времени. Функция скорости была определена экспериментально (рисунок 2) и в качестве пользовательской функции *UDF (User define function)* была написана на языке программирования «С» и компилирована в решатель *Fluent* [4]. Также для каждой фазы на входе расчетной области задавали объемные доли компонентов, которые составляли для РКС $C_{ркс0}$ =1, а для воздуха $C_{воз0}$ = 0.




```
#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(inlet_y_velocity, ft, var)
{
 real flow_time;
 face_t f;

 flow_time = CURRENT_TIME;

 begin_f_loop(f,ft)
 {
  F_PROFILE(f,ft,var) = (-0.5826)*flow_time*flow_time*flow_time
  + 3.1525*flow_time*flow_time - 5.5524*flow_time + 3.2616;
 }
 end_f_loop(f,ft)
}
```

а) б)

Рисунок 2 – а) функция скорости РКС; б) код на языке программирования «С»

Выход из аппарата приняли, как непроницаемую стенку, для самих стенок задали условия прилипания и непроницания, а для границ раздела фаз указали их координаты в расчетной области.

Область капиллярно-пористого материала (целлюлозы) рассматривали как изотропное и недеформируемое тело пористостью П=0,92 и высотой h=30 мм, которое описывали следующим уравнением:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) \quad (6)$$

где, S_i - член учитывающие вязкостные потери (согласно закону Дарси, первый член в правой части уравнения) и составляющей учитывающей инерционные потери (второй член в правой части уравнения); $|v|$– величина скорости движение среды в пористом слое; μ – динамическая вязкость; ρ – плотность; $1/\alpha$ и C_2 – коэффициенты вязкостного и инерционного сопротивления, экспериментальное определение которых представлено в работе [5].

Численные вычисления осуществляли при помощи метода расчета – *Coupled*, который решает связанную систему уравнений, включающую уравнение неразрывности и уравнение сохранения импульса, используя решатель на основе давления. В результате гидродинамического моделирования при помощи

постпроцессинга пакета *Ansys fluent* получили контуры (поля) исследуемых параметров (объемных концентрации фаз, избыточного давления, скорости течения фаз и др.), значения которых определены в каждой точке расчетной области в зависимости от времени.

Математическая модель позволяет описать диффузию различных составов реакционных кислотных смесей (и следовательно, различной вязкости и плотности), в различные по свойствам (пористость, коэффициенты сопротивления, высота слоя) и природе (древесная, хлопковая и др.) целлюлозы при различных рабочих и граничных условия (давлении в аппарате, скорость подачи РКС в реакционную зону и т.д.) и в различных геометрических условиях нитрационных аппаратов, что позволяет определять оптимальные условия проведения технологического процесса.

Литература:

1. Л.Л. Миньков, К.М. Моисеева. Численное решение задач гидродинамики с помощью вычислительного пакета Ansys Fluent. Изд-во STT, Томск, 2017. 122 с.

2. ANSYS, Inc. ANSYS Fluent tutorial guide 18.0. ANSYS, Inc. 2017. 1052 p.

3. Н.Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва, 2012. 712 с.

4. ANSYS, Inc. ANSYS Fluent UDF Manual. ANSYS, Inc. 2013. 592 p.

5. А.Р. Алимов, В.Ф. Мадякин, В.А. Петров, А.Б. Лившиц, Вестник технол. ун-та, 25, 1, 65-68 (2022).

УДК 66.081.6-278

МОЛЕКУЛЯРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССОПЕРЕНОСА ИДЕАЛЬНОЙ ЛЕННАРД-ДЖОНСОВСКОЙ СМЕСИ В МЕМБРАНАХ

Анашкина А.В., Анашкин И.П., Клинов А.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: anashkin.ivan@kstu.ru

Мембранные процессы разделения зачастую применяются в комбинации с наиболее распространенным процессом ректификации. В данной работе рассмотрено молекулярное моделирование процесса масоопереноса через мембрану на примере модельной системы. Система состояла из двух компонентов взаимодействие между которыми было идентичным. Компоненты имели одинаковую массу $m_1 = m_2$, размер $\sigma_1 = \sigma_2$ и взаимодействие $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$. Отличие в двух компонентах заключалось в различном взаимодействии с атомами мембраны. Математическое описание транспорта через мембрану существенно проще в случае, если один из компонентов не проходит через мембрану. В связи с этим параметр σ взаимодействия с атомами мембраны был в 3 раза больше, чем взаимодействие между атомами. Толщина моделируемой мембраны составляла 20 атомных слоев.

В связи с тем, что использовался потенциал Леннарда-Джонса удобно величины представлять в безразмерном виде: температура $T^* = \frac{k_B T}{\varepsilon}$, числовая плотность $n^* = n\sigma^3$, поток компонента $j^* = j\sigma^3\sqrt{\frac{m}{\varepsilon}}$. Для моделирования использовался метод DCV GCMD [1] в котором мембрана делит моделируемую ячейку на две части, в каждой из которых выделяется контрольный объем в котором поддерживается заданное значение плотности. В данной работе была исследована смесь с различной концентрацией и плотностью $n^* = 0.74$ в жидкой фазе, в газовой фазе из контрольного объема удалялись все молекулы.

В результате расчетов были получены значения потоков компонента проходящего через мембрану и распределения плотности компонентов. Значения потоков показаны на рисунке 1.

Красная линия – плотность компонента, проходящего через мембрану, синяя линия плотность компонента не проходящего через мембрану, черная линия – суммарная плотность.

На рисунке 2 представлено распределение плотности компонентов вдоль моделируемой системы для случая, когда мольная доля компонента, проходящего через мембрану равна 0.6. Видно, что в в области приграничной к мембране существенно возрастает плотность компонента, не проходящего через мембрану.

Это сказывается на адсорбции компонента на поверхности, и снижает поток компонента, проходящего через мембрану. Это также подтверждается зависимостью потока от концентрации компонента (рисунок 1).

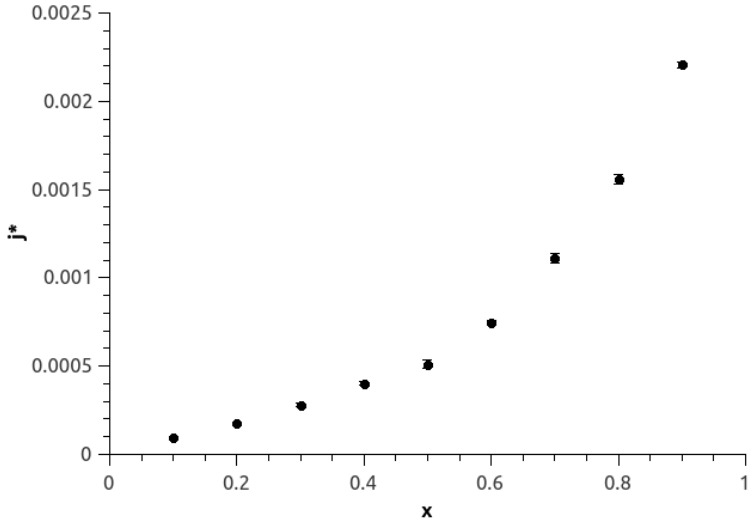


Рис. 1 Зависимость потока компонента от его мольной доли в жидкой фазе

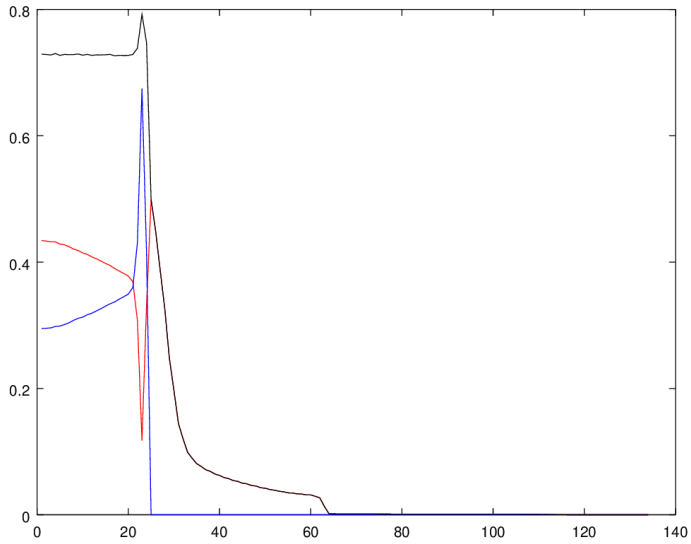


Рис. 2 Распределение плотности компонентов вдоль моделируемой ячейки

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00136).

Литература:

1. Heffelfinger G.S., Swol F. van Diffusion in Lennard-Jones fluids using dual control volume grand canonical molecular dynamics simulation (DCV-GCMD) // J. Chem. Phys. 1994. V. 100. № 10. P. 7548.

УДК 532.72

СВЯЗИ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ НЕИДЕАЛЬНОЙ ЛЕННАРД-ДЖОНСОВСКОЙ СМЕСИ С ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНТРОПИЕЙ

Анашкина А.В., Анашкин И.П., Дьяконов С.Г.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: anashkin.ivan@kstu.ru

Введение

Физико-химические свойства веществ составляют значительную часть исходной информации, необходимой для моделирования и проектирования процессов химической промышленности. Однако экспериментальные данные ограничены и не всегда доступны. Для многокомпонентных смесей ситуация заметно усложняется. Во-первых увеличение количества компонентов как дополнительных степеней свобод экспериментальных исследований существенно увеличивают трудоемкость. Даже для чистых веществ транспортные свойства исследованы подробно в широкой области состояний только для наиболее часто используемых веществ, например воде. Во-вторых перекрестные эффекты в межмолекулярном взаимодействии в неидеальных смесях могу существенно изменить свойства смеси. Поэтому для практического применения в инженерных расчетах важно использование различных полуэмпирических выражений, связывающих свойства чистых веществ и их смесей.

Одним из таких подходов является связь транспортных свойств веществ с избыточной энтропии. В данной работе изучены свойства неидеальных Леннард-Джонсовских смесей методом молекулярной динамики. Исследовалось несколько вариантов неидеальности, с различными примерами перекрестных параметров. Для исследуемых систем были вычислены термодинамические и транспортные свойства при различной платности и составе и показана связь коэффициентов диффузии компонентов с избыточной энтропией.

Моделирование

Рассматриваемые системы описывались потенциалом Леннарда –Джонса. Термодинамические величины удобно было записывать в безразмерном виде: температура $T^* = \frac{k_B T}{\varepsilon}$, числовая плотность $n^* = n\sigma^3$, химический потенциал $\mu^* = \frac{\mu}{\varepsilon}$, коэффициент диффузии $D^* = \frac{D}{\sigma}\sqrt{\frac{m}{\varepsilon}}$. Компоненты имели одинаковую массу $m_1 = m_2$, размер $\sigma_1 = \sigma_2$ и взаимодействие $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$. Параметры перекрестного взаимодействия задавались вручную. Всего рассмотрено 4 варианта: положительное и отрицательное влияние на оба параметра межмолекулярного взаимодействия. Значения перекрестных параметров представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры перекрестного взаимодействия

Номер варианта	$\varepsilon_{12}/\varepsilon_{11}$	σ_{12}/σ_{11}
1	1.2	1
2	0.8	1
3	1	0.933
4	1	1.066

Для всех 4 рассмотренных вариантов вычисления проводились при температуре $T^* = 1$. Таблица с зависимостями коэффициентов диффузии, энергии, давления, химического потенциала от плотности и состава представлены в дополнительных материалах. Для дальнейшей обработки и получения выражения для энтропии химический потенциал для вариантов 1 и 2 описывался линейной зависимостью:

$$\mu(n, x_A) = \mu_0(n) + a(1 - x_A)$$

для вариантов 3 и 4 полиномом 3 степени:

$$\mu(n, x_A) = \mu_0(n) + a(1 - x_A) + b(1 - x_A)^2 + c(1 - x_A)^3$$

где μ_0 — химический потенциал чистого компонента, данное значение было определено по уравнению состояния [1], z, b и c — параметры.

Энтропия системы определялась из выражения:

$$dU = TdS - pdV + \sum_i \mu_i \, dN_i$$

Подставляя в него выражения для химических потенциалов и проинтегрировав полученное выражение можно получить зависимость энтропии от состава. Для химического потенциала выражение для вариантов 1 и 2 выглядит :

$$s(x, n) = s_0(n) + \frac{u}{T} + \frac{a}{T}(x_A^2 - x_A)$$

для 3 и 4:

$$s(x, n) = s_0(n) + \frac{u}{T} + \frac{a + b}{T}(x_A^2 - x_A) + \frac{c}{T}\left(\frac{x^4}{2} - x^3 + \frac{3x^2}{2} - x\right)$$

где s_0 — удельная энтропия чистого вещества.

В данной работе для описания зависимость коэффициента диффузии от энтропии применялось выражение:

$$D(x, n) = D_0(n) exp(A\Delta s)$$

где D_0 — коэффициент диффузии чистого компонента, $\Delta s = s - s_{id}$ — удельная избыточная энтропия, $s_{id} = s_1 x_1 + s_2 x_2$ — удельная идеальная энтропия, в

рассмотренном случае она равняется энтропии чистого компонента $s_{id} = s_0(n)$, параметр $A = 0.7$. На рисунке 1 представлено сравнение результатов моделирования со значениями, полученными по выражениям представленным выше.

В работе [2] аналогичное выражение использовалось для описания транспортных коэффициентов полярных молекул, однако вся фазовая диаграмма делилась на несколько областей. Для рассмотренных веществ в области жидкой фазы значение параметра а близко к используемому в данной работе. Это может свидетельствовать о универсальности этого параметра для данной области как для чистых веществ так и для смесей.

Исследование выполнено при финансовой под держке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00315-20-01 «Энергосберегающие процессы разделения жидких смесей для регенерации промышленных растворителей».

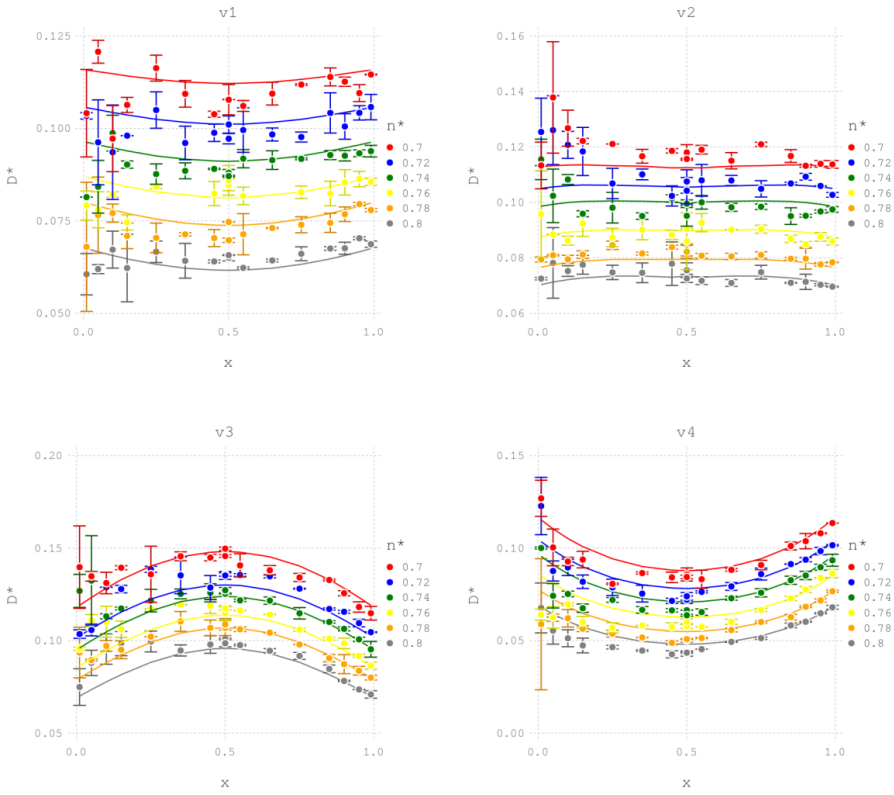


Рис. 1 Зависимость коэффициентов диффузии от концентрации при различной плотности, линии — результаты по предлагаемому выражению

Литература:

1. Johnson J. Karl, Zollweg John A., Gubbins Keith E. The Lennard-Jones equation of state revisited // Molecular Physics. 1993. feb. T. 78, No 3. C. 591–618.

2. Anashkin I., Dyakonov S., Dyakonov G. Relationship between the Transport Coefficients of Polar Substances and Entropy // Entropy. 2019. T. 22, No 1. C. 13.

УДК 621.86.016

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ

Апакова В. И., Хусаинов Р. Н.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: vika.apakova@inbox.ru

При разработке технологического оборудования возникает необходимость в знании физико-механических характеристик перерабатываемых материалов. В качестве исследуемого материала нами была рассмотрена оксиэтилцеллюлоза (ОЭЦ) и её основные физико-механические характеристики: коэффициенты внутреннего и внешнего трения, диаметр сводообразующего отверстия, угол естественного откоса. Эти параметры оказывают существенное влияние на выбор конструкций и точность расчета транспортирующих и приводных устройств основного и вспомогательного технологического оборудования [1].

Определение коэффициента внутреннего трения f оксиэтилцеллюлозы (ОЭЦ) проводилось на приборе с использованием известной методики /2/. По полученным значениям σ и τ строился график предельных касательных напряжений в данном интервале σ. Тангенс угла наклона этой прямой соответствовал коэффициенту внутреннего трения дисперсного материала при заданной влажности.

Коэффициент трения $f_{сталь}$ исследуемого материалов о поверхность листа из нержавеюшей стали (Х18Н10Т) определялся на том же приборе и по той же методике, что и для определения коэффициента внутреннего трения [2]. С той лишь разницей, что на направляющие укладывалась полоса из стали. Выбор для исследования нержавеющей стали обусловлен преимущественным ее использованием для изготовления основного и вспомогательного технологического оборудования. Результаты исследований по определению коэффициентов трения оксиэтилцеллюлозы о нержавеющую сталь в зависимости от влажности приведены на рис.1.

Диаметр сводообразующего отверстия дисперсного материала определялся на приборе [2]. Значение диаметра изменялось в интервале 10 -76 мм с шагом 2 мм. Наибольшее значение диаметра сводообразующего отверстия для оксиэтилцеллюлозы приведено в таблице 1.

В опытах использовалась оксиэтилцеллюлоза с влажностью $U_0 = 1{,}18$ кг/кг.

Как видно из таблицы 1, увлажнение материала существенно увеличивает диаметр сводообразования. Это увеличение составляет порядка 52% по отношению к диаметру сводообразующего отверстия сухого материала.

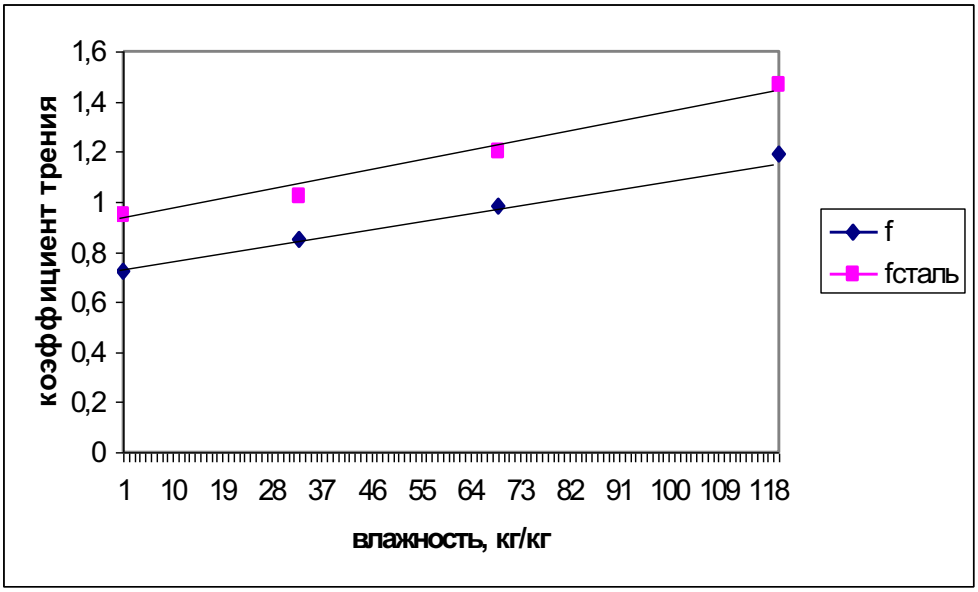


Рис. 1 - Зависимость коэффициентов внутреннего f и внешнего $f_{сталь}$ трения оксиэтилцеллюлозы от влажности

Это свидетельствует о том, что содержащаяся в продукте жидкость значительно увеличивает сцепление частиц материала между собой.

Для определения угла естественного откоса была применена установка, состоящая из полого цилиндра диаметром 38мм, высотой 165мм и привода [2]. Как следует из результатов эксперимента (таблица 1), увлажнение материала способствует увеличению угла естественного откоса исследуемого материала. Увеличение угла естественного откоса с повышением содержания жидкости в материале вызвано теми же причинами, что и для предельного диаметра сводообразушего отверстия.

Таблица 1 – Предельный диаметр сводообразующего отверстия D и угол естественного откоса φ оксиэтилцеллюлозы

D, мм		**φ,** град	
сухой	**При U=U₀**	сухой	**При U=U₀**
46	70	35	45

По результатам эксперимента была разработана и зарегистрирована программа ЭВМ для расчета коэффициентов внутреннего трения исследуемого материала от влажности в заданном диапазоне [3].

Результаты работы по определению физико-механических характеристик оксиэтилцеллюлозы наряду с расчетами технологического оборудования могут найти применение в расчетах тепломассообменных процессов.

Литература:

1. Сажин, Б.С. Выбор и расчет сушильных установок на основе комплексного анализа влажных материалов как объектов сушки/ Б.С.Сажин, И.Е.Шадрина. – М.: МТИ, 1979. – 93с.

2. Зенков, Р.Л. Механика насыпных грузов/ Р.Л.Зенков. - М.: Машиностроение, 1964. – 252с.

3. Хусаинов Р. Н., Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Расчет коэффициента внутреннего трения сыпучего материала», № 2021616169 от 19 04.2021 г..

УДК 621.521

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОСНОВНЫХ ОТКАЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАСОСОВ ТИПА РУТС

Ахметова К.И., Исаев А.А., Бурмистров А.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: minaltyn2000@mail.ru

Вакуум, как технологическая среда, абсолютно незаменим в большинстве высокотехнологических направлений таких, как оборонный комплекс, космонавтика, микроэлектроника, фармацевтика и медицина [1, 2]. Многие популярные нанотехнологические процессы протекают в условиях вакуума. Однако, обеспечить высокое качество такой продукции, чистоту эксперимента и получить хороший результат возможно лишь в условиях безмасляной среды.

Насос вакуумный двухроторный (НВД) является одним из немногих безмасляных машин, работающих при остаточном давлении около 0,1 Па. НВД типа Рутс, использует принцип вытеснения газа двумя роторами, имеющими форму восьмерок [3, 4]. Так как НВД работает в паре с форвакуумным насосом, то целесообразно использовать для этих целей «сухие» насосы такие, как насос вакуумный спиральный (НВСп), чтобы получить высокую производительность, низкое предельное остаточное давление и вакуум, в котором будут отсутствовать молекулы с массовыми числами больше 44 а.е.м.

В данной работе будем экспериментально исследовать характеристики агрегата, состоящего из двух последовательно соединенных вакуумных насосов-двухроторного с серийным или эвольвентным (экспериментальным) профилем роторов и спирального НВСп-35. Отметим, что характеристики спирального насоса, используемого здесь в качестве форвакуумного, получены на специальном стенде, представленном в работе [5].

Главными параметрами любого агрегата являются предельное остаточное давление и быстрота действия. Измерения проводились согласно методике ГОСТ 32974-2014 (ISO 21360-2:2012) на стенде экспериментальных исследований, вакуумная схема которого показана на рисунке 1.

Насосы НВД и НВСп соединены последовательно при помощи трубопровода и сильфонного узла. Насосы установлены на нижнем и верхнем основании рамы и закреплены при помощи болтов, гаек и шайб.

На собранном стенде также получены зависимости быстроты действия от входного давления $S_{вх} = f(P_{вх})$ насоса НВД с эвольвентными роторами на частотах вращения роторов от 750 до 6000 об/мин. Частота вращения роторов, устанавливалась преобразователем частоты FCP 106 Danfos и измерялась

фототахометром АТТ-6002. Полученные зависимости быстроты действия от входного давления представлены на рис.3.

Полученные экспериментальные зависимости показывают, что при частоте вращения 3000 об/мин агрегат с НВСп-35 обеспечивает быстроту действия 55 л/с, а при 6000 об/мин быстрота действия увеличивается до 92 л/с. Следует отметить, что при увеличении частоты вращения предельное остаточное давление агрегата растет.



Рис.1 Стенд для исследования НВД-200 с экспериментальным профилем роторов в агрегате с НВСп

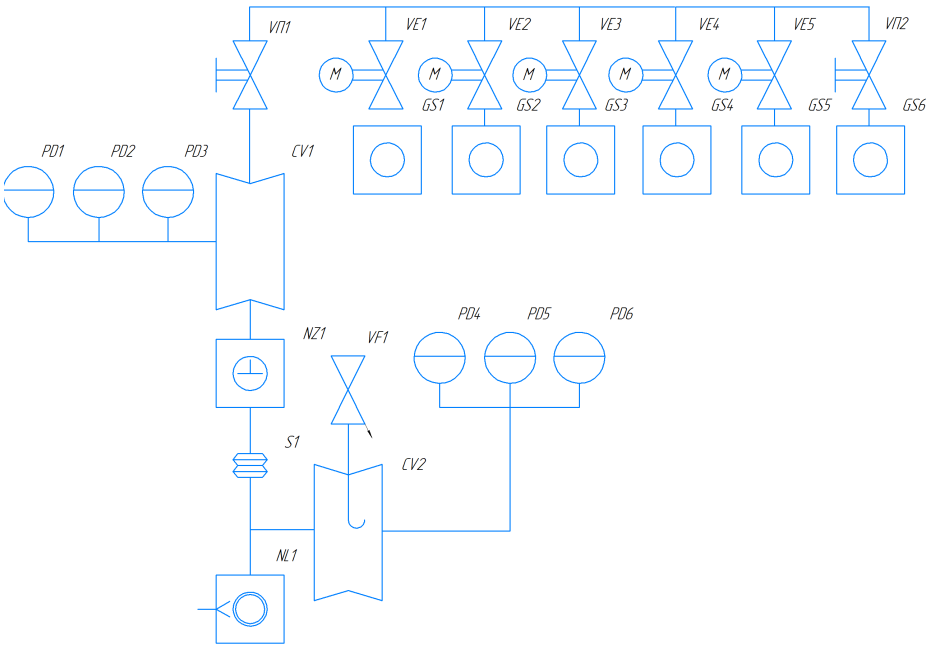


Рис.2 Вакуумная схема экспериментального стенда для исследования НВД: NL-насос вакуумный спиральный НВСп-35; NZ1- насос вакуумный двухроторный типа Рутс НВД-200; CV1,CV2- вакуумные камеры; VF1- натекатель; VП1,VП2- клапан ручной; VE1-VE5- клапан с электромагнитным приводом; S1-сильфон; GS1-GS5- регулятор расхода газа; GS6- счетчик газа; PD1-PD6- вакуумметр мембранно-емкостной

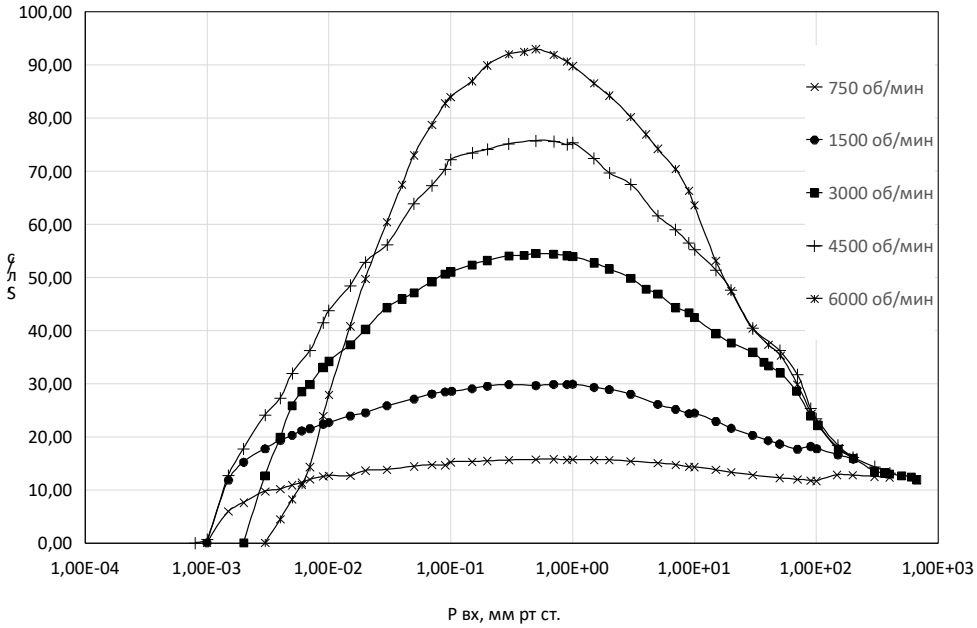


Рис.3. График зависимости быстроты действия НВД с эвольвентными роторами от давления на входе при различных частотах вращения

Проведенные эксперименты позволяют нам рекомендовать «сухие» агрегаты на базе НВСп-35 и НВД-200 с опытными профилями роторов в

высокотехнологических отраслях производства, где требуется получение чистого (безмасляного) вакуума.

Литература:

1. Бесконтактные вакуумные насосы: учебное пособие / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев; Федер. Агенство по образованию. Казан. гос. технол ун-т. – Казань: КГТУ, 2010. – 104 с.

2. Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с., ил.

3. Бурмистров А.В. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: дис…докт.техн.наук / А. В. Бурмистров; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2006. - 363с.

4. Хабланян М.Х Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.1. Инженерно-физические основы: учеб. пособие / М.Х. Хабланян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. - 237 с.

5. Бурмистров А.В. Стенд исследовательских испытаний безмасляных спиральных вакуумных насосов / А.В. Бурмистров, А.А. Райков, С.И. Саликеев, А.В. Гаврилов, В.П. Матвеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2013 , Т.16. - № 14 С. 174-177.

УДК 66.045.129.2

К РАСЧЕТУ ФОРМИРОВАНИЯ ОСАДКА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ НА ОРЕБРЕННЫХ ТРУБАХ ТЕПЛООБМЕННИКА

Бадретдинова Г.Р., Харьков В.В., Якимов Н.Д.
Казанский государственный энергетический университет,
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: v.v.kharkov@gmail.com

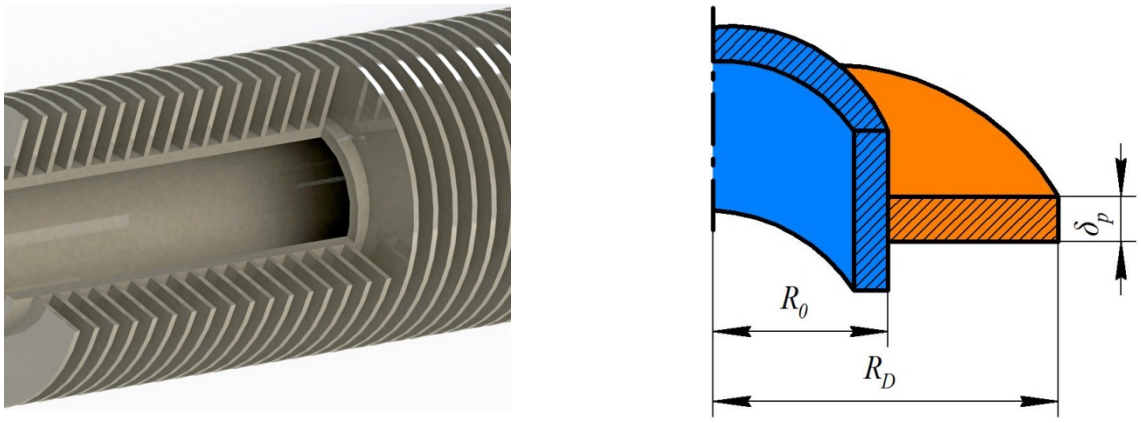
Теплообменники получили широкое применение во многих областях промышленности благодаря таким процессам, как охлаждение, испарение, абсорбция, кристаллизация и др. Несмотря на все многообразие видов теплообменного оборудования на их экономическую эффективность негативно влияет снижение коэффициента теплопередачи и скорости процесса теплообмена [1, 2]. Эксплуатация теплообменника в сложных условиях со временем может привести к его загрязнению, что является основной причиной снижения энергоэффективности производства [3].

Несмотря на существующие традиционные и современные способы минимизации отложений на поверхности теплообмена, полностью избежать загрязнения теплообменников невозможно, а отложения способствуют уменьшению скорости теплопередачи и увеличению гидравлического сопротивления, что в конечном итоге приводит к увеличению капитальных затрат и затрат на техническое обслуживание оборудования, а также к крупным производственным и энергетическим потерям во многих отраслях промышленности. Поэтому является актуальной задачей исследование механизма образования отложений на теплопередающей поверхности.

На сегодняшний день исследователи предлагают использование усовершенствованных теплообменников, которые увеличивают общую теплопередачу более чем на 100%. Например, для интенсификации процесса теплопередачи используются различные способы: изменение термического сопротивления и скорости потока, применение развитых поверхностей теплообмена и искусственных турбулизаторов, использование акустических и электромагнитных полей, и др. Эти способы интенсификации теплообмена изучены в неодинаковой степени, и лишь часть из них доведена до уровня промышленного применения [4]. Весьма эффективным средством является внешнее оребрение рабочей поверхности теплообмена, но исследований по отложениям на таким поверхностях крайне мало.

Целью данной статьи является постановка задачи для расчета процесса формирования осадка на наружной поверхности оребренных круглых труб теплообменника при конденсации.

Тонкое круглое (дискообразное) ребро диаметром $2R_D$ расположено на охлаждаемой трубе диаметром $2R_0$ (рис. 1) так, что температура в его основании (на трубе) $t_0 = \text{const}$. На обеих сторонах ребра происходит конденсация пара при температуре $t_s = \text{const}$, причём на его поверхности оседают загрязнения. Процесс осесимметричный относительно оси трубы так, что характеристики не зависят от поворота и симметричный относительно средней плоскости ребра.



а б

Рис. 1. Схема трубы с наружным поперечным оребрением: а – 2D-модель; б – расчетная схема; R_0 – радиус цилиндрической трубы, R_D – радиус круглого ребра, b – толщина ребра

Введем основные упрощающие предположения:

1) Ребро считать тонким, так что термическим сопротивлением по толщине можно пренебречь, а распределение температуры в самом ребре брать одномерным в виде $t = t(r, \tau)$.

2) Осадок образует однородный слой, который считается тонким, так что его продольной термической проводимостью в направлении, параллельном поверхности ребра можно пренебречь.

3) Температура осадка на внешней границе равна t_s, а в месте примыкания к ребру равна температуре ребра $t = t(r, \tau)$.

4) Теплоёмкостью материала ребра и осадка можно пренебречь.

Тогда получаем,

$$q(r,\tau) = \frac{\lambda_o}{\delta(r,\tau)}\,(t_s - t(r,\tau)), \qquad (1)$$

где $\lambda_o / \delta(r,\tau)$ – термическая проводимость осадка.

5) Толщина слоя осадка в данном месте r ребра пропорциональна общему количеству образовавшегося в этом месте конденсата.

6) Скорость образования конденсата в месте ребра с координатой r в данный момент времени τ, пропорциональна плотности теплового потока $q(r,\tau)$. Температура пара близка к температуре конденсации t_s, небольшое отличие, видимо, может быть учтено поправкой в теплоту конденсации.

7) Искомые функции $t(r,\tau)$ и $\delta(r,\tau)$ непрерывно дифференцируемы по r и по τ, причём $t(r,\tau)$ дважды непрерывно дифференцируема по r кроме момента времени $\tau = 0$

На основании уравнения Фурье и вышеизложенных допущений выведено уравнение для нахождения поля температур в ребре $\vartheta(r,\tau)$

$$\frac{\partial^2 \vartheta(r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial \vartheta(r,\tau)}{\partial r} = \frac{2\lambda_o}{\Lambda}\,\frac{\vartheta(r,\tau)}{\delta(r,\tau)}. \qquad (2)$$

Граничные условия для $\vartheta(r,\tau)$:

$$\vartheta(r,\tau)\big|_{r=R_0} = \vartheta_0,$$
$$\left.\frac{\partial \vartheta}{\partial r}\right|_{r=R_D} = 0. \qquad (3)$$

Второе условие соответствует отсутствию теплового потока на торцевой (внешней) поверхности ребра, считающегося пренебрежимо тонким.

Далее с учётом уравнения (1) найдено выражение для определения толщины слоя осадка на ребре

$$\frac{\partial \delta(r,\tau)}{\partial \tau} = k \cdot \lambda_o \cdot \frac{\vartheta(r,\tau)}{\delta(r,\tau)}. \quad (4)$$

Коэффициент k выражается через концентрацию загрязнений в конденсате, долю загрязнений, оседающих на поверхность, плотность осадка и теплоту конденсации.

В качестве начального условия для $\delta(r,\tau)$ можно взять

$$\delta(r,0) = h_0 = \text{const} > 0, \quad R_0 \le r \le R_D. \quad (5)$$

Таким образом, найдены уравнения для определения количества (распределение толщины) осадка и тепловой поток, отводимый круглым ребром к трубе.

Литература:

1. Дмитриев, А. В. Определение коэффициента массоотдачи в жидкой фазе в струйно-барботажном контактном устройстве / А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, И. Н. Мадышев // Теплоэнергетика. – 2016. – № 9. – С. 76-80.

2. Dmitriev A.V. et al. Experimental investigation of fill pack impact on thermal-hydraulic performance of evaporative cooling tower // Therm. Sci. Eng. Prog. Elsevier BV, 2021. Vol. 22. P. 100835.

3. Дмитриев, А. В. Разработка новых видов контактных устройств для интенсификации тепломассообмена и повышения энергосбережения / А. В. Дмитриев, И. Н. Мадышев // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 8. – С. 110-111.

4. Харьков, В. В. Моделирование тепло- и массообмена при концентрировании соков в вихревой камере / В. В. Харьков // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 1. – С. 37-44.

УДК 536.3

СПЕКТРАЛЬНАЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ В ОБЛАСТИ ПЛАВЛЕНИЯ РЯДА МЕТАЛЛОВ И ПОЛУМЕТАЛЛОВ

Бауэр Д.Ю., Ахметов Ш.М., Косенков Д.В., Сагадеев В.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: Dmi-kosenkov@yandex.ru

Знание спектральной излучательной способности металлов и полуметаллов необходимо для качественных расчетов высоконагруженного теплообменного оборудования. Актуальность этой научной проблематики остается весьма высокой.

Последние исследования в этой области [1-3] показывают изменение спектральной излучательной способности различных металлов с уменьшением от длины волны и согласие с полуэмпирической оценкой, основанной на модели Друде [4].

Авторы провели исследование нормальной спектральной излучательной способности свинца, олова, цинка, кадмия, висмута и сурьмы на экспериментальном стенде (см. рис.1). с измененной оснасткой внутрикамерного пространства измерительной ячейки. В отличие от ячейки, представленной в [5], применялся радиометр с встроенным сменным узкополосным фильтром.

В работе измерялось отношение нормальных спектральных степеней черноты расплава и полированного металла (полуметалла) при температуре опыта, включая точку плавления: $\varphi_{\lambda n э} = \varepsilon_{\lambda n}^{ж}/\varepsilon_{\lambda n}$ – где $\varepsilon_{\lambda n}^{ж}, \varepsilon_{\lambda n}$ это нормальная спектральная степень черноты металла (полуметалла) соответственно в жидкой и твердой фазе.

Исследования проведены при длинах волн (λ) от 0,69 до 10,6 мкм. В экспериментальных исследованиях применялся абсолютный радиационный метод.

Максимальные температуры металлов в опытах ограничивались упругостью пара изучаемого металла (полуметалла) или его температурой кипения.

Максимальная погрешность опыта была оценена от 5 до 8% в зависимости от температуры.

Полученные экспериментальные значения отношения $\varphi_{\lambda n э}$ - спектральной излучательной способности металлов в жидком состоянии к такому же в твердом состоянии вблизи температур плавления представлены в графическом виде (рис. 2).

Для исследованных металлов в области 0,69 мкм спектра $\varphi_{\lambda n э}$ близка к единице (рис. 2), т.е. металл или полуметалл излучают одинаково, влияния фазового перехода не зафиксировано. С ростом длины волны величина $\varphi_{\lambda n э}$ начинает

отклоняться от 1, достаточно резко уходя вверх для металлов и вниз для полуметаллов.

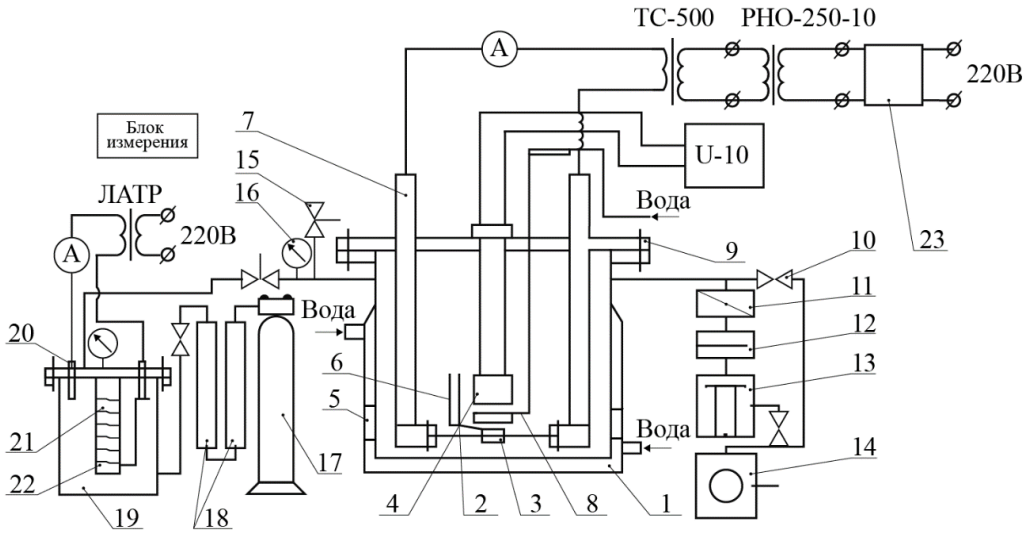


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:
1 – корпус; 2 – лента - нагреватель; 3 – исследуемый металл; 4 – радиометр с встроенным сменным узкополосным фильтром; 5 – окно; 6 – термопары; 7 – охлаждаемые токовводы; 8 – водоохлаждаемая заслонка; 9 – крышка; 10 – вентили; 11 – затвор; 12 – ловушка; 13 – насос диффузионный; 14 – насос форвакуумный; 15 – система натекателей; 16 – вакуумметр; 17 – баллон с инертным газом (аргон); 18 – механические фильтры; 19 – объем подготовки газа; 20 – водоохлаждаемые токовводы; 21 – фарфоровая труба; 22 – вольфрамовая спираль; 23 – стабилизаторы напряжения.

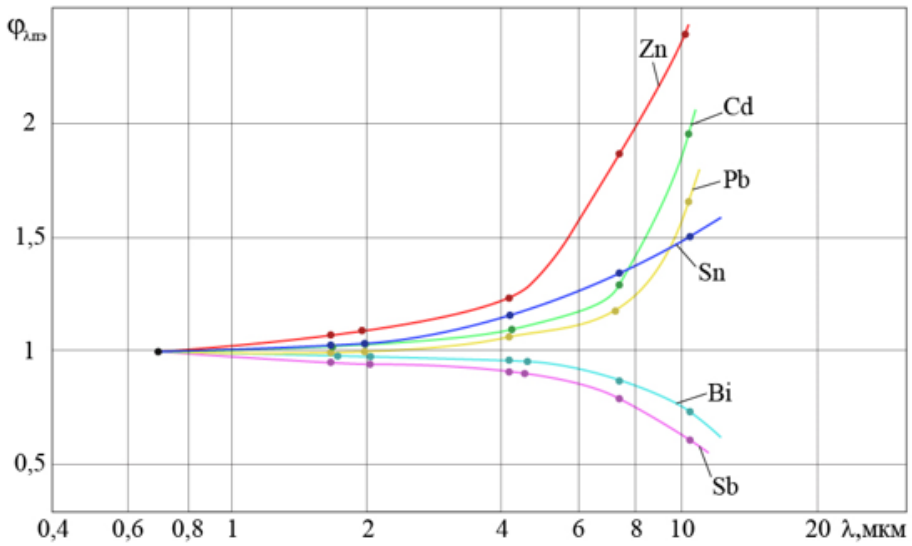


Рис. 2. Величина φ_λ для цинка, кадмия, олова, свинца, сурьмы и висмута – область плавления элементов.

Исходя из опытных величин можно описать характер поведения зависимости спектрального излучения расплавов от длины волны. Металлы и полуметаллы в жидкой фазе будут иметь качественно разную зависимость спектрального излучения от длины волны.

Литература:

1. Takehiko, I. et al. The Journal of Chemical Thermodynamics 131. (2018:) 557-562.

2. Eber, A., Pichler, P. & Pottlacher, G. Int J Thermophys 42**,** 17 (2021).

3. Takehiko, I. et al. The Journal of Chemical Thermodynamics 103 (2016): 107-114

4. R. Siegel, J.R. Howell. Thermal Radiation Heat Transfer (Taylor& Francis, N.Y., 2002).

5. Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев. ЖТФ, 91 (12), 1909 (2021).

УДК 66.08; 66.011

CFD - МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМО-ВАКУУМ-ИМПУЛЬСНОЙ СУШКИ ПОРОХА

Бахтиаров Л.И., Мадякин В.Ф., Петров В.А., Лившиц А.Б.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

В настоящее время вычислительная гидрогазодинамика (Computational Fluid Dynamics – CFD) становится всё более популярным инженерным инструментом. Это обусловлено такими её качествами, как формальная простота постановки задачи и независимость методики её решения от рабочего процесса исследуемого узла. То есть, освоив методику решения простых задач, инженер может поэтапно переходить к более сложным, реалистичным задачам, постепенно повышая квалификацию в части более сложных моделей расчёта течений [1].

CFD-моделирование процесса термо-вакуум-импульсной сушки пороха проводилось с применением программного комплекса ANSYSWorkbench 2021 R1, пакет Fluent.

ANSYS — это программный комплекс, основанный на методе конечных элементов и предназначенный для автоматизированного инженерного анализа во многих отраслях техники (строительство, машиностроение, транспорт, авиация, космонавтика), а также в таких областях как механика жидкости и газа, механика деформируемого твердого тела, теплопередача и электромагнетизм.

Процесс моделирования начинается с построением геометрической модели в программе ANSYS Design Modeler. Геометрическая модель аппарата (сушилки) представлена на рисунке 1. Следующим этапом моделирования является построение сетки. После построения геометрической (твердотельной, непрерывной) модели объекта, нужно создать его конечно-элементную (дискретную) модель. Это означает, что на занимаемую объектом область пространства наносится сетка из узлов и элементов, которая состоит из сравнительно простых форм и делит эту область на конечные элементы, которые в свою очередь соединяются между собой в некоторых точках (узлах).

Построение такого рода сетки является одним из главных этапов в конечно-элементном анализе. Полученная сетка представлена на рисунке 2 и имеется следующие характеристики: размер элемента 1 мм, площадь 5554,7 мм^2, число элементов 16666, число узлов 17190.

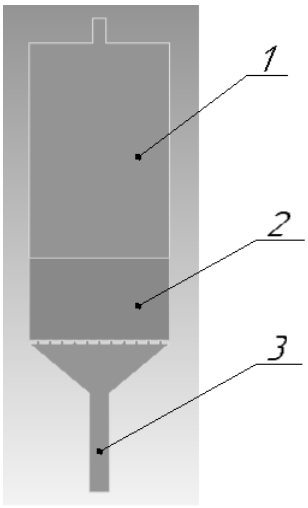


Рисунок 1 – Геометрическая модель аппарата (сушилки)
1 – зона входа; 2 – пористое тело; 3 – зона выхода.

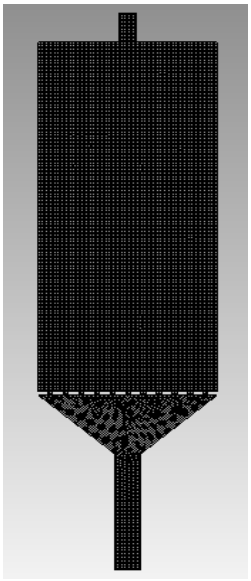


Рисунок 2 – Сеточная модель аппарата (сушилки)

Достижения в вычислительной механике жидкости послужили основой для дальнейшего понимания динамики многофазных течений. В настоящее время существует два подхода к численному расчету многофазных течений: подход Эйлера-Лагранжа и подход Эйлера-Эйлера.

В подходе Эйлера-Эйлера различные фазы рассматриваются математически как взаимопроникающие континуумы. Поскольку объем одной фазы не может быть занят другими фазами, вводится понятие фазовой объемной доли [2]. Предполагается, что эти объемные доли являются непрерывными функциями пространства и времени, а их сумма равна единице. Уравнения сохранения для каждой фазы выводятся для получения системы уравнений, которые имеют одинаковую структуру для всех фаз. Эти уравнения замыкаются путем предоставления

определяющих соотношений, полученных из эмпирической информации, или, в случае гранулированных потоков, путем применения кинетической теории [3].

Для имитации высыхания влажного пороха фаза «вода» может быть помещена в пористую зону, и скорость движения фазы «вода» в этой области установлена 0 м/с. Воздушная фаза (с включенной паровой фазой для имитации окружающего влажного воздуха) протекает через пористую зону. Модель Эйлера (Eulerian) также позволяет использовать модель испарения, при этом вода испаряется из пористой области.

Теория модели Эйлера. Уравнение неразрывности для фазы *q* описывается уравнением:

$$\frac{\partial(\gamma\alpha_q\rho_q)}{\partial t} + \nabla(\gamma\alpha_q\rho_q \overrightarrow{v_q}) = \gamma\sum_{p=1}^{n}(\dot{m_{pq}} - \dot{m_{qp}}) + \gamma S_q \quad (1)$$

где $\overrightarrow{v_q}$ скорость фазы *q, γ* является пористость пористой зоны, ρ_q плотность фазы *q*, α_q объемная доля фазы *q*, m_{pq} коэффициент массопередачи от фазы p в фазу *q, S_q* исходный член, который в нашем случае равен 0.

Баланс импульса для фазы q показан в (2)

$$\frac{\partial(\gamma\alpha_q\rho_q\overrightarrow{v_q})}{\partial t} + \nabla\ (\gamma\alpha_q\rho_q \overrightarrow{v_q}) = -\gamma\alpha_q\nabla p + \nabla(\gamma\tau_q) + \gamma\alpha_q\rho_q\vec{g} +$$
$$+ \gamma\sum_{p=1}^{n}(\overrightarrow{R_{pq}} + \dot{m_{pq}}\overrightarrow{v_{pq}} - \dot{m_{qp}}\overrightarrow{v_{qp}}) + \gamma(\overrightarrow{F_q} + \overrightarrow{F_{lftq}} + \overrightarrow{F_{vm,q}}) + \alpha_q\left(\frac{\mu}{K} + \frac{C_2\rho}{2}\left|\overrightarrow{v_q}\right|\right)\overrightarrow{v_q} \quad (2)$$

где $\overrightarrow{R_{pq}}$ - сила взаимодействия между фазами, $\overrightarrow{F_q}$ - внешняя сила, $\overrightarrow{F_{lftq}}$ - подъемная сила, $\overrightarrow{F_{vm,q}}$ – массовая сила, $\overrightarrow{v_q}$ - межфазная скорость, τ - тензор напряжения.

Коэффициенты *C_2* и *$1/\alpha$* для пористой области были определены способом, описанным в ссылке [2]. Данные коэффициенты были определены для спортивного пороха Сунар 308Win в [4].

Уравнение энергии для многофазной модели Эйлера имеет вид:

$$\frac{\partial(\gamma\alpha_q\rho_q h_q)}{\partial t} + \nabla\ (\gamma\alpha_q\rho_q \overrightarrow{v_q}\ h_q) = -\gamma\alpha_q\frac{\partial(\rho_q)}{\partial t} + \gamma\tau_q : \nabla\overrightarrow{v_q} - \nabla(\gamma\overrightarrow{q_q}) + \gamma S_q +$$
$$+ \gamma\sum_{p=1}^{n}(Q_{pq} + \dot{m_{pq}}h_{pq} - \dot{m_{qp}}h_{qp}) \quad (3)$$

где h_q- энтальпия фазы *q*, тепловой поток, Q_{pq} - интенсивность теплообмена между фазами *p* и *q*.

Корреляция Ранца - Маршалла (5) использовалась для решения коэффициента теплопередачи h_{pq} (4) между фазами воздух и вода.

$$h_{pq} = \frac{6K_q\alpha_p\alpha_q Nu_p}{d_p^2} \quad (4)$$

$$Nu_p = 2.0 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (5)$$

где K_q- теплопроводность, Nu - критерий Нуссельта, d_p - диаметр частицы, Re - критерий Рейнольдса, Pr - Критерий Прантля.

Модель ANSYS для жидкого испарения. Уравнение количества движения для модели испарения (6) содержит выражение массопереноса из жидкого

состояния в газовое состояние (испарение). Массоперенос из газообразного состояния в жидкое (конденсация) в нашем случае равен нулю.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha p_\nu) + \nabla(\gamma\alpha\rho_\nu \overrightarrow{V_\nu}) = \dot{m}_{l\to\nu} - \dot{m}_{\nu\to l} \quad (6)$$

где ν – индекс пара; *l*–индекс жидкости; α – объемная доля пара; ρ_ν – плотность пара; $\overrightarrow{V_\nu}$–скорость пара; $\dot{m}_{l\to\nu} - \dot{m}_{\nu\to l}$ - скорость испарения [кг/(с м^3)].

Массоперенос при испарении начинается, когда температура насыщенияT_{sat} (ввод для Fluent) превышает температуру окружающей среды в определенной части области. Массоперенос определяется уравнением:

$$\dot{m}_{l\to\nu} = coeff\alpha_l\rho_l\frac{(T - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (7)$$

В качестве граничных условий задавали следующие параметры. Для входа потока задавали 0 давление. На выходе для имитации импульса была задана функция изменения давления. Функция изменения давления была определена экспериментально (рисунок 3) и введена непосредственно в пользовательский интерфейс Ansys Fluent. Выражение вводится в виде: *-113269[kg m^-1 s^-4]*Time**2 + 237253[kg m^-1 s^-3]*Time - 129600 [kg m^-1 s^-2].* Пользователи Fluent также имеют возможность указать различные граничные условия и условия зоны ячейки, написав пользовательскую функцию (UDF). Создание даже небольшого UDF требует значительных усилий. Например, для создания UDF инженерам необходимо преобразовывать единицы, программировали на C и изучать концепции программирования Fluent.

В результате CFD-моделирования при помощи постпроцессинга пакета *Ansysfluent* получили контуры (поля) исследуемых параметров (объемных концентрации фаз, избыточного давления, скорости течения фаз и др.), значения которых определены в каждой точке расчетной области в зависимости от времени.

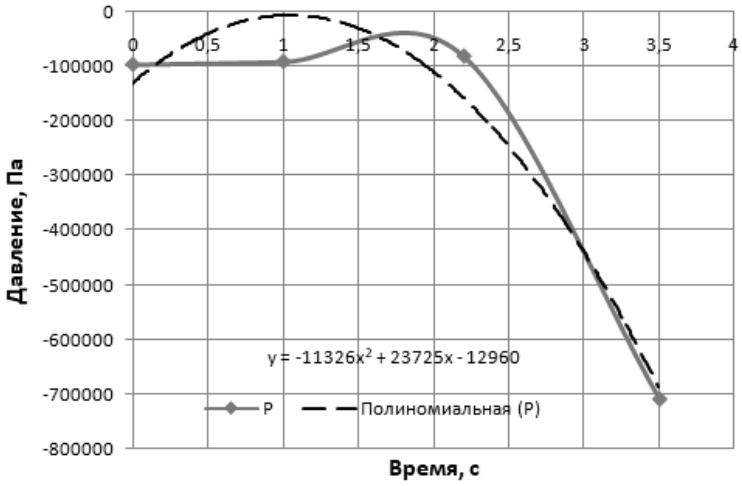


Рисунок 3 – Функция изменения давления

CFD-исследование сушки пороха в аппарате выполнено с применением ANSYSWorkbench 2021 R1, пакет Fluent. Благодаря возможности фиксировать скорость фазы «вода» 0 м/с в пористой области, влажный порох можно смоделировать в математической модели. Многофазная модель Эйлера, благодаря своей сложности, более чем подходит для такого рода задач. Смоделированный процесс сушки удаляет влагу до требуемых значений.

Литература:

1. Л.С. Шаблин, А.В. Кривцов, Д.А. Колмакова. Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent. Изд-во Самар. ун-та., Самара, 2017.108 с.

2. ANSYS, Inc. ANSYS Fluent tutorial guide 18.0. ANSYS, Inc. 2017. 1052 p.

3. R. M. Bowen. Theory of Mixtures. In A. C. Eringen, editor, Continuum Physics. Academic Press, New York, 1976. 127p.

4. Л.И. Бахтиаров, В.Ф. Мадякин, В.А. Петров, А.Б. Лившиц, Вестник технол. ун-та, 25, 1, 28-32 (2022).

УДК 66.048

ИССЛЕДОВАНИЕ ХЕМОСОРБЦИИ ПРИ ПРЯМОТОЧНОМ ТЕЧЕНИИ ГАЗА И ПЛЁНКИ ЖИДКОСТИ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАНАЛАХ

Бахтиев М.А., Дубкова Н.З., Николаев А.Н.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: bakhtievmarat95@gmail.com

Одним из перспективных методов интенсификации процессов массопереноса является прямоточное взаимодействие потока газа и пристенной плёнки жидкости, реализуемое в цилиндрических каналах [1]. Такое взаимодействие не накладывает ограничений на скорость движения газа и позволяет создавать компактные высокопроизводительные аппараты. Исследования массопереноса в плёнке жидкости в условиях прямоточного восходящего и нисходящего движения фаз, показали, что значения коэффициентов массоотдачи на порядок превышают их значения в условиях свободного плёночного стекания и на два порядка, в условиях распыления жидкости или барботажа [2]. При проведении физической абсорбции на длине канала 150-200 мм уже достигается равновесие, что накладывает ограничение на использование трубок большей длины. При хемосорбции достаточно часто используют длинные трубки 5-6 м, поскольку движущая сила процесса остаётся практически постоянной по всей их длине. В связи с тем, что интенсивность массопереноса в плёнке жидкости при прямоточном взаимодействии фаз очень велика, для поддержания постоянства движущей силы по длине трубки необходимо, чтобы процесс с химической реакцией, проходил в диффузионной области, при условии:

$$t_D \rangle\rangle\ t_p \qquad (1)$$

где t_p - это время реакции, а t_D - это «эквивалентное время диффузии», независимое от вида применяемой модели.

Эквивалентное время диффузии t_D можно определить по зависимости, приведённой в работе [3]:

$$t_D = \frac{D_A}{\beta_{ж}^2} \qquad (2)$$

где $\beta_ж$ - коэффициент физической абсорбции, м/с.

При прямоточном сильном взаимодействии фаз при скоростях газовой фазы от 10 до 55 м/с и числах Рейнольдса жидкости Re_L=300-3500 для малорастворимых газов, как CO_2 и H_2S, коэффициенты массоотдачи находятся в пределах $1 \div 4 \cdot 10^{-3}$ м/с [4]. Чтобы выполнялось условие (1), нужно, чтобы реакция была

быстрая или мгновенная и проходила за время меньшее, чем $t_p < t_D/4 = (1.5 \div 0.093) \cdot 10^{-3}$ сек.

В качестве примера процессов, протекающих с быстрыми реакциями, рассмотрим процесс абсорбцию CO_2 водными растворами щелочей, процесс абсорбции CO_2 и H_2S водным раствором моноэтаноламина (МЭА).

Общую реакцию, протекающую при абсорбции CO_2 растворами щёлочи, можно записать в виде [4]:

$$CO_2 + 2OH^- \rightarrow CO_3^{2-} + H_2O \qquad \text{(I)}$$

которую можно считать практически необратимой.

Время реакции в процессах абсорбции CO_2 растворами щёлочей будет равно:

$$t_p = \frac{1}{k_I \cdot B_0} \qquad (7)$$

где B_0 - концентрация ионов OH^- в объёме жидкой фазы; k_I - константа скорости реакции (I), равная при 20°С и бесконечном разбавлении $k_I \approx 6000$ л/(моль·сек) [3].

Величина концентрации свободной щёлочи в объёме жидкой фазы B_0 может изменяться в пределах от 0.1 до 4.0 моль/л. Следовательно, с учётом приведённых выше коэффициентов массоотдачи, величина произведения $\sqrt{D_A B_0 k_I} / \beta_ж$ может составлять 0.236÷6.

Стехиометрический коэффициент q по реакции (I) равен 2. Поверхностная концентрация двуокиси углерода c'_0 при содержании его 1÷25 об.% в газе при атмосферном давлении может изменяться в пределах $\approx 2.2 \cdot 10^{-4} \div 9.6 \cdot 10^{-3}$ моль/л. Поэтому величина $\sqrt{\frac{D_A}{D_B}} + \frac{B_0}{q \cdot c'_0}\sqrt{\frac{D_B}{D_A}}$ может изменяться от 7.5 до $1.17 \cdot 10^4$

Из рис. 1 видно, что для режима быстрой реакции при абсорбции CO_2 водными растворами щелочей необходимо, чтобы при прямоточном течении газа и плёнки жидкости в цилиндрических каналах соблюдались следующие условия:

- концентрации щёлочи >0.5моль/л;
- действительные скорости газового потока:

< 25 м/с при концентрациях щёлочи 0.5-2 моль/л;

< 40 м/с при концентрациях щёлочи 2-4 моль/л.

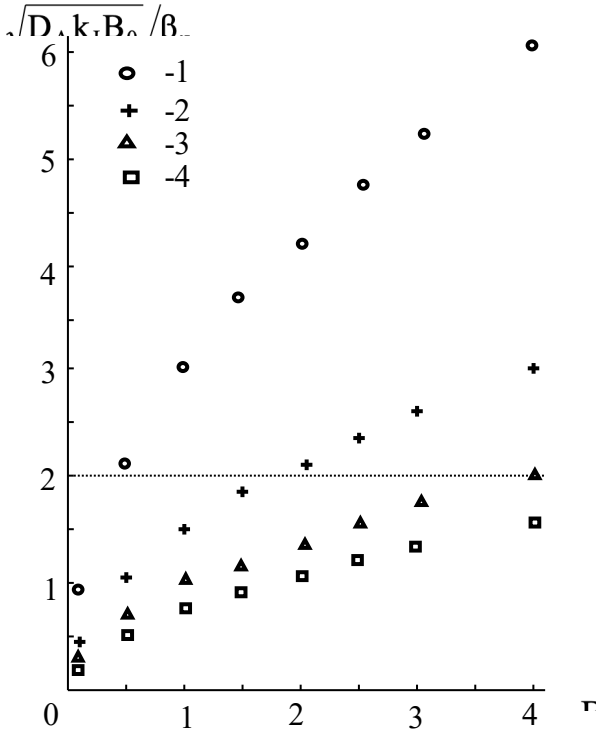


Рис.1 Зависимость параметра $\sqrt{D_A B_0 k_l}/\beta_ж$ от начальной концентрации щелочи в жидкой фазе $\sqrt{D_A k_1 B_0}/\beta_ж$ при следующих значениях скорости газа W, м/с: 1 – 12; 2 -25; 3 -40; 4 -55.

Литература:

1. Дубков, И. А. Способ очистки пылегазовых выбросов энергетических установок / И. А. Дубков, Н. З. Дубкова, А. Н. Николаев // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 20. – С. 80-82. – EDN SZCCGQ.

2. Коновалов, Н.М. и др. Массоотдача в турбулентных плёнках в условиях вертикального прямоточного движения газо-жидкостного потока/ Н.М. Коновалов, Н.А. Войнов, Н.А. Николаев // Теор. основы хим. технологии. №1, Т.31, 1997. - С.1-6.

3. Ганз, С.Н. Технологические процессы и оборудование производств синтез-газа и связанного азота / С.Н. Ганз // Харьков: Изд-во ХГУ им. Горького. - 1960. – 550 с.

4. Калимуллин, И. Р. Очистка крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий в аппаратах с вихревым взаимодействием потоков / И. Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // Экология и промышленность России. – 2011. – № 2. – С. 4-6. – EDN PEYVYV.

УДК 669.162.25

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГУБТ ПРИ СУХОМ СПОСОБЕ ОЧИСТКИ ДОМЕННОГО ГАЗА

Бударин Н. Л., Хромченков В. Г.
Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт,
E-mail: BudarinNL@mpei.ru

В настоящее время доменные печи работают под повышенным давлением газа под колошником. Из печи доменный газ выходит с температурой 200-350 °С, давлением 2,0-3,5 атм, расходом 100-800 тыс. нм^3/ч и запыленностью 5-15 г/нм^3. Для использования газа в качестве вторичного энергоресурса он должен быть очищен до 3-5 мг/нм^3. Такая очистка достигается в так называемой «мокрой» газоочистке, состоящей из охладительного скруббера, в котором доменный газ охлаждается до расчетной температуры 40 ˚С и проходит предварительную очистку и труб Вентури для тонкой очистки газа. В состав данной схемы газоочистки входит также водооборотный цикл со сложным и дорогим шламовым хозяйством. Удельный расход охлаждающей воды очень велик и составляет 5-7 кг воды/кг сухого газа.

Потенциальная энергия доменного газа наиболее эффективно может быть использована в специальных газовых утилизационных бескомпрессорных турбинах (ГУБТ) для выработки электроэнергии, в которых сжатый доменный газ служит рабочим телом. Таким образом, в ГУБТ частично возвращается энергия, затраченная на сжатие дутьевого воздуха в воздушных компрессорах, установленных перед доменной печью.

Расчёты показали, что возврат энергии может составить 100% и более. При этом выручка от экономии топлива на предприятии будет составлять от 0,8 до 3 млн руб./год в зависимости от температуры доменного газа на выходе из печи.

Увеличить эффективность использования ГУБТ можно с помощью «сухой» очистки доменного газа. Однако ее разработка и внедрение были приостановлены из-за несовершенства схем использования. Дело в том, что если установить сухую газоочистку, температура газа за турбиной, при указанных параметрах газа перед турбиной, составит 120-220 °С, что существенно выше допустимых 70°С для трубопроводов доменного газа. Установка же охладительного скруббера с водооборотным циклом резко усложняет и удорожает схему и не дает видимых преимуществ перед традиционной. Расход охлаждающей воды лишь немногим меньше, чем в случае применения мокрой газоочистки. Это является причиной того, что устройства для сухой очистки доменного газа до сих пор не были построены в России и за рубежом [1].

В данной работе предлагается решение проблемы использования сухой газоочистки в схеме с ГУБТ. Перед турбиной устанавливаются сухие пылеуловители (циклоны) для улавливания крупнодисперсной пыли d>20 мкм (грубая очистка), сухой электрофильтр или рукавный фильтр для тонкой очистки пыли d<20 мкм и испарительный скруббер, необходимый для охлаждения газа в трубопроводах до температуры 57–62 °С. Расход охлаждающей воды при такой схеме составляет 0,06 кг/кг сухого газа. Испарительное охлаждение доменного газа происходит до таких температур, чтобы в процессе расширения он перешел из влажного состояния в насыщенное и далее расширялся бы с конденсацией паров воды и совершением работы в турбине. (рис. 1).

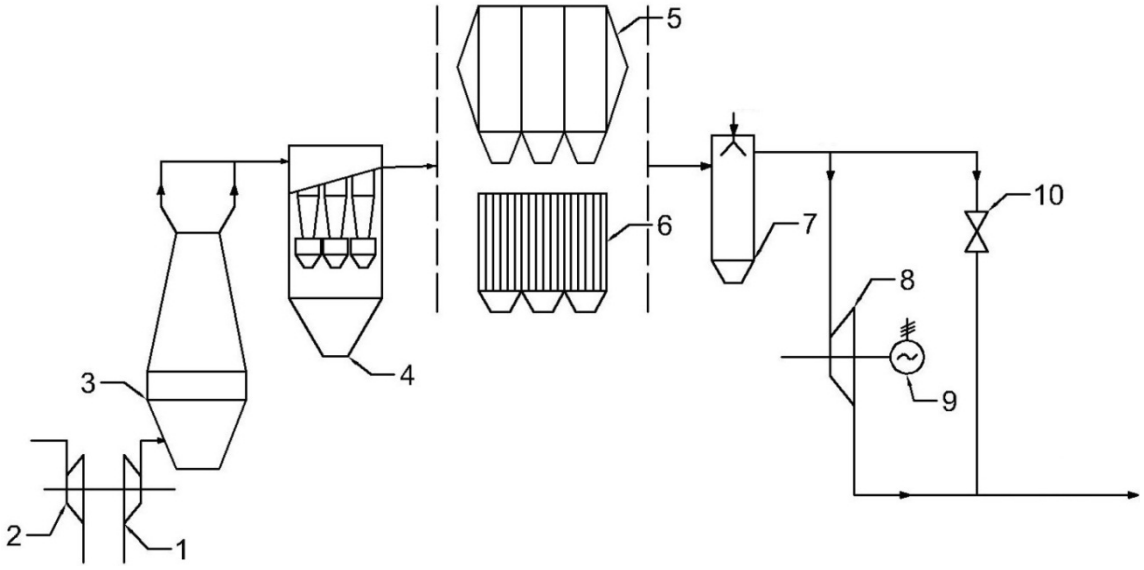


Рисунок 1 - Схема сухой очистки доменного газа: 1 - компрессор; 2 - приводная турбина; 3 - доменная печь; 4 - батарейный циклон; 5 - электрофильтр; 6 - рукавный фильтр; 7 - испарительный скруббер; 8 - ГУБТ; 9 - электрогенератор; 10 - дроссельная группа.

В данной работе были рассмотрены различные схемы компоновки сухой газоочистки. Результаты расчётов для 6 вариантов схем представлены в таблице 1.

Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что наиболее эффективной технологически является схема с применением группы циклонов и рукавного фильтра, где запыленность составляет 0,5 мг/м^3. Но наиболее предпочтительным для выбора является вариант с применением батарейного циклона и электрофильтра, где запыленность после очистки выше, но в пределах требуемых показателей - 3,6 мг/м^3 при наименьших приведенных затратах.

Таблица 1 - Характеристики схем сухой очистки

Состав оборудования	Ц+ЭФ	ГЦ+ЭФ	БЦ+ЭФ	Ц+РФ	ГЦ+РФ	БЦ+РФ
Температура доменного газа, °С	200	200	200	200	200	200
Начальная запыленность, г/м^3	10	10	10	10	10	10
Запыленность после первой ступени, г/м^3	0,6	0,25	0,5	0,6	0,25	0,5
Запыленность после второй ступени, г/м^3	0,0044	0,0018	0,0036	0,0012	0,0005	0,001
Приведенные затраты, млн. руб	26,09	22,78	22,57	86,02	82,72	82,50

Примечание: Ц - циклон ЦП-2-5000; ГЦ - группа циклонов ЦН-24-2000; БЦ - батарейный циклон ЦБ-254Р; ЭФ - электрофильтр УГТ-40-3; РФ - рукавный фильтр ФРО-6000.

Литература:

1. Н. Л. Бударин, В. Г. Хромченков. Повышение эффективности использования ГУБТ при сухом способе очистки доменного газа // Тезисы докладов XXVII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». 11-12 марта 2021. С. 698.

УДК 66.023.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА ЭТАНА В ПАКЕТЕ UNISIM

Винокурова Д.М., Рачковский С.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: mahp_kstu@mail.ru

За основу принят процесс производства этилена 3-й очереди ПАО "Казаньоргсинтез" (цех 0771-0776) [1, 2].

Процесс пиролиза этановой фракции осуществляется в двухпоточных печах, укомплектованных чашеобразными и радиационными горелками с двойным подсосом воздуха.

Очищенная этановая фракция из аппаратов сероочистки вместе с рециклом этана, поступающего из отделения газоразделения, направляется в конвективную часть змеевика печи пиролиза, где нагревается до температуры 500-580 ^{0}C, затем переходит в радиационную секцию, в которой происходит нагрев до температуры 850 ^{0}C и протекает процесс пиролиза этана.

При пиролизе - термическом разложении углеводородов, идущем при небольшом давлении и высокой температуре - происходят реакции, которые можно разделить на три основные группы [3-5]:

1) реакции деструкции, идущие с образованием непредельных углеводородов;

2) реакции конденсации и полимеризации, ведущие к смоло- и коксообразованию;

3) реакции прямого молекулярного распада с образованием сажи и водорода.

Целевая реакция процесса пиролиза

$2C_2H_6 \rightarrow C_2H_4 + 2CH_4$. (1)

Одновременно идут следующие побочные реакции:

$2C_3H_6 + 3H_2 \rightarrow C_2H_2 + 4CH_4$; (2)

$8C_3H_8 \rightarrow C_3H_6 + C_4H_{10} + C_2H_4 + C_4H_8 + 7CH_4 + C_4H_6 + H_2$; (3)

$C_4H_6 + C_2H_4 \rightarrow C_6H_6 + 2H_2$; (4)

$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$. (5)

Время пребывания сырья в реакционной зоне не более одной секунды. Давление газа пиролиза на выходе из печи (0,1-0,15) МПа.

Для снижения парциального давления углеводородов паров и уменьшения коксообразования в сырье перед входом в секцию конвективного змеевика подается пар в количестве до 30% от веса подаваемого сырья.

Газ пиролиза с температурой 850 ^{0}C из печей пиролиза поступает в закалочные камеры, где происходит быстрое его охлаждение до температуры 600 ^{0}C за счет испарения впрыскиванием химзагрязненной воды.

Пирогаз из закалочных камер с температурой не более 600 ^{0}C и давлением (0,1-0,12) МПа поступает в трубное пространство закалочно-испарительных аппаратов Т-2, где охлаждается до температуры 450 ^{0}C питательной водой, подаваемой в межтрубное пространство.

Образовавшийся в закалочно-испарительном аппарате пар поступает через паросборник в цеховой паропровод и далее направляется в заводскую сеть с давлением 3 МПа.

Построение модели узла пиролиза этана, представленной на рис. 1, выполнена в соответсвии с [6].

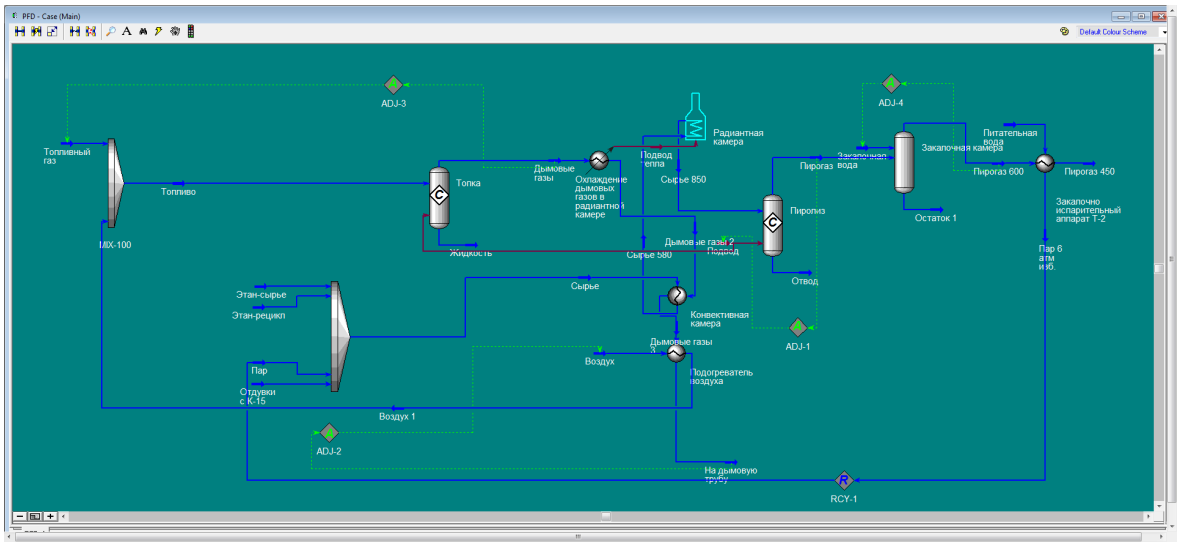


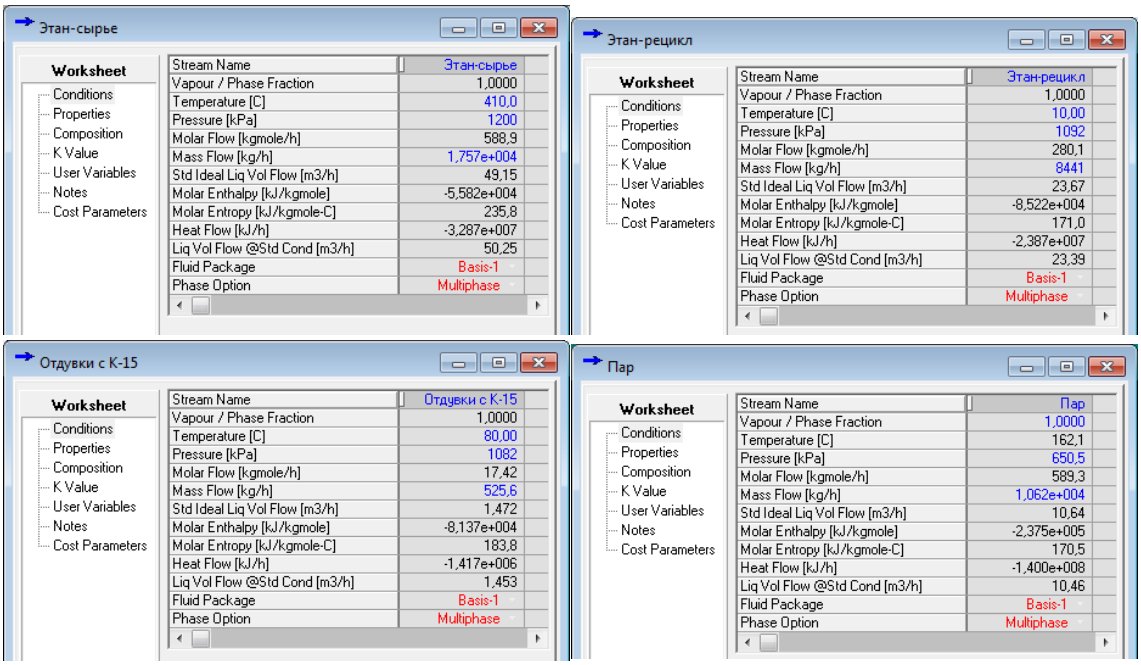
Рис.1 Модель узла пиролиза этана с рециклом парового потока

Для моделирования реакций пиролиза (1-5) принят модуль реактора конверсии (C). Ниже приведена матрица этих реакций.

Reaction Matrix: Пиролиз

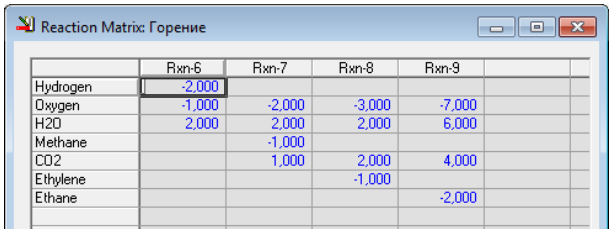
	Rxn-1	Rxn-3	Rxn-2	Rxn-4	Rxn-5
Ethane	-2,000				
Ethylene	1,000	1,000		-1,000	
Methane	2,000	7,000	4,000		-1,000
Propane		-8,000			
Propene		1,000	-2,000		
n-Butane		1,000			
1-Butene		1,000			
13-Butadiene		1,000		-1,000	
Hydrogen		1,000	-3,000	2,000	3,000
Acetylene			1,000		
Benzene				1,000	
H2O					-1,000
CO					1,000

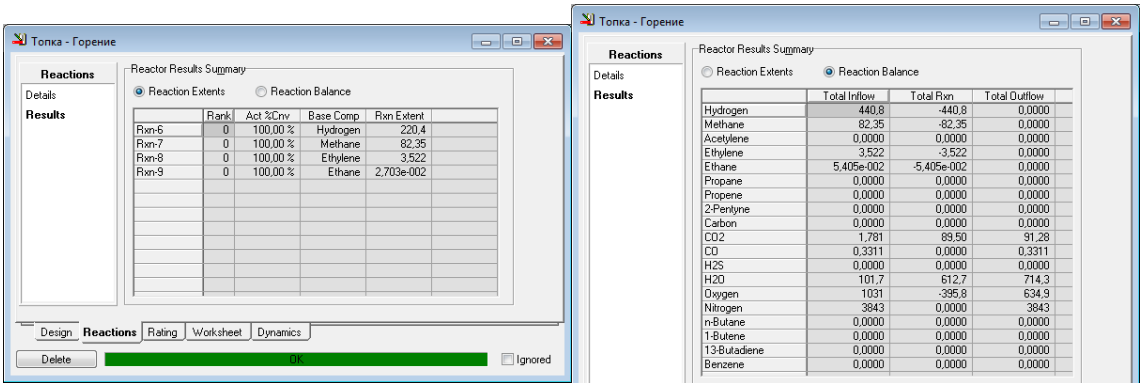
В соответствии с технологической схемой в печь пиролиза поступают следующие сырьевые потоки



Данные потоки смешиваются в смесителе (MIX-101) и направляются в трубчатку конвективной камеры печи, где нагреваются до 580 ^{0}C и далее попадаются в радиантную секцию. В качестве топлива, направляемого в горелки топки, выступает топливный газ. Для его сжигания подается воздух, который предварительно подогревается до 200^{o}C в подогревателе воздуха, в качестве которого выступает утилизатор тепла отходящих дымовых газов. В смесителе (MIX-100) происходит смешение топлив

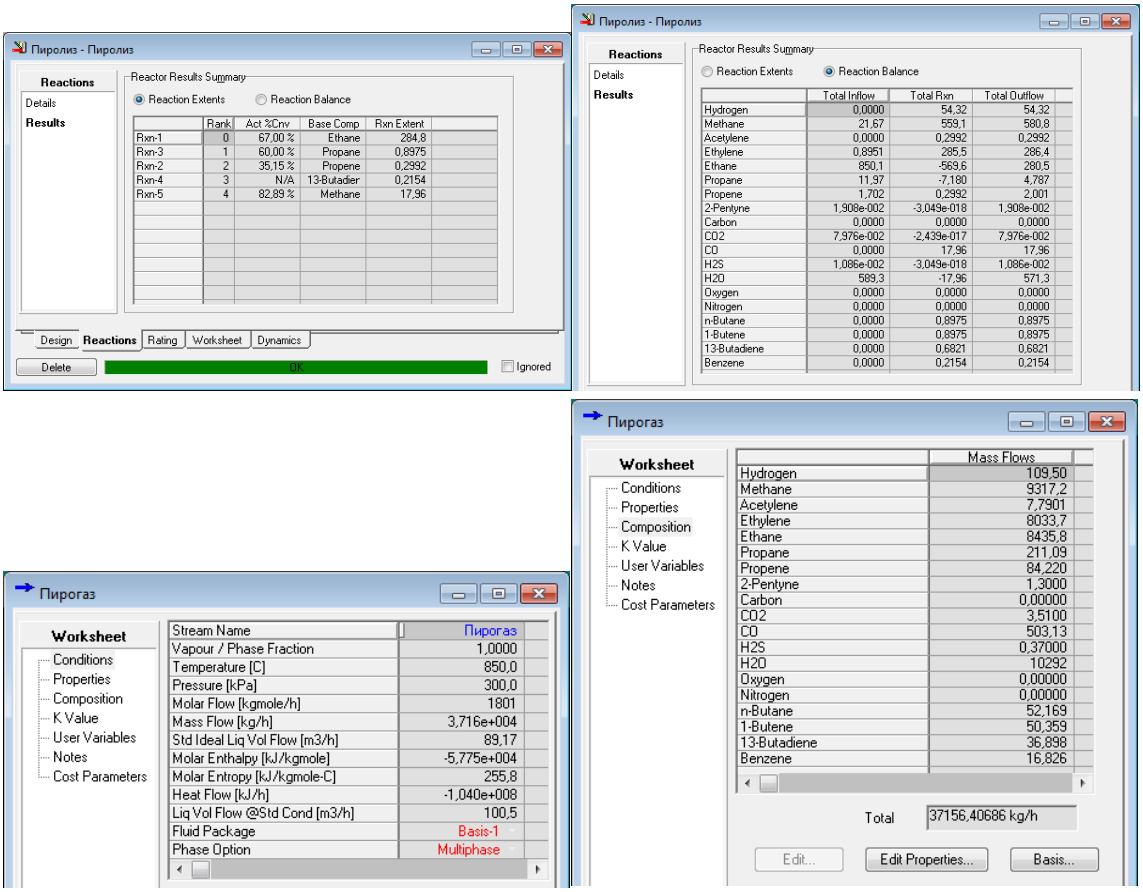
ного газа и воздуха. При сгорании протекают следующие реакции горения.





Работа топки моделируется блоком реактора конверсии, в котором протекают, указанные выше реакции.

Образующиеся при сгорании дымовые газы нагревают в радиантной камере печи сырьевой поток от 580 ^{0}C до 850 ^{0}C. Подвод тепла осуществляется излучением от потока дымовых газов. При температуре сырья 850 ^{0}C протекают реакции пиролиза результаты приведены ниже.



Целевым продуктом является пирогаз, направляемый далее последовательно в закалочную камеру и закалочно-испарительный аппарат (Т-2), где его температура снижается до 600 ^{0}C. При этом происходит торможение реакций пиролиза.

Для нахождения расхода закалочной воды предусмотрен блок (ADJ-4).

Рецикл парового потока (рис.1) формируется с помощью модуля (RCY-1).

Полнота сгорания топлива лимитируется содержанием метана в отходящих дымовых газах равным нулю, что обеспечивается требуемым расходом воздуха (ADJ-2).

Температура дымовых газов в топке при этом не должна превышать 1050 ^{0}C, что обусловлено прочностью труб радиантной секции - это условие в модели реализует модуль (ADJ-3).

Реакции пиролиза эндотермические, поэтому для поддержания необходимой температуры процесса необходим дополнительный подвод тепла в змеевик радиантной камеры, что реализуется посредством блока (ADJ-1).

Литература:

1. Постоянный технологический регламент производства этилена IV очереди. Цех пиролиза и очистки газа № 13-71-06, том 1.

2. ИТС 18-2016. Производство основных органических химических веществ/ Росстандарт. Дата введения 2017-07-01. Электронный ресурс: http://docs.cntd.ru/document/1200143290.

3. Салимгареев Р.Р., Рачковский С.В. Характеристика производства этилена/ Вестник Казанского технологического университета, 2014, Т. 17, № 11, с. 178-179.

4. Салимгареев Р.Р., Рачковский С.В. Моделирование процесса пиролиза в CHEMCAD/ Вестник Казанского технологического университета, 2016, Т. 19, № 12, с. 132-134.

5. Мухина Т.Н., Барабанов Н.Л., Бабаш С. Е. и др. Пиролиз углеводородного сырья. - М.: Химия, 1987. 240 с.

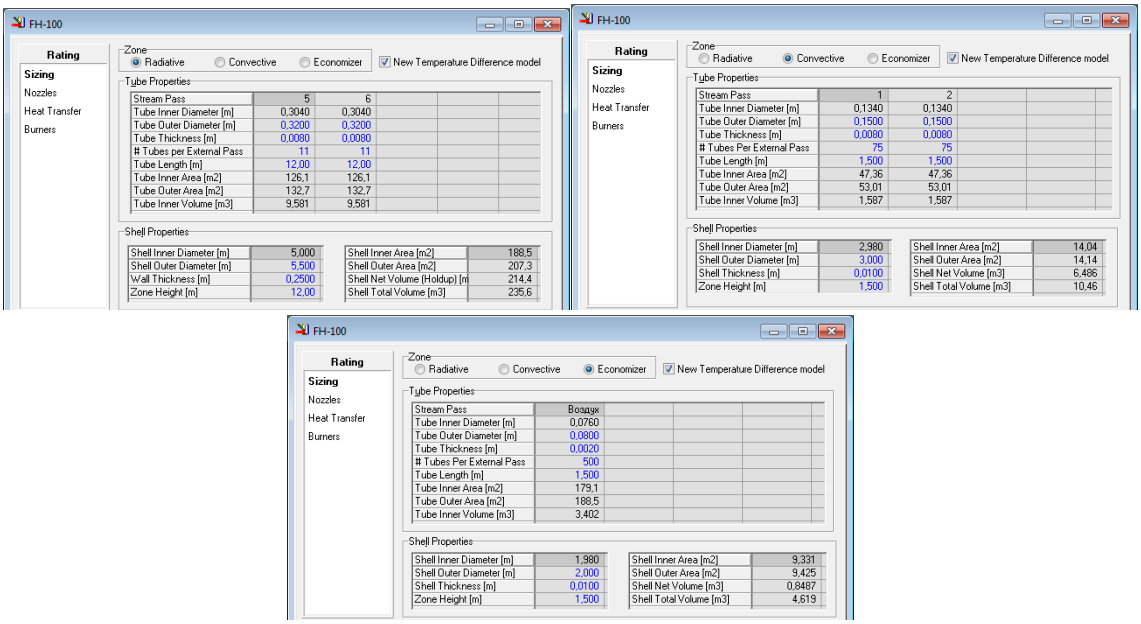
6. UniSim® Design Tutorials and Applications / Электронный ресурс: https://www.academia.edu/11680327/UniSim_Design_Tutorials_and_Applications.

УДК 66.023.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПЕЧИ ПИРОЛИЗА ЭТАНА В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Винокурова Д.М., Рачковский С.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: mahp_kstu@mail.ru

Данный материал является логическим продолжением работы [1]. В качестве основного моделирующего блока принят модуль Fired Heater (Furnace) [2]. За конструктивную основу принята печь типа ЦС1 280/12 [3]. Печь - цилиндрическая с пристенным расположением труб змеевика в одной камере радиации, свободного вертикально-факельного сжигания комбинированного топлива. Комбинированная горелка расположена в поду печи. Поверхность нагрева радиантных труб 280 м^2, рабочая длина труб 12 м, внутренний диаметр корпуса 5 м. Тепло производительность до 12,99 МВт. Печь двухпоточная и состоит из радиантной камеры (топки), конвективной зоны и экономайзера, конструктивные характеристики которых приведены ниже.



Сырьё подается в печь двумя потоками в трубный пучок конвективной зоны, где происходит его предварительный нагрев до 516 °С и далее направляется в змеевик радиантной камеры. Здесь температура сырья поднимается до 830 °С при этом происходит пиролиз [1] и образуется пирогаз (см. рис. 1). Поскольку модуль Fired Heater не предусматривает возможность моделирования реакций, в модели пирогаз направляется в реакционный модуль (Реактор конверсии) на выходе из которого получаем целевой продукт - газ пиролиза. Так как

реакции пиролиза эндотермические для поддержания рабочей температуры необходим подвод тепла к сырьевому потоку в радиантной камере (Q-101), что осуществляется с помощью модуля (компенсация тепла реакций пиролиза).

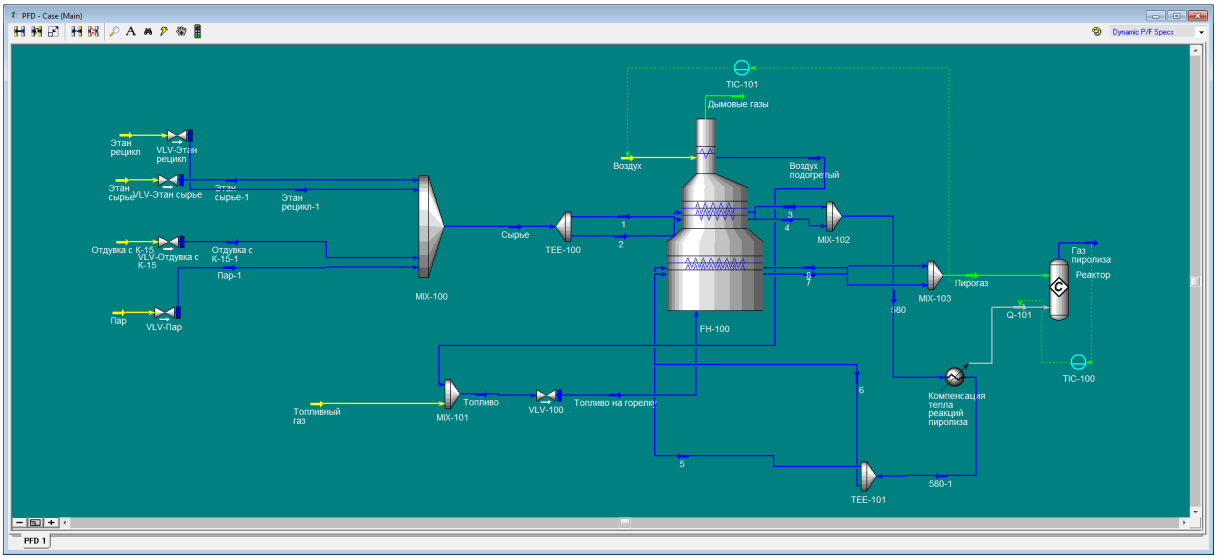
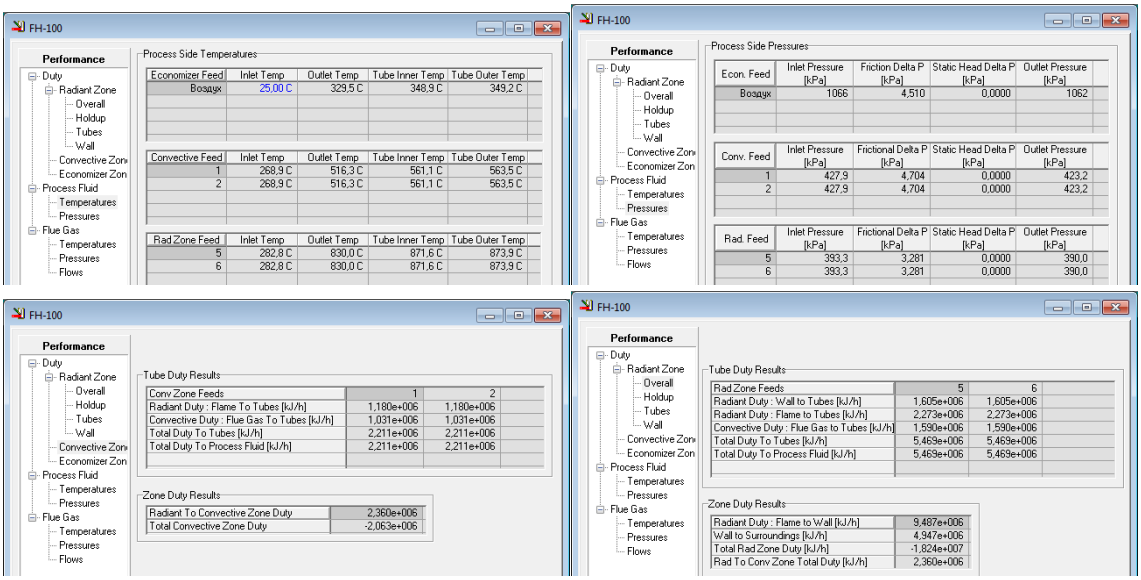
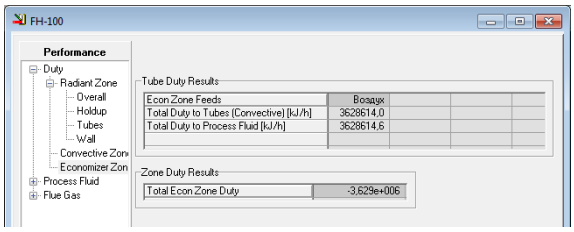


Рис. 1. Модель печи пиролиза

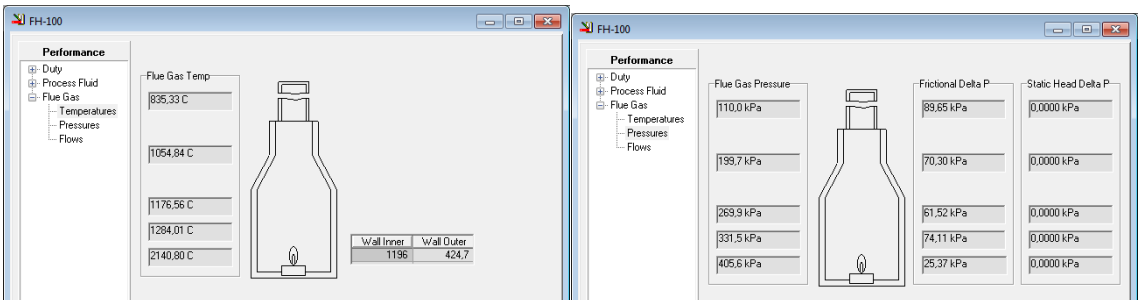
Теплотехнические характеристики продуктового потока по рабочим зонам печи.



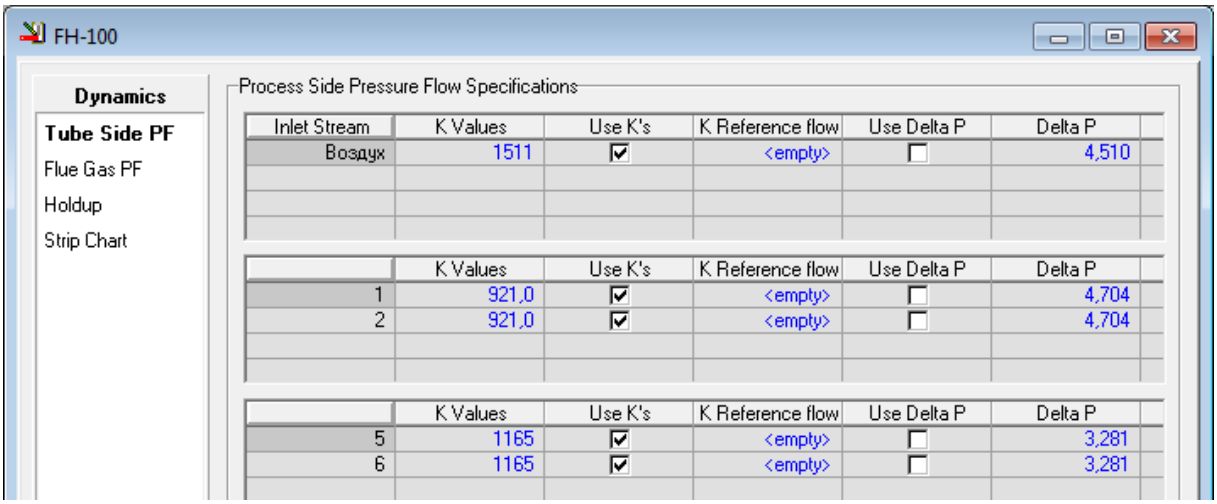
Рассмотрим топливный тракт печи. В качестве топлива используется технологический газ, который смешивается с расчетным количеством воздуха предварительно нагретого в экономайзере печи.

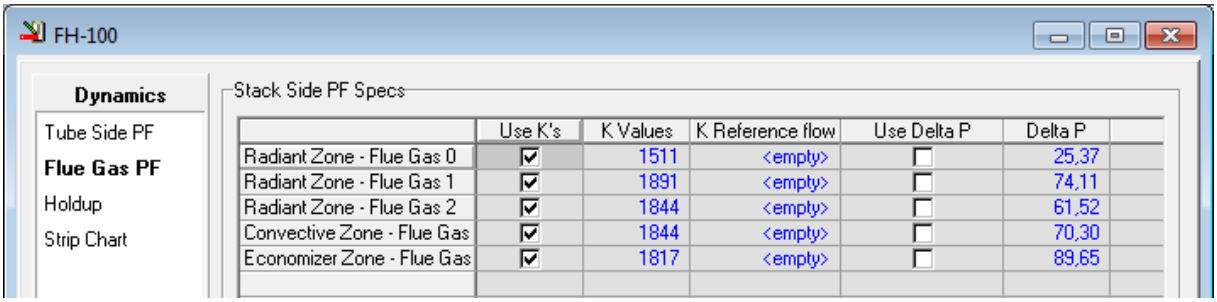


Далее топливная смесь подается на горелку. При сгорании топлива образуются дымовые газы, которые поднимаясь вверх по печи последовательно проходят радиантную, конвективную зону, экономайзер и поступают в дымоход печи. Ниже представлены технологические характеристики этого тракта.

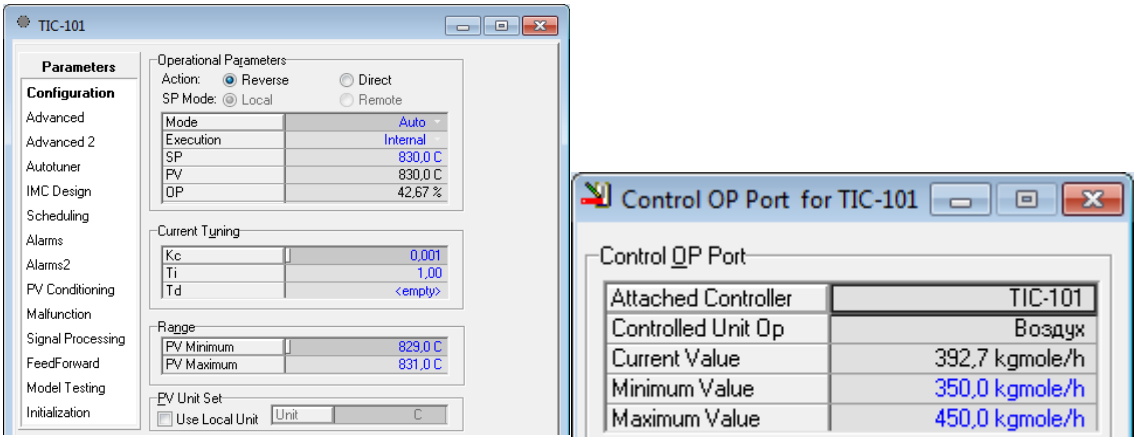


При формировании динамической модели в качестве определяющего параметра приняты коэффициенты теплопередачи в соответствующих зонах трубчатой печи.

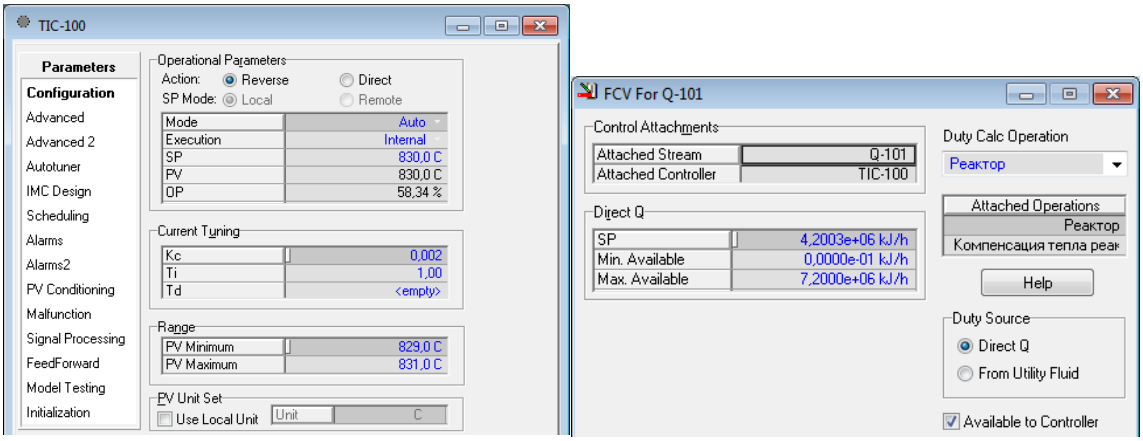




В модели использованы два управляющих контура: на основе модуля TIC-101 - для поддержания требуемой температуры пирогаза в радиантной зоне, что достигается подбором соответствующего расхода воздуха;



На основе модуля TIC-102 - для нахождения дополнительного количества тепла, подводимого к продукту в радиантной зоне, компенсирующего снижение температуры технологического потока за счёт протекания эндотермических реакций пиролиза.



Литература:

1. Винокурова Д.М., Рачковский С.В. Моделирование процесса пиролиза этана в пакете UniSim. Материалы шестой Всероссийской студенческой научно-технической конференции "Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленной безопасности и экология", Казань: 2022.

2. Honeywell, UniSim® Design Operations Guide, Copyright Honeywell 2017.

3. Трубчатые печи. Каталог. ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, Москва: 1998. 28 с.

УДК 621.521

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ОТКАЧКИ ДВУХРОТОРНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА С ВНЕШНИМ СЖАТИЕМ ЗА СЧЕТ СНИЖЕНИЯ ОБРАТНЫХ ПЕРЕТЕКАНИЙ ЧЕРЕЗ КАНАЛЫ РОТОРНОГО МЕХАНИЗМА

Власенков А. И., Исаев А. А., Бурмистров А. В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: minaltyn2000@mail.ru

Насосы внешнего сжатия типа Рутс являются наиболее востребованными безмасляными средствами откачки среднего вакуума [1, 2]. Благодаря бесконтактному вращению роторов насосы вакуумные двухроторные (НВД) могут работать с высокой частотой вращения и, соответственно, высокой производительностью [3, 4].

Важнейшим показателем эффективности НВД является величина обратных перетеканий откачиваемой среды через щелевые каналы: между двумя роторами, между роторами и цилиндрической расточкой корпуса и между торцами роторов и торцевыми крышками (щелевые каналы указаны на рисунке 1). При проектировании насосов данного типа задача профилирования роторов и выбора оптимального профиля стоит на первом месте. Идеальным следует считать такое профилирование и изготовление роторов и корпуса, при которых вход и выход насоса оказались бы полностью изолированными друг от друга. Однако, на практике за счет зазоров и погрешностей изготовления такой вариант недостижим, а возможно лишь добиться снижения перетеканий за счет минимизации зазоров и выбора эффективного профиля роторов [5].

В настоящее время в России серийно на АО «Вакууммаш» (г. Казань) выпускаются лишь два насоса вакуумных двухроторных - НВД-200 и НВД-600, имеющих одинаковый профиль и отличающихся длиной роторов [6]. Спецификой профиля роторов данных насосов является то, что впадина ротора не является огибающей для его головки, т.е. профиль теоретически не обкатываемый. Здесь в целях упрощения изготовления роторов впадина ротора, как и головка, выполнена в виде дуги окружности, а сопряжение головки с впадиной осуществляется с помощью дуги и отрезка прямой линии. За счет этого в данных насосах межроторный зазор при повороте роторов непрерывно изменяется, что безусловно не способствует снижению перетеканий. Так, например, при А= 75,093 мм минимальный межроторный зазор составляет 0,225мм, но при повороте роторов на 12 градусов он достигает 0,322 мм.

Для устранения данного недостатка были спроектированы и изготовлены ротора с эвольвентным профилем, причем межцентровое расстояние (A=75мм)

было решено сохранить, как у серийных насосов НВД-200 и НВД-600. Это позволило оставить без изменений основные кинематические узлы от насосов серии НВД. Однако, в связи с имеющимися ограничениями в интервалах выпуклой дуги окружности и радиусе основной окружности эвольвентной кривой, возникла необходимость изменения диаметра расточки корпуса, т.к. при сохранении межосевого расстояния диаметр расточки корпуса при использовании эвольвентных роторов должен составлять 112,52 мм. У серийных насосов НВД-200 и НВД-600 диаметр расточки корпуса равен 119,9 мм.

Таким образом, ротора рассматриваемого в данной работе насоса образованы дугами окружности и участками эвольвентной кривой (рис.1). Вершина ротора сформирована выпуклой дугой окружности АВ радиуса R1 ($\frac{\sqrt{2}}{16} \cdot \pi A < R1 < A \cdot \frac{27-5\cdot\sqrt{2}}{56}$) [7], которая переходит в участок эвольвенты ВС, описываемой системой параметрических уравнений:

$$\begin{aligned} y &= r_Б \cdot (\sin t - t \cdot \cos t) \\ x &= r_Б \cdot (\cos t + t \cdot \sin t) \end{aligned} \qquad (1)$$

где $r_Б$ – радиус базовой окружности эвольвенты, находящийся в диапазоне $\frac{A}{2\cdot\sqrt{2}} < r_Б < 0{,}3 \cdot A \cdot \sqrt{2}$.

В месте пересечения эвольвенты с базовой окружностью строится вогнутый участок окружности CDE [7].

Спроектированные ротора с эвольвентным профилем были изготовлены на АО «Вакуумаш» (рис.2) и собран опытный образец НВД (рис.3).

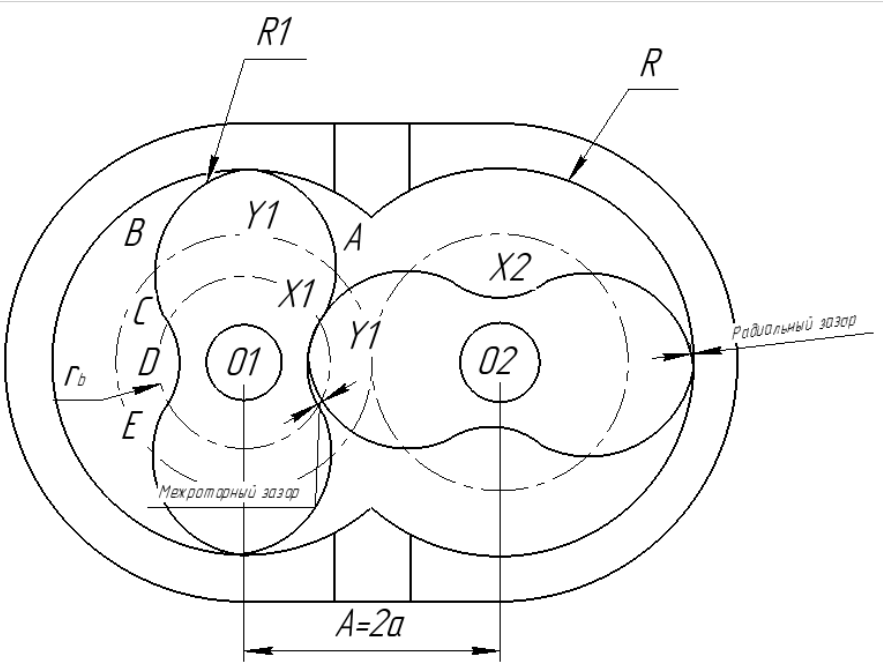


Рис. 1. Геометрия профилей роторов в НВД-200

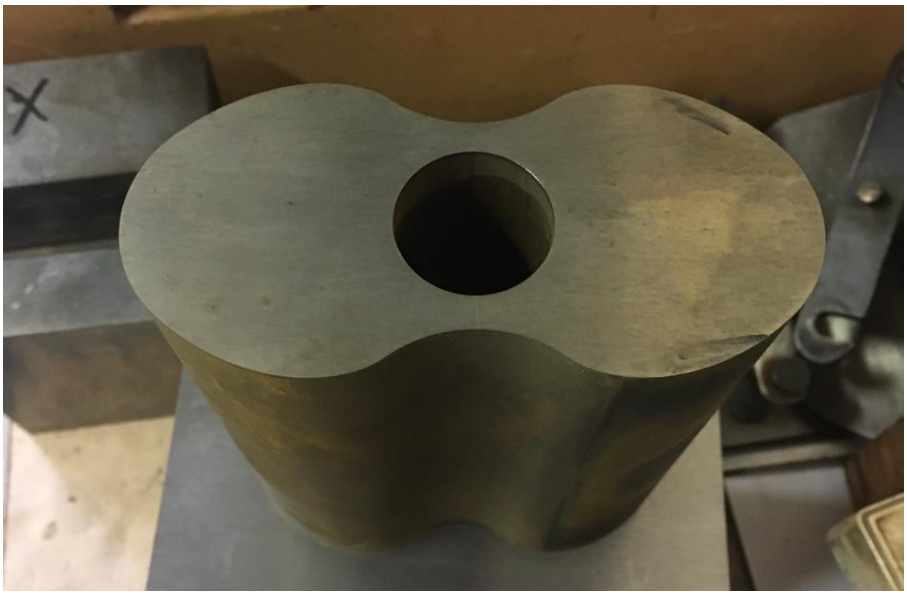


Рис. 2. Ротор с эвольвентным профилем

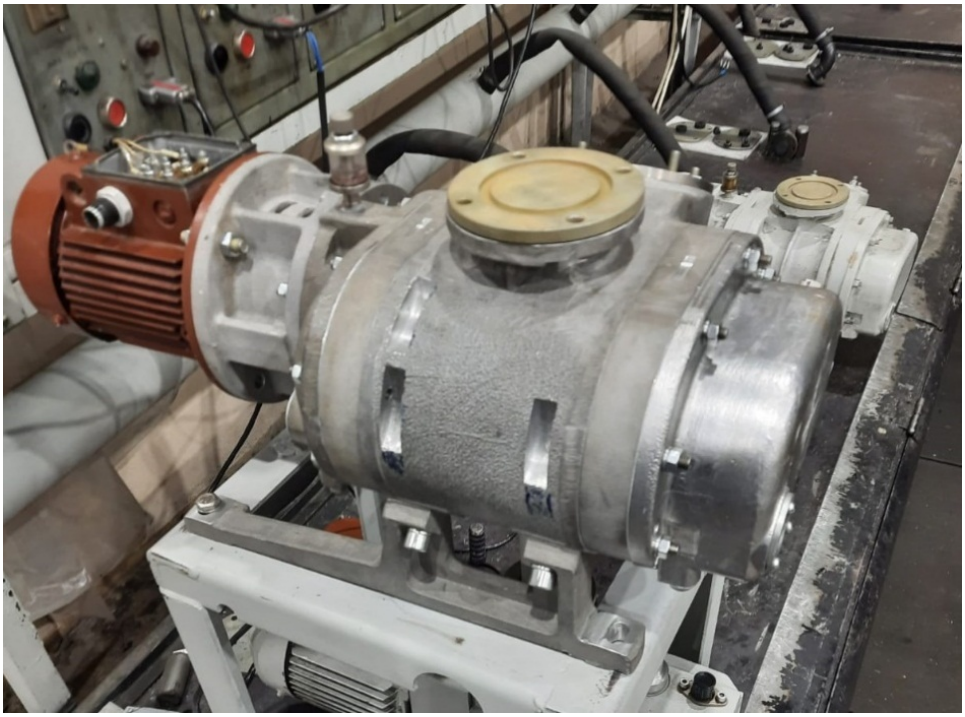


Рис. 3 Опытный образец НВД с эвольвентным профилем роторов

Проведено экспериментальное измерение откачных характеристик, полученных для насоса с серийным профилем и с эвольвентным.

На рис.4 сравниваются зависимости максимальной степени повышения давления от давления на выходе. Можно видеть, что за счет меньших обратных перетеканий для насоса с эвольвентным профилем степень повышения давления на 20% выше, чем у серийного.

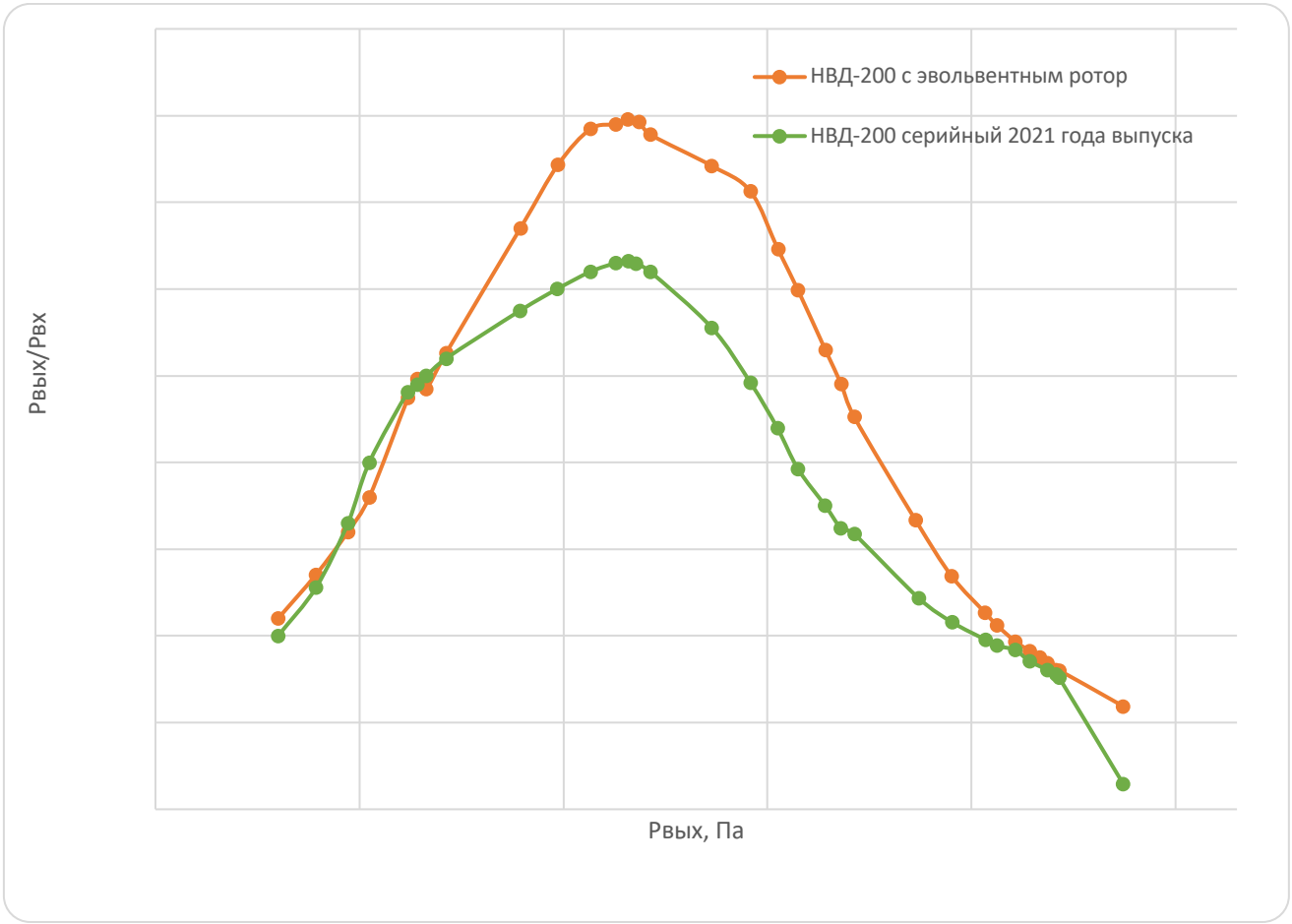


Рис. 4. Максимальная степень повышения давления агрегатов с НВД

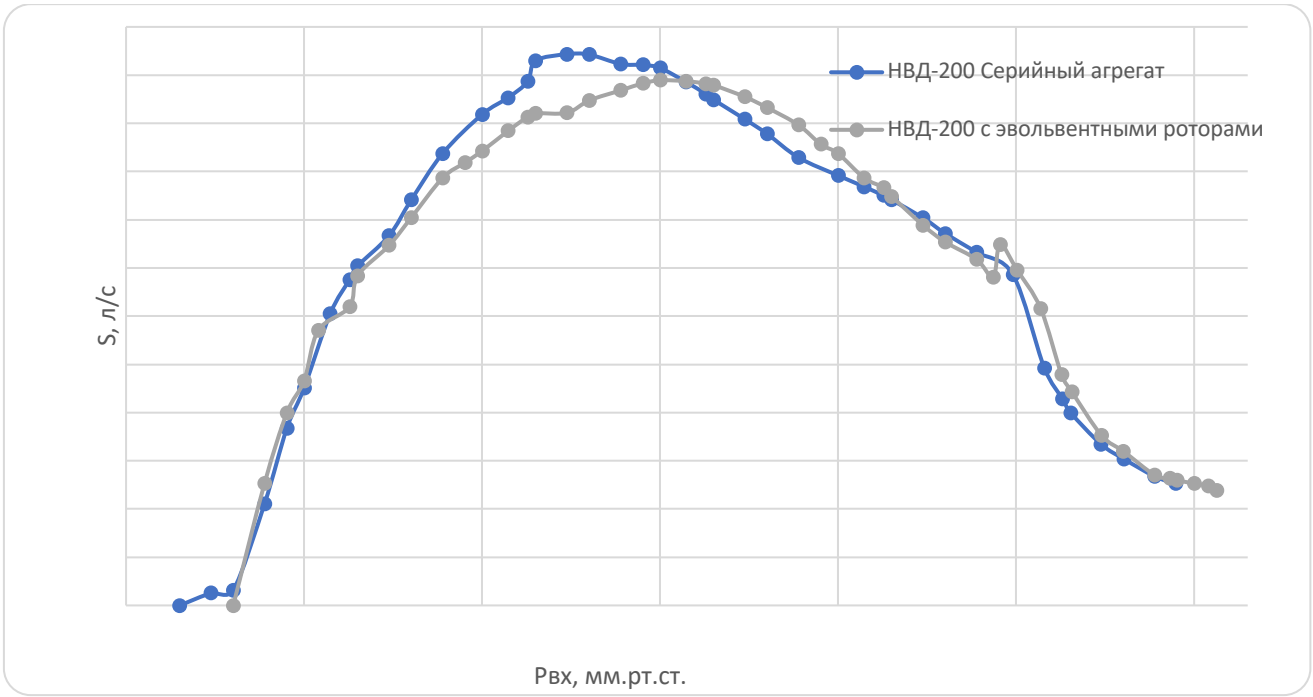


Рис. 5. Быстрота действия агрегатов с НВД

Сравнение профилей по быстроте действия (рис.5) позволяет сделать вывод, что практически во всем диапазоне давлений быстрота действия ДВН с

эвольвентными роторами практически не уступает серийному, хотя радиус расточки цилиндра на 7мм меньше. В это же время за счет меньших перетеканий пик характеристики для насоса с эвольвентным профилем почти на порядок смещен в сторону более высоких давлений, что в целом ряде случаев можно считать положительным качеством.

Литература:

1. Бесконтактные вакуумные насосы: учебное пособие / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев; Федер. Агенство по образованию. Казан. гос. технол ун-т. – Казань: КГТУ, 2010. – 104 с.

2. Хабланян М.Х Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.1. Инженерно-физические основы: учеб. пособие / М.Х. Хабланян, Г.Л. Саксаганский, А.В. Бурмистров. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. - 237 с.

3. Вакуумная техника: Справочник / К.Е. Демихов, Ю.В. Панфилов, Н.К. Никулин и др.; под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 590 с., ил.

4. Бурмистров А.В. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: дис…докт.техн.наук / А. В. Бурмистров; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2006. - 363с.

5. Бурмистров А.В., Караблинов Д.Г., Бронштейн М.Д. Влияние геометрических параметров эллиптического профиля на характеристики двухроторных вакуумных насосов типа Рутс // Компрессорная техника и пневматика. – 2004. - № 6. - С. 38-40.

6. https://vacma.ru – АО «Вакууммаш» официальный сайт производителя вакуумного оборудования.

7. Пат. US007320579B2 United States, МПК F01C21/10, F03C2/00, F04C2/00. Roots type fluid machine [Текст] / T. Hirano, K. Yamada, T Fujii; заявитель и патентообладатель Kabushiki Kaisha Toyota Jidoshokki. - заявл. 8.12.06; опубл. 22.01.08.

УДК 66.021

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЕ ПОРИСТОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

Глотов А.А., Горячев Ю.В., Лаврентьев Д.Д.
Ангарский государственный технический университет,
E-mail: info@angtu.ru

Введение

Наиболее эффективным способом интенсификации теплообмена при кипении является применение пористых металлических покрытий. Пористая структура образуется либо в результате покрытия поверхности трубы тонкими металлическими сетками, либо напылением на нее металлического порошка определенной зернистости. Пористое покрытие служит дополнительной поверхностью, передавая тепло от трубки к жидкости. Пузырьки пара, образующиеся на поверхности трубки в глубине покрытия, дольше находятся в контакте с греющей поверхностью из–за сдерживающего воздействия пористого покрытия. Пузырек пара как бы прижат к порам покрытия к поверхности трубы. Когда же объем пузырька превышает объем ячейки поры, он вытесняется за пределы покрытия и отрывается, оставляя в поре покрытия паровой зародыш.

Математическая модель тепловых процессов.

Основой для составления математической модели является модель идеального вытеснения, осложненная процессами теплопередачи на развитой поверхности напыления.

В соответствии с тепловым балансом любого теплообменного процесса уравнение распределения для потоков:

$$Q_1 = \left(Q_2 - Q_2^{/}\right) + \left(Q_3 - Q_3^{/}\right) + Q_4 + Q_5 + Q_6 \qquad (1)$$

где Q_1 – тепло, накопленное потоком; Q_2 – тепло, поступившее за счет конвекции; $Q_2^{/}$ – тепло, ушедшее с конвективным потоком; Q_3 – тепло, поступившее за счет теплопроводности; $Q_3^{/}$ – тепло, ушедшее за счет теплопроводности; Q_4 – тепло внешнего источника; Q_5 – тепло фазовых превращений в потоке; Q_6 – тепло фазовых превращений в порах напыления.

На основе (1) можно получить уравнение распределения температуры по продольной координате для трубного потока

$$-\lambda_1 \frac{d^2 t_1}{dl^2} + \omega_1 \frac{dt_1}{dl} = \frac{\text{КП}\left(t_{cm} - t_1\right)}{\rho_1 c_{p1}} \qquad (2)$$

где t – температура трубной среды; t_{cm} – температура стенки трубы; ω – линейная скорость потока в трубах; λ – коэффициент теплопроводности потока; K –

коэффициент теплопередачи; S, $П$ – площадь и периметр нагреваемой поверхности; ρ_1, c_{p1}– плотность и теплоемкость среды.

Выражение (2) упрощается:

$$\omega_1 \frac{dt_1}{dl} = \frac{\text{КП}(t_{cm} - t_1)}{\rho_1 c_{p1}} \tag{3}$$

Для межтрубного потока уравнение распределения имеет более сложный вид за счет наличия фазовых превращений (конденсация паров потока). Таким образом, уравнение для межтрубного потока имеет вид:

$$\rho_2(t) c_{p2}(t) \omega_2 \frac{dt_2}{dl} + \omega_2 r_2 + \frac{\text{КП}}{S}(t_2 - t_{cm}) = 0 \tag{4}$$

где r – теплота конденсации потока; ω_2 – скорость потока.

В отличие от трубного потока $\rho_2(t) c_{p2}(t)$, где не предполагается изменения фазового состояния потока и изменением теплофизических свойств можно пренебречь, в межтрубном пространстве происходит конденсация паров, а следовательно и резкое изменение теплофизических свойств. В этом случае в модель (4) вводится зависимость свойств от температуры. Функции $\rho_2(t)$ и $c_{p2}(t)$ могут быть образованы полиномными функциями.

Выражения (3)-(4) представляют собой систему математического описания тепловых процессов в аппарате без напыления, которая дополняется комплексом начальных условий:

$$\begin{aligned} t_1(0) &= t_1, \\ t_2(0) &= t_2 \end{aligned} \tag{5}$$

В случае напыления выражение (4) заменяется:

$$\lambda_{эф} \frac{d^2 t}{dx^2} - \omega_н r \,|\, t \geq t_{кип} \tag{6}$$

где: $\lambda_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности; ω_i – скорость потока в порах напыления; $t_{кип}$ – температура кипения среды.

Кроме начальных условий (5) математическая модель дополняется комплексом граничных условий:

$$x = 0, \quad -\lambda'_{эф} \frac{dt_i}{dl} = \alpha'(t_i - t_{cm}) \tag{7}$$

$$x = X, \quad -\lambda'_{эф} \frac{dt_i}{dl} = q \tag{8}$$

где t_0 – температура в ядре потока; t^* – температура на границе раздела фаз; α' – коэффициент теплоотдачи от потока к материалу напыления; q – тепловой поток от материала к псевдогомогенному потоку в слое.

Согласно теории теплопроводности выражение (7) представляет граничное условие третьего рода. При этом выражение (7) определяет поведение

температурного поля на поверхности напыления. Выражение (7) определяет температурное поле на границе раздела теплообменной трубы и слоя напыления и представляет собой граничное условие второго рода.

Таким образом, математическая модель тепловых процессов в слое напыления (5) – (8) представляет собой граничную задачу.

С разработанной математической моделью проведен ряд численных экспериментов. На первом этапе проведен анализ теплофизических и гидродинамических параметров теплообменного аппарата в базовом варианте и с напыленным покрытием. Данные сравнительного анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1 Сравнение характеристик типового теплообменника с теплообменным аппаратом с напыленными поверхностями

Критерий	Вариант без напыления	Вариант с напылением
Критерий Рейнольдса для межтрубной среды Re_2	2339	3142
Критерий Рейнольдса для трубной среды Re_1	819	1066
Критерий Нуссельта для межтрубной среды Nu_2	43,82	65,20
Критерий Нуссельта для трубной среды Nu_1	6,93	91
Коэффициент теплоотдачи от межтрубной среды α_2	1083,12	4029,58
Коэффициент теплоотдачи от трубной среды α_1	214,21	2840,77
Коэффициент теплопередачи	171,9	784

Заключение

Таким образом, применение пористого покрытия на теплообменных поверхностях аппаратов существенно улучшает теплообменные и гидродинамические свойства аппарата. Так применение покрытия увеличивает коэффициент теплоотдачи межтрубной среды при различных режимах работы в 2,2 - 3,5 раз. Коэффициент теплопередачи в этом случае увеличивается приблизительно на 7-10%. Как следствие повышается КПД аппарата.

Литература:

1. Кустов Б.О., Бальчугов А.В. Анализ методов интенсификации теплообменных процессов в теплообменниках с подвижными элементами. Современные технологии и научно-технический прогресс. 2017. Т. 1. № 1. С. 43-44.

2. Дементьев А.И., Подоплелов Е.В., Соловьев А.Р. Метод создания металлизированных пористых покрытий на теплообменных поверхностях. Современные технологии и научно-технический прогресс. 2016. Т. 1. № 1. С. 7-8.

3. Дементьев А.И., Подоплелов Е.В. Исследование теплообмена на пористой структуре металлических покрытий // Сб. науч. трудов Ангарск. гос. техн. акад. Ангарск, 2014. Т. 1. С. 103-105.

4. Дементьев А.И., Подоплелов Е.В., Антонов Л.А.Математическое моделирование теплового процесса в металлизированном пористом слое. Современные технологии и научно-технический прогресс. 2015. Т. 1. № 1. С. 47-49.

5. Дементьев А.И., Подоплелов Е.В., Антонов Л.А., Корчевин Н.А. Математическая модель тепловых процессов в слое пористого металлического покрытия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск, 2014. № 2. С. 179-183.

6. Катц Н.В., Антошин Е.В, Вадивасов Д.Г., Вольперт Г.Д., Каминский Л.М. Металлизация распылением. – М.: Машиностроение, 1966. – 196 с.

7. Ульянов Б.А., Баденников В.Я., Ликучев В.Г. Процессы и аппараты химической технологии – Ангарск.: Изд. АГТА, 2006. 744 с.

УДК 621.52

СОПРЯЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ПАРОЭЖЕКЦИОННОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

Колмаков С.О., Осипов Э.В.
Казанский национальный исследовательский государственный университет,
E-mail: evosipov@kstu.ru

Задачей при расчете пароэжекторного насоса в данном случае является определение требуемого количества водяного пара, подаваемого в качестве рабочего агента в пароэжекторный насос, при заданных входных и выходных параметрах смеси.

Исходными параметрами смеси в нашем случае являлись: давления и температуры рабочего, инжектируемого, сжатого потоков; расход инжектируемого потока. В качестве инжектируемого агента выступает смесь, смеси легких углеводородов и водяного пара:

Определены термодинамические параметры потоков потоков: удельный объем, энтальпия и энтропия и критические скорости потоков. Далее расчет ведётся методом подекадных приближений. Первоначально принимается приведенная адиабатическая скорость смешанного потока в выходном сечении камеры смешения λ_{c3}. Определяется приведенная массовая скорость смешанного потока в выходном сечении камеры смешения q_{c3}, относительное давление в выходном сечении камеры смешения $П_{c3}$. Находится коэффициент эжекции при предельном режиме. [1, стр.8]

Далее определяется приведенная массовая скорость инжектируемого потока во входном сечении камеры смешения $q_{и2}$, а также $q_{и2}$, в которой участвует параметр $\lambda_{и2}$ – приведенная адиабатическая скорость инжектируемого потока во входном сечении камеры смешения. Значение $\lambda_{и2}$ подбирается таким образом, чтобы оба значения $q_{и2}$ были примерно равны, и их разница не превышала заданную степень точности. После определения $q_{и2}$ и $\lambda_{и2}$ находим относительное давление инжектируемого потока во входном сечении камеры смешения $П_{и2}$ и относительное давление смешанного потока во входном сечении камеры смешения $П_{c2}$.

Находятся коэффициенты скорости K_1 - K_4. И определяем значение коэффициента эжекции u.

Действительный коэффициент эжекции эжектора u не может превышать предельный коэффициент эжекции, а их разница не должна быть выше заданной степени точности. В случае невыполнения этого условия, расчет повторяется с изменением приведенной адиабатической скорости смешанного потока

в выходном сечении камеры смешения λ_{c3} до тех пор, пока условие не станет выполнимым.

По условию $G_р = G_с/(1+u)$ и $G_и = G_р*u$ находятся массовые расходы рабочего потока и инжектируемого. Таким образом, значение требуемого расхода водяного пара для получения выходных параметров 7732 Па и 139 ℃ составило 2658 кг/ч при входных параметрах рабочего потока 709275 Па и 220 ℃ и инжектируемого 3333 Па и 80 ℃.

Изменяя давление на выходе из насоса, можно получить следующие данные по изменению требуемого расхода рабочего потока:



Рисунок 1. Зависимость расход рабочего потока от давления смешанного потока

Определение температуры на выходе из конденсатора

Смешанный поток от пароэжекторного насоса попадает в конденсатор, где конденсация происходит в 2 этапа по зонам: в первой проходит переход перегретого водяного пара в насыщенное состояние и частичная конденсация остальных элементов смеси. Во 2 зоне в большей степени происходит конденсация водяного пара.

Так как водяной пар составляет более 90% от состава смеси, некоторые параметры принимались как для 100%-ого водяного пара без особого ущерба для расчета.

В данном расчете определяется такая температура на выходе из конденсатора, при которой площадь поверхности поверочного конденсатора 1200 КПГ-1,0-М1/20Г-6-Т-2-У-И ТУ 3612-023-00220302-01 будет использована максимально эффективно при данных исходных параметрах.

При помощи программного обеспечения ASPEN HYSYS V8.6 определяем температуры, при которых водяной пар в смеси будет в состоянии насыщения и при которой водяной пар будет конденсироваться.

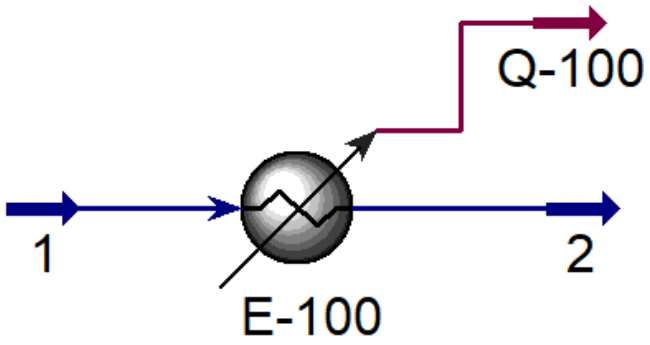


Рисунок 2. Схема конденсатора в программе HYSYS

Построенная схема в программе HYSYS позволяет определить доли отгона смеси в зависимости от температуры. Поток «1» является смешанным потом после пароэжекционного насоса с температурой 139 ℃. Изменяя температуру в потоке «2» получена зависимость, отображенная на графике ниже:

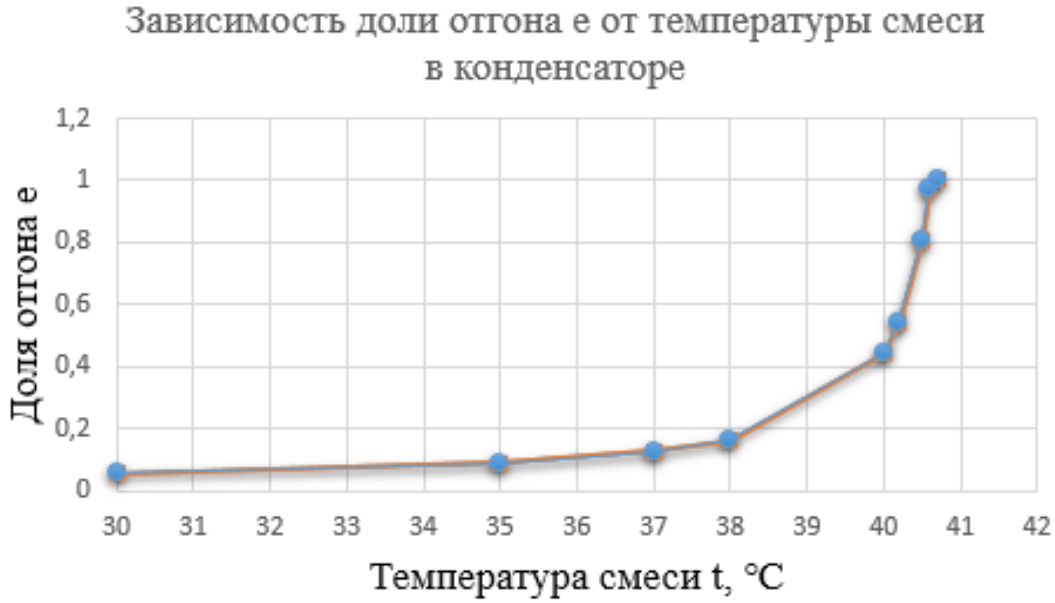


Рисунок 3. Зависимость доли отгона e от температуры смеси в конденсаторе

По данному графику видно, что конденсация смеси происходит при температуре ниже 40,7 ℃. А при температуре 38 ℃ будет сконденсировано более 80% смеси.

Для определения площади поверхности конденсатора приняты температуры в конце первой зоны 41,7 ℃, а на выходе с аппарата 39,5 ℃. Первостепенно определяются тепловые нагрузки по зонам конденсатора-холодильника по известным формулам. [2, стр. 133]

Значение тепловой нагрузки в первой зоне при переходе водяного пара из перегретого состояние в насыщенное составило 1691828 кДж/ч или 469952 Вт. Во второй зоне происходит непосредственная конденсация смеси и тепловая нагрузка составляет большее значение - 7596747 кДж/ч или 2110207 Вт. Общее значение тепловой нагрузки конденсатора-холодильника 9288575 кДж/ч или 2580159 Вт.

Так же для определения площади поверхности теплообмена нужно найти коэффициенты теплопередачи и температурные напоры по формулам Грасгофа в первой и во второй зонах. [2, стр.135].

В нашем случае $\Delta T_{ср}$ = 26,3 ℃ и k = 92,7 Вт/ (м^2*К) для первой зоны и $\Delta T_{ср}$ = 5,3 ℃ и k = 1901,4 Вт/ (м^2*К) для второй зоны конденсатора-холодильника. Тогда поверхность теплообмена аппарата по зонам составит [2, стр.144]: F_1 = 192,5 м^2 ; F_2 = 210 м^2 . А суммарная поверхность получится 403 м^2.



Рисунок 4. Зависимость поверхности теплообмена аппарата от температуры на выходе

Согласно выбранному ранее конденсатору 1200 КПГ-1,0-М1/20Г-6-Т-2-У-И, его поверхность теплообмена составляет 592 м^2. Таким образом, мы получили запас поверхности в размере (592-403)/592 = 0,319 или 31,9%. Это позволяет ещё снизить температуру и количество несконденсировавшегося продукта на выходе из аппарата. Такая зависимость наглядно видна на рис. 5. Температурой, при которой данный конденсатор будет эффективно работать, является 34,5℃. Доля отгона в таком случае по рис. 4 составит 0,1.

Уточненный расчет конденсаторов первой ступени и правильный выбор температуры конденсации позволяют не только снизить расход пара на вторую ступень, но и позволит добиться более высокой степени сжатия во второй

ступени, что позволит увеличить температуру конденсации смеси, отходящей на третью ступень.

Литература:

1. Р.Г. Акмен, А.П. Желтоноженко. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию «Расчет эжектора» для студентов специальностей 7.090510 «Теплоэнергетика» и 7.000008 «Энергетический менеджмент» / Сост. Р.Г. Акмен, А.П. Желтоноженко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 20 с. Рус. яз.

2. Кузнецов А. А., Кагерманов С. М., Судаков Е. Н. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности. Изд. 2-е, пер. и доп. Л., «Химия», 1974.

УДК 665.63

МОДЕРНИЗАЦИЯ БЛОКА СТАБИЛИЗАЦИИ РИФОРМАТА УСТАНОВКИ ЛФ 35/21-1000 «ЛУКОЙЛ НИЖЕГОРОДНЕФТЕОРГСИНТЕЗ»

Крыгина А.С., Большаков Д. Д., Емельянычева Е.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: annakrygina1999@gmail.com

Математическое моделирование таких процессов, как абсорбция и ректификация, с использованием специализированных программных пакетов широко распространено в проектирование и изучении процессов нефтепереработки. Математическое моделирование дает возможность исследовать производственный объект, в том числе с целью поиска оптимальных решений по интенсификации его работы и модернизации [1].

ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» — одно из крупнейших предприятий нефтепереработки в Российской Федерации, его установленная мощность оценивается в 17 млн тонн нефти в год – по данному показателю предприятие занимает первое место в ПАО «ЛУКОЙЛ».

Каталитический риформинг – крупнотоннажный процесс ароматизации бензина с целью повышения его октанового числа за счет увеличения содержания ароматики и парафиновых углеводородов изостроения. Процесс может проводиться в реакторах со стационарным слоем катализатора или с его непрерывной регенерацией и последующей стабилизации целевого продукта. На данный момент в Российской Федерации эксплуатируются порядка 66 установок риформинга, большая часть из них ориентирована на топливный вариант [2]. Практически каждый завод имеет одну или несколько установок каталитического риформинга в своей системе переработки.

Процесс риформирования, как правило, осуществляется в несколько стадий: гидроочищенное сырье после нагрева в теплообменниках и печах поступает в реакторный блок, где в среде водорода происходит ароматизация сырья. Далее, поток отправляют на разделение в блок сепарации и стабилизации.

Продуктами процесса риформинга с непрерывной регенерацией катализатора установки ЛФ 35/21-1000 являются: высокооктановый стабильный риформат, водородсодержащий газ и небольшое количество легких углеводородов.

Установка обладает достаточными возможностями для более полного удаления бензола, что может быть достигнуто с помощью способа, требующего модернизации блока стабилизации.

Выделение бензол содержащей фракции в блоке стабилизации может также осуществляться несколькими способами: боковым погоном в колонне

стабилизации, в дополнительно установленной колонне или выводиться верхним продуктом колонны стабилизации.

Первый способ, как правило, обеспечивает достаточную точность выделения бензол содержащей фракции, однако колонна стабилизации установки ЛФ 35/21-1000 не обладает необходимыми конструкционными особенностями для осуществления данного метода. Второй способ предполагает наибольшую четкость разделения бензола от стабильного риформата, данный метод подходит для выпуска извлеченного бензола в качестве товарного продукта. К недостаткам данного метода можно отнести большие капиталовложения и усложнение проведения процесса в блоке стабилизации. Третий способ, допустим при содержании бензола в риформате не более 1% об. [2], помимо этого он требует меньших капиталовложений, обладает гибкостью, сохраняет возможность перехода режима работы блока на прежний, но дает меньшую четкость разделения.

Для определения условий нормальной работы колонны стабилизации с учетом вывода БСФ была создана расчетная модель блока в среде HYSYS (Рис. 1).

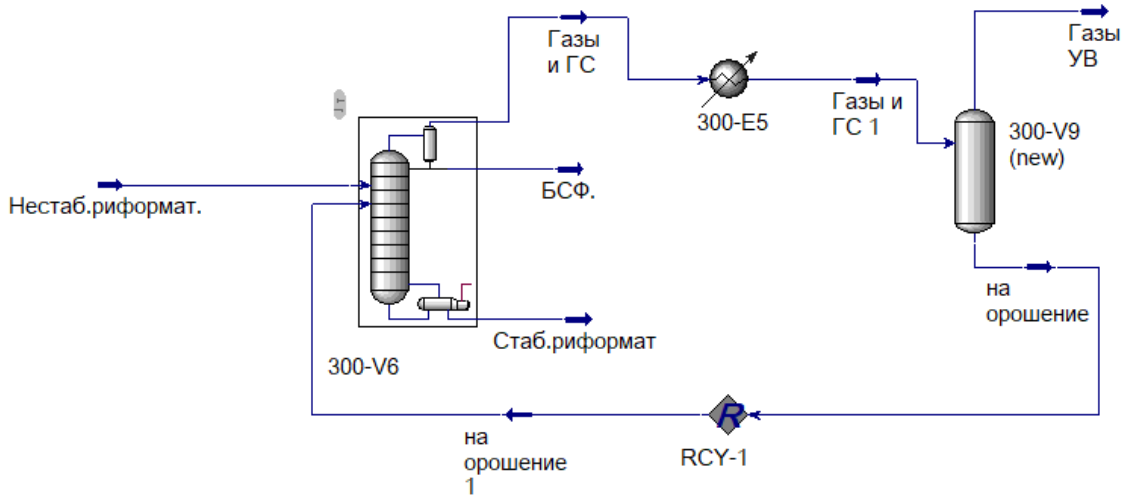


Рисунок 1 – Расчётная схема блока стабилизации

Для расчета колонны были заданы параметры входящего материального потока (состав, расход и двумя термодинамические параметры) и параметры колонны (число тарелок, тарелка питания, давления, дополнительная спецификация). Специализированное окно колонны, отражающее заданные параметры представлены на рис. 2.

Для расчета использовался нефтяной пакет и термодинамическая модель Peng-Robinson. Спецификация колонны представлена на рис. 3.

При расчёте дополнительно было применен теоретический блок рецикл «Recycle». Данный блок нужен для того, чтобы превратить замкнутую систему в разомкнутую, а также произвести расчет на месте разрыва. По схеме

сконденсированные продукты в сепараторе 300-V9 (new) направляются в колонну как дополнительно орошение.

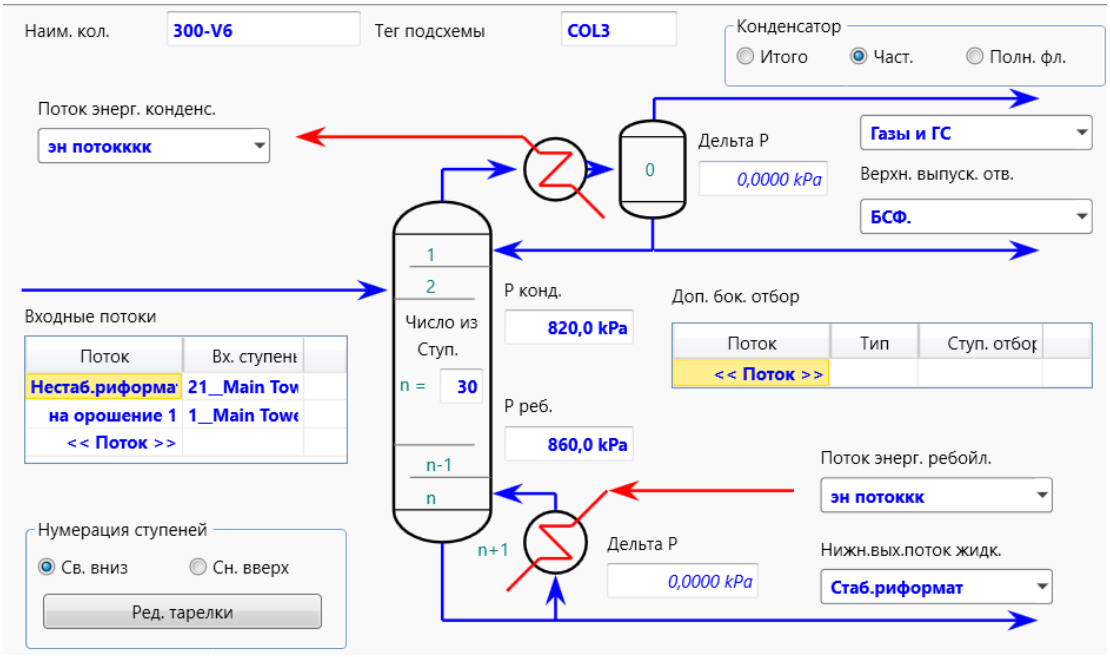


Рисунок 2 – Окно колонны 300-V6

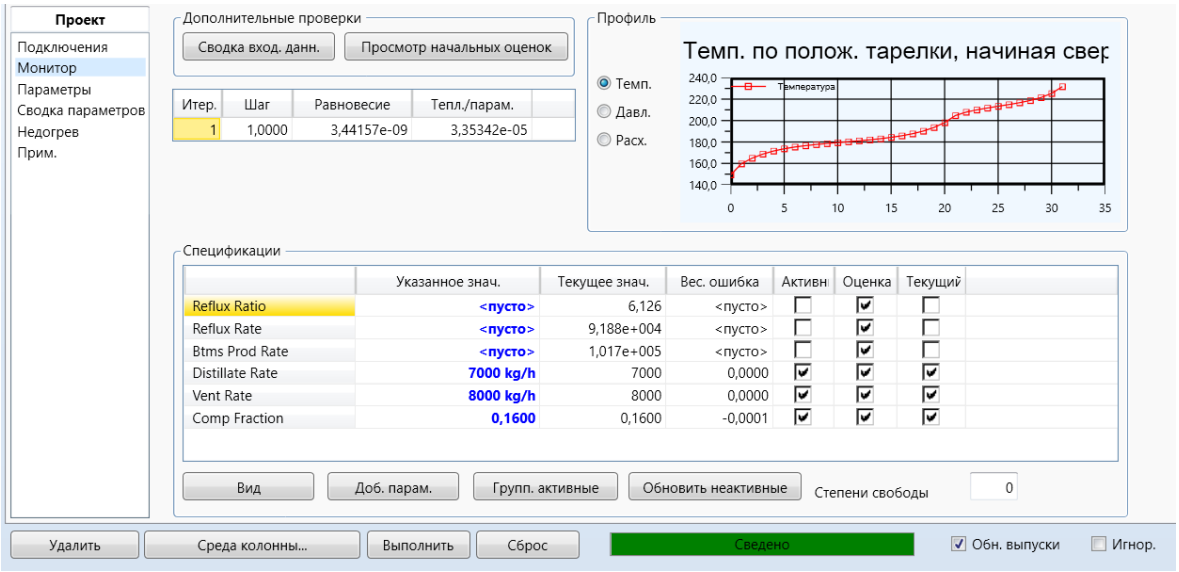


Рисунок 3 – Окно спецификаций колонны 300-V6

Общие показатели по всем потокам колонны приведены на рисунке 4.

То есть с учетом организации отбора БСФ выход риформата составил 88,51% масс. на сырье с содержанием бензола менее 0,53% масс., выход БСФ составил 6,09 % масс. на сырье с потенциальным содержанием бензола 16,0% масс.

Кроме бензола в БСФ также могут входить парафиновые углеводороды ряда гексана, гептана и их изомеры – ценное сырье процесса изомеризации.

Выделенная бензол-содержащая фракция (БСФ) сможет являться сырьем для установок изомеризации Пар-Изом или ПЕНЕКС, имеющихся в структуре предприятия.

УСЛОВИЯ					
Имя		Нестаб.Риформат. @Ма	на орошение 1 @Main	Стаб.Риформат. @Main	Газы и ГС @Main
Пар		0.0000	0.0000	0.0000	1.0000
Температура	(C)	42.7500 *	69.3698 *	231.7118	149.4160
Давление	(kPa)	840.0000 *	120.0000 *	860.0000	820.0000
Мольный расход	(kgmole/h)	1021.4872	20.7888 *	859.5140	101.5505
Масс. расход	(kg/h)	114937.4408 *	1802.9892	101740.4012	8000.0099
Станд. объем. расх. ид. жидк.	(m3/h)	154.1226	2.6150	134.5827	11.9736
Молярная энтальпия	(kJ/kgmole)	-2.401e+005	-1.811e+005	-1.966e+005	-1.270e+005
Молярная энтропия	(kJ/kgmole-C)	225.0	210.3	363.8	300.9
Тепловой поток	(kJ/h)	-2.4531e+08	-3.7641e+06	-1.6900e+08	-1.2896e+07
Имя		БСФ на изом. @Main	эн поток1 @Main	эн поток2 @Main	
Пар		0.0000	---	---	
Температура	(C)	149.4160	---	---	
Давление	(kPa)	820.0000	---	---	
Мольный расход	(kgmole/h)	81.2115	---	---	
Масс. расход	(kg/h)	7000.0188	---	---	
Станд. объем. расх. ид. жидк.	(m3/h)	10.1812	---	---	
Молярная энтальпия	(kJ/kgmole)	-1.619e+005	---	---	
Молярная энтропия	(kJ/kgmole-C)	257.7	---	---	
Тепловой поток	(kJ/h)	-1.3149e+07	7.5113e+07	2.1087e+07	

Рисунок 4 – Расчётные параметры потоков колонны 300-V6

Таким образом, в работе выполнено моделирование блока стабилизации секции риформирования бензинов установки риформинга ЛФ 35/21-1000 с выделением бензол-содержащей фракции в среде ASPEN HYSYS. Извлечения бензол-содержащей фракции из нестабильного риформата ведет к улучшению его экологических характеристик [3].

Литература:

1. Ермолаева В.А. Математическое моделирование ректификации многокомпонентной смеси / В.А. Ермолаева, Д. М. Николаева, Н. Г. Столетовых // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – №2. – 2019. – С. 35–39.

2. Ахметзянов Д.Р. Методы удаления бензола из катализата риформинга / Д. Р. Ахметзянов, М. С. Набиев, Н. Л. Солодова // Вестник технологического университета. – №8. – 2017. – С. 23–27.

3. Томин В.П. Анализ работы блока разделения стабильного катализата риформинга установки Л-35/11-1000 ОАО «АНХК / В.П. Томин, В.А. Микишев, Д.А. Цветков, Д.Н. Новичихин, В.И. Гурдин // Нефтепереработка и нефтехимия. – №5. – 2013. – С. 9–13.

УДК 66.021

ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА НА МАКЕТЕ МИНИ-ГРАДИРНИ

Лаптева Е.А., Окружнов В.А.
Казанский государственный энергетический университет,
E-mail: grivka100@mail.ru

В связи с повышением требований к эффективности теплообменных процессов при проектировании или модернизации промышленных аппаратов в различных отраслях промышленности и энергетики актуальными задачами продолжают оставаться исследования контактных устройств с интенсификаторами явлений переноса. Известны многие сотни разнообразных регулярных и хаотичных насадок [1-3], однако дискретно-шероховатые регулярные конструкции исследованы не достаточно полно, особенно для градирен.

Исследования процессов теплообмена производились на лабораторном макете насадочной колонны. Схема лабораторного макета приведена на рис. 1.

Макет насадочной колонны представляет собой аппарат (колонну) заполненный регулярной насадкой высотой 1000 мм. Исходная жидкость (вода) подается из бака-накопителя – 14 по трубопроводу насосом – 1 подается в теплообменник – 2, где подогревается до 30ºС. Расход воды измеряется ротаметром – 3, перепад давления в колонне измеряется – 4, температура термопарой – 5. Далее вода через распылительное устройство в виде душа – 6 поступает на слой регулярной насадки – 7 и в колонну – 9. Проходя через слой регулярной насадки происходит увеличение поверхности контакта фаз «жидкость-газ», в результате – интенсификация процессов массообмена. Измерение относительной влажности на входе и выходе из имеряется прибором – 8. Под регулярной насадкой установлена опорная решетка – 10. Воздух нагнетается воздуходувкой – 12 и поступает в колонну в противотоке с жидкостью. Вода движется вниз, смачивая насадку и образуя пленку на поверхности элементов. Воздух движется вверх между насадочными элементами, взаимодействуя с пленкой воды. Циркуляция жидкости является замкнутой и вода из колонны – 9 насосом – 13 подается в бак-накопитель – 14. В качестве загрузки применяется регулярная насадка в виде полимерных труб с постоянной дискретной шероховатостью и внешним диаметров 50 мм и высотой 1000 мм. Высота прямоугольных выступов 3,9 мм с шагом 2,5 мм и шириной 4,25 мм. Схема размещения насадки приведена на рис. 2.

В колонне размещается 10 труб. Удельная геометрическая поверхность насадки как для условно гладких труб при этом составляет 110,8 м^2/м^3. Удельный свободный объем $\varepsilon_{св}$=0,95. Эквивалентный диаметр $d_э$=0,034 м. ($d_э=4\varepsilon_{св}/a_v$). С учетом соприкосновения поверхности труб со стенкой колонны при плотной

упаковке, а также между собой удельная поверхность будет около 80 м^2/м^3, т.е. эта поверхность доступная для стекания пленки жидкости.

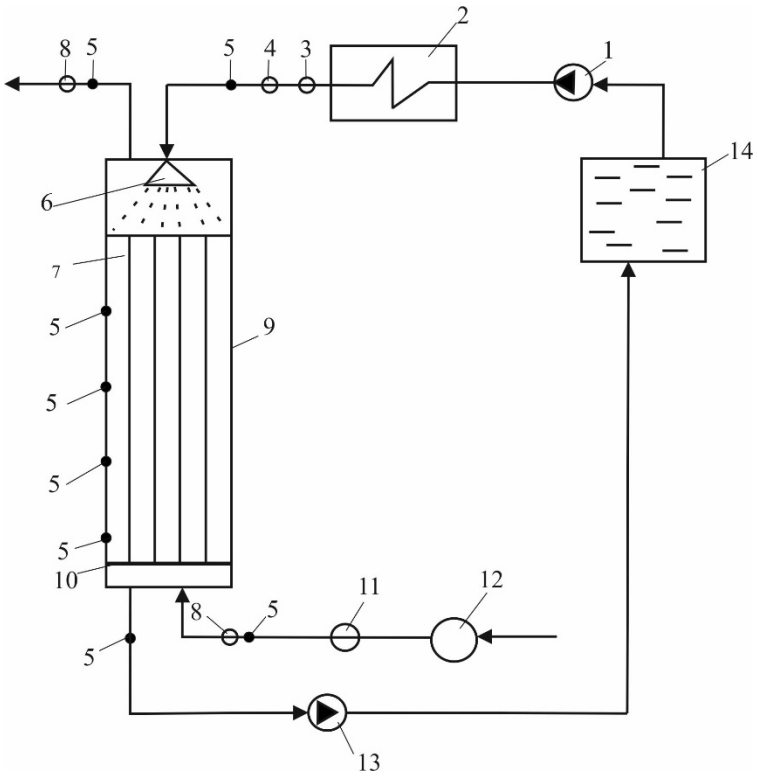


Рис. 1. Схема установки с насадочной колонной

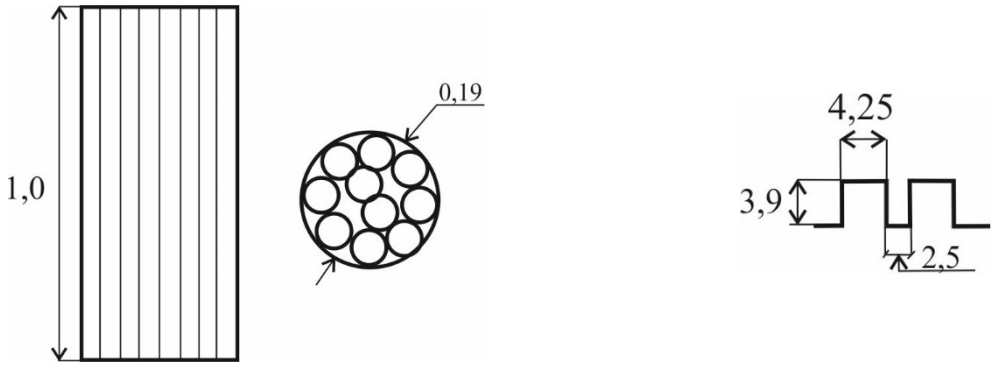
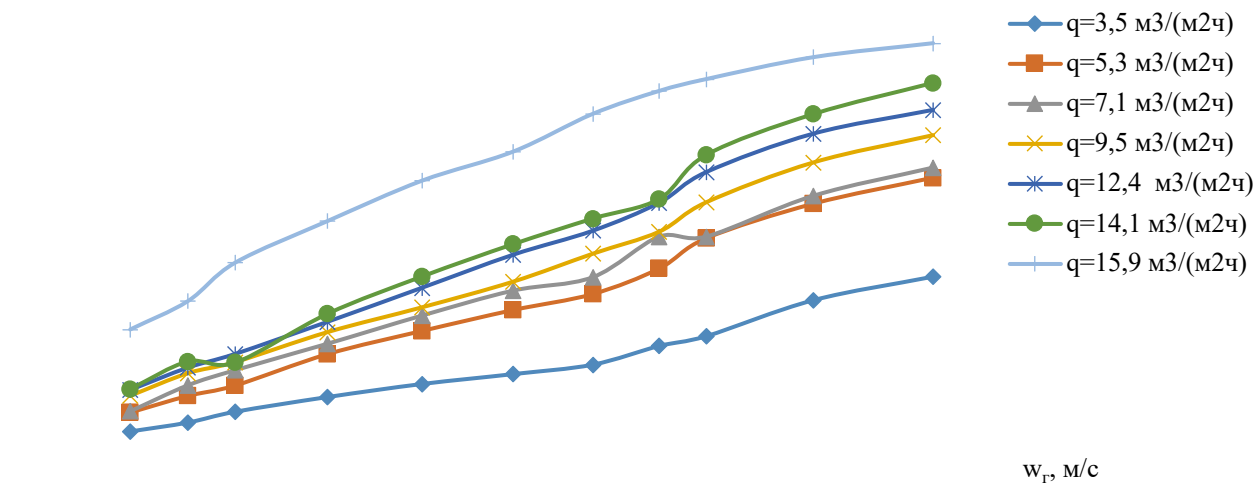


Рис. 2. Схема регулярной насадки

Эксперимент проводился при следующих исходных данных: $T_{жн}$≈30°С, $T_{гн}$≈20°С (температура жидкости и воздуха); при скорости газа $w_г$=0,4-2,4 м/с, плотности орошения $q_ж$=3,5=15,9 м^3/м^2 ч.

Таким образом, получены экспериментальные данные для регулярной насадки с поверхностными интенсификаторами показывают, что при плотности орошения 15,9 мм3/(м^2 ч) теплообмен наиболее эффективен.



Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №18-79-10136 https://rscf.ru/project/18-79-10136/

Литература:

1. Сокол Б.А., Чернышев А. К., Баранов Д. А. Насадки массообменных колонн: монография М.: «Галилея-принт», 2009. -358с.
2. Витковская Р.Ф., Пушков А. С., Шинкунас С. Аэродинамика и тепломассообмен насадочных аппаратов. Санкт – Петербург: Лань, 2019. -288 с.
3. Лаптев, А.Г., Ведьгаева И. А. Устройство и расчет промышленных градирен: – Казань: КГЭУ, 2004. –180 с.

УДК 544.344.013-14

АМИНОЭФИРЫ ОРТОФОСФОРНОЙ И БОРНОЙ КИСЛОТЫ КАК ЭКСТРАГЕНТ ДЛЯ ДЕГИДРАТАЦИИ ЭТАНОЛА

Мадаминов Н.В., Клинов А.В., Малыгин А.В., Хайруллина А.Р.,
Давлетбаева И.М., Сазонов О.О., Анашкин И.П.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: 32Red1@mail.ru

Введение

Спирты с малым содержанием воды широко используются в химической промышленности в качестве сырья для химического синтеза сложных и простых эфиров, а также в качестве растворителей, в производстве красок, косметики, аэрозолей, парфюмерии, лекарств, продуктов питания и еще во многих других областях. В настоящее время для разделения водно-спиртовых смесей часто используется метод экстрактивной ректификации. В этом случае отсутствуют многие недостатки, присущие азеотропной ректификации, поскольку отсутствует гетерогенное равновесие жидкость-жидкость, не образуются дополнительные азеотропы с добавлением азеотропного агента, и поэтому отсутствуют границы перегонки. Принцип экстрактивной ректификации основан на добавлении экстрагента в разделяемую смесь, который изменяет условия термодинамического равновесия пар-жидкость, обеспечивая, таким образом, повышение эффективности разделения исходной смеси или выделения из нее целевого компонента. В данном исследовании изучено использование аминоэфира борной кислоты (АЭБК) и аминоэфира ортофосфорной кислоты (АЭФК), на парожидкостное равновесие и использование его в качестве экстрагента при разделении водно-спиртовых смесей.

Фазовые равновесия пар-жидкость водного раствора этанола в присутствии аминоэфиров ортофосфорной и борной кислот

Для проведения экспериментальных исследований фазового равновесия пар–жидкость был выбран метод открытого испарения [1]. В сравнении с известными методами измерения равновесия он является менее трудоемким и достаточно быстро позволяет качественно и количественно оценить влияние добавления растворителей на условия фазового равновесия в азеотропной смеси в определенном интервале концентраций. В качестве экстрагента использовались аминоэфиры борной кислоты, синтезированные с использованием глицерина, диэтиленгликоля, триэтиленгликоля и полиэтиленгликоля [2] и аминоэфир ортофосфорной кислоты на основе глицерина, диэтиленгликоля, триэтиленгликоля и полиэтиленгликоля [3]. Процесс испарения осуществлялся непрерывно с последовательным отбором 6-8 порций дистиллята до достижения остаточного

содержания 1/10 части количества исходной водно-спиртовой смеси в кубе испарителя. Остаток куба взвешивали и определяли остаточное содержание воды. Полученные данные проверялись на соблюдение материального баланса, ошибка не превышала 1.5%.

На основании этих данных можно построить так называемые линии остаточных концентраций, которые представлены на рис. 1-2 для бинарного водного раствора этанола. Видно, что добавление экстрагента увеличивает относительную летучесть спирта, что приводит к его более быстрому истощению в кубе. Такое поведение линий открытого испарения является следствием исчезновения азеотропной точки для водного раствора этанола в присутствии экстрагента.

Для моделирования условий фазового равновесия в трехкомпонентной системе этанол-вода-АЭФК, АЭБК использовалась модель UNIFAC, в рамках которой коэффициенты активности рассчитываются по параметрам групповых составляющих молекул смеси. Молекулы АЭФК и АЭБК, синтезированные с различными гликолями и глицерином, будут отличаться только на количество однотипных групп, параметры которых можно определить на основе конкретных АЭФК и АЭБК, например ТЭГ и глицерина. В этом случае модель UNIFAC имеет перспективы предсказывать условия фазового равновесия в водноспортивных растворах с АЭФК различного молекулярного состава.

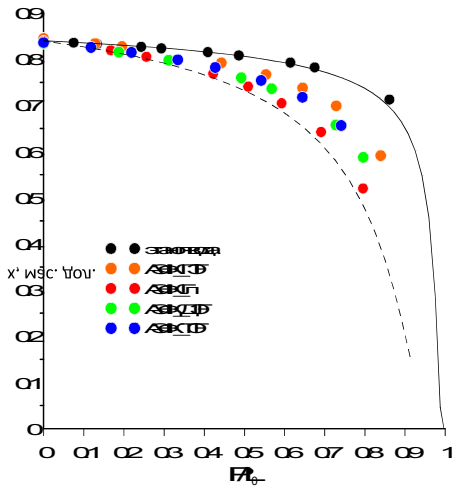


Рис. 1. Кривые остаточных концентраций для смеси этанол-вода АЭФК с различным строением при 60% масс., геометрические фигуры – экспериментальные данные, сплошная линия – расчет для бинарной смеси этанол-вода, пунктирная линия – расчет для смеси этанол-вода-АЭФК_ГЛ

Проверка адекватности описания равновесия пар-жидкость водно-спиртовых растворов в присутствии экстрагента проводилась путем сравнения расчетных и экспериментальных данных по открытому испарению. Кривые остаточных

концентраций рассчитывались по уравнению открытого испарения (уравнение Рэлея) бинарной смеси:

$$y(x)^* = \frac{dx}{dln(L)} + x$$

где x и L – состав и масса кипящей смеси; y(x)* – равновесный состав пара, который определялся на основе модели UNIFAC.

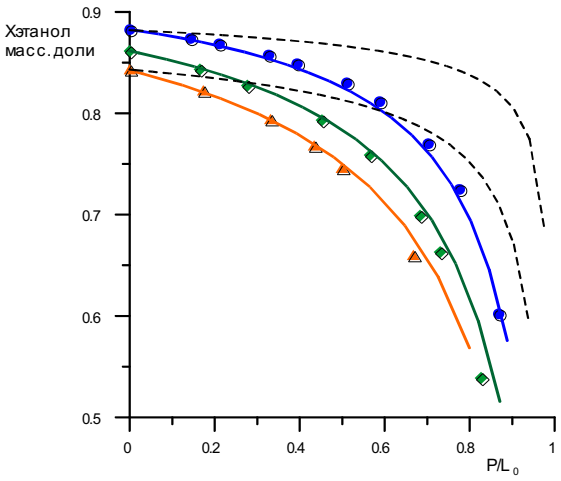


Рис. 2. Кривые остаточных концентраций для смеси этанол-вода АЭБК-ТЭГ Геометрические фигуры – эксперимент (круги-20% масс АЭБК-ТЭГ, ромбы-40% масс АЭБК-ТЭГ, треугольники-60% масс АЭБК-ТЭГ), непрерывные линии-расчет, пунктирные линии расчет без АЭБК

Для сравнения эффективности АЭФК и АЭБК как экстрактивного агента с различным строением удобно использовать изменение относительной летучести этанола в водном растворе в азеотропной точке:

$$\alpha_{12} = \frac{\frac{y_1}{x_1}}{\frac{y_2}{x_2}}$$

где y_1, y_2 равновесная концентрация этанола и воды в паре над бинарным раствором определялась по модели UNIFAC;x_1, x_2 –концентрации этанола и воды в растворе. На рис. 3 представлены результаты сравнения коэффициента относительной летучести этанола в водном растворе в азеотропной точке при добавлении АЭФК и АЭБК различного строения и основных промышленных экстрагентов пропиленгликоля, и глицерина. Результаты расчетов свидетельствуют об эффективности экстрагента АЭФК для обезвоживания смеси этанол-вода

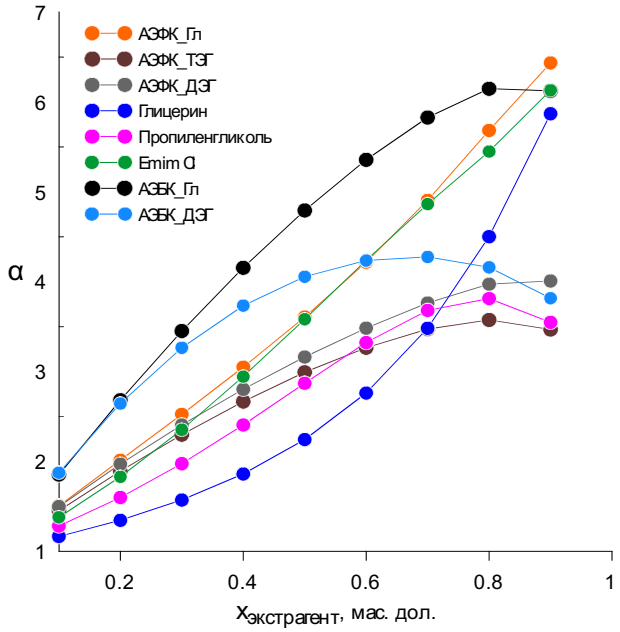


Рис. 3. Изменение коэффициента относительной летучести в зависимости от концентрации экстрагента в азеотропной точке смеси этанол-вода

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00315-20-01 «Энергосберегающие процессы разделения жидких смесей для регенерации промышленных растворителей».

Литература:

1. Gmehling. J. Chemical Thermodynamics for Process Simulation / J. Gmehling. M. Kleiber. B. Kolbe. J. Rarey. - WILEY-VCH. 2019. 808p.

2. Давлетбаев Р. С., Емелина О. Ю., Давлетбаева И. М., Гумеров А. М. Комплексы аминоэфиров борной кислоты в качестве модификаторов полидиметилсилоксанов // Вестник Казанского техн. университета. 2012.

3. Organophosphorus Polyurethane Ionomers as Water Vapor Permeable and Pervaporation Membranes. Polymers 2021, 13(9), 1442;

4. A.V. Klinov, A.V. Malygin, A.R. Khairullina, S.E. Dulmaev, I.M. Davletbaeva. Alcohols dehydration by extractive distillation with use of aminoethers of boric acid. Processes 2020, 8(11), 1466

УДК 66.048.3

ЭКСТРАКТИВНАЯ РЕКТИФИКАЦИЯ ВОДНОГО РАСТВОРА ЭТАНОЛА С ПОМОЩЬЮ АМИНОЭФИРОВ ОРТОФОСФОРНОЙ И БОРНОЙ КИСЛОТЫ

Мадаминов Н.В., Клинов А.В., Малыгин А.В., Хайруллина А.Р.,
Давлетбаева И.М., Сазонов О.О., Анашкин И.П.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: 32Red1@mail.ru

Введение

Азеотропные смеси — это многокомпонентные гомогенные смеси веществ, характеризующиеся равенством составов равновесных жидкой или газовой фаз при данном давлении. Наличие азеотропных смесей существенно затрудняет разделение жидких смесей и требует применения специальных методов ректификации. Известно около 10 тыс. систем с азеотропными смесями, что составляет примерно половину всех изученных смесей. Поэтому изучение свойств систем с азеотропизмом необходимо для построения общего учения о фазовых равновесиях и критическом состоянии. Такие сведения особенно важны для химических и нефтехимических отраслей промышленности, поскольку в их исходных материалах, промежуточных или конечных продуктах почти всегда имеются системы с азеотропными смесями. В качестве экстрагента в работе использовался аминоэфир борной кислоты (АЭБК), получаемый на основе борной кислоты, триэтаноламина [1] и триэтиленгликоля и аминоэфир ортофосфорной кислоты (АЭФК) на основе глицерина, диэтиленгликоля, триэтиленгликоля и полиэтиленгликоля [2] содержание воды в АЭБК И АЭФК не превышало 1%.

Экстрактивная ректификация смеси этанол-вода с использовнием АЭФК И АЭБК

Для проведения экспериментальных исследований экстрактивной ректификации смеси этанол-вода с разделяющими агентами АЭБК и АЭФК использовалась ректификационная установка периодического действия представленная на рис. 1.

Общий объем заливаемой в установку водно-спиртовой смеси составлял около 3 л, составом 20%масс этанола. Эксперименты проводились при бесконечном флегмовом числе. Количество тепла, подводимого к кубу, выбиралось из условия устойчивой работы насадочной части колонны в пленочном режиме. Наступление стационарного режима работы ректификационной установки фиксировалось по постоянным значениям температур куба и паров дистиллята. Затем проводился отбор проб кубовой жидкости и флегмы и измерялся их состав. В дальнейших экспериментах с экстрагентом его подача осуществлялась после

установления стационарного режима в колонне. Отбор проб осуществлялся только в дистилляте через каждые 5 минут с момента начала подачи экстрагента.

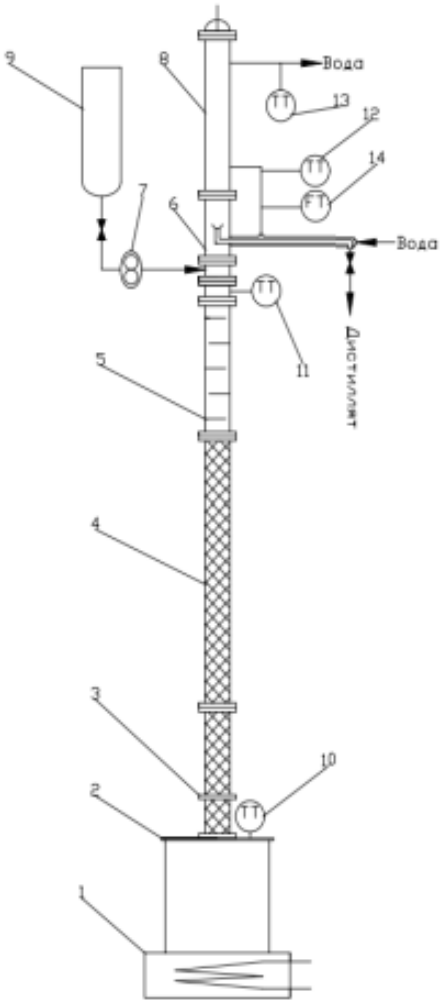


Рисунок 1– Схема экспериментальной колонны: 1 – электронагреватель 2 – куб-испаритель. 3 – диоптр с насадкой. 4 – царга с насадкой. 5 – царга с тарелками. 6 – узел отбора. 7 – шестеренчатый насос. 8 – конденсатор. 9 – бак с экстрагентом. 10 – датчик температуры куба, 11 – датчик температуры паров дистиллята, 12, 13 – датчики температуры охлаждающей воды, 14 – датчик расхода охлаждающей воды

Условия проведения эксперимента и результаты представлены в табл. 1,2,3. По результатам нескольких подобных измерений было определено, что контактная часть колоны содержит число теоретических тарелок в промежутке от 8 до 9. Для описания условий фазового равновесия пар-жидкость использовалась модель UNIFAC.

Таблица 1 Условия эксперимента

Мощность нагрева, кВт	1.5
Массовый % воды в экстрагенте, %	Не более 1
Расход флегмы, г/с	0.94
Расход экстрагента, г/с	0.55
Массовые % воды в кубе до подачи экстрагента, %	89.01
Массовые % воды в дистилляте до подачи экстрагента, %	6.75

Таблица 2 Зависимость массовой доли воды в дистилляте от времени с начала подачи экстрагента АЭФК

Время с начала подачи экстрагента, мин	состав дистиллята, %масс воды		
	Экспериментальные данные	Результаты моделирования	
		6 тарелок	5 тарелок
15	1.5824	0.790917	1.89509
20	1.3593	0.776604	1.93154
25	1.3078	0.787	1.97293
30	1.2963	0.800911	2.01389
35	1.2784	0.815832	2.05232
40	1.2574	0.829021	2.08367
45	1.2762	0.837874	2.11209
50	1.2636	0.848029	2.13466
55	1.2734	0.855868	2.15442

Таблица 3 Зависимость массовой доли воды в дистилляте от времени с начала подачи экстрагента АЭБК

Время с начала подачи экстрагента, мин	состав дистиллята, %масс воды	
	Экспериментальные данные	Результаты моделирования
		7 тарелок
10	1,1532	1,6209

15	0.5964	1,1018
20	0,5268	0,8411

Результаты эксперимента показывают, что в дистилляте содержание воды оказывается существенно меньше ее концентрации в азеотропной точке. Учитывая небольшое число теоретических тарелок в колонне и соотношение экстрагент – разделяемая смесь 0.5:1, можно сделать вывод о высокой разделительной эффективности АЭФК-Гл.

Для условий эксперимента было проведено моделирование с использованием ChemCad 6.5. Добавление АЭФК в колонну приводило к увеличению расхода жидкой фазы и изменяло ее свойства (вязкость, коэффициенты диффузии и т.д.), что могло влиять на кинетику массопереноса в жидкой смеси, поэтому при моделировании число теоретических тарелок подбиралось из условия наилучшего совпадения рассчитанных и экспериментальных данных.

Было определено, что удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных данных наблюдается при 5,5 для АЭФК, а для АЭФК 7 теоретических тарелках. Таким образом, добавление экстрагента привело к уменьшению теоретических тарелок или снижению эффективности разделения за счет изменения кинетики процесса массопереноса в жидкой фазе на 35%. Такое заметное изменение числа теоретических тарелок может быть связано не только с изменением свойств жидкой фазы, но и возможным не удовлетворительным смешением экстрагента с флегмой на верхней тарелке. Таким образом есть возможность повысить эффективность процесса установкой смесительного устройства на подаче экстрагента.

Исследование выполнено при финансовой под держке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00315-20-01 «Энергосберегающие процессы разделения жидких смесей для регенерации промышленных растворителей».

Литература:

1. Давлетбаев Р. С., Емелина О. Ю., Давлетбаева И. М., Гумеров А. М. Комплексы аминоэфиров борной кислоты в качестве модификаторов полидиметилсилоксанов // Вестник Казанского техн. университета. 2012.

2. Organophosphorus Polyurethane Ionomers as Water Vapor Permeable and Pervaporation Membranes. Polymers 2021, 13(9), 1442;

3. A.V. Klinov, A.V. Malygin, A.R. Khairullina, S.E. Dulmaev, I.M. Davletbaeva. Alcohols dehydration by extractive distillation with use of aminoethers of boric acid. Processes 2020, 8(11), 1466

УДК 532.5.032

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ НЕРЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКИ С ИСКУССТВЕННОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ

Маряхин Н.Н., Кузнецов В.А., Карпеев С.В., Харитонова О.С.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: os_kharitonova@mail.ru

Аппараты для тепло-, массообменных процессов должны быть спроектированы так, чтобы они имели максимальную контактную поверхность. Тщательный обзор литературы показывает, что были проведены обширные исследования гидродинамики в колоннах с насадкой с использованием моделей турбулентности [1-4]. Можно отметить, что на выбор модели турбулентности влияет количество фаз, тип жидкости, диапазон чисел Рейнольдса и тип упаковки. Таким образом, сравнение моделей турбулентности для выбора подходящей модели имеет большое значение для лучшего прогнозирования структуры потоков.

Насадочные колонны применяют в современной химической, нефтехимической, нефтегазовой и других отраслях промышленности, а также для процессов охлаждения и разделения жидких и газовых смесей[5,6]. Характерной особенностью аппаратов с насадкой с регулярной шероховатостью является их универсальность, простая конструкция, малый перепад давления и высокая эффективность, эти аппараты одинаково хорошо применять в абсорбции, перегонке, конденсации, контактном охлаждении, и как газопылеуловители. Основное применение этих устройств находят в химическом машиностроении и переработки, где большие объемы газовых выбросов и процессов газоочистки требуют большого количества перекачки жидкости. Цель работы - исследование гидродинамических характеристик аппаратов с насадкой с регулярной шероховатостью, для получения зависимостей для расчета коэффициентов гидравлического сопротивления

Известно, что обтекание твердых тел потоком газа (жидкости) сопровождается образованием и распространением вихрей. Для сферических тел возникающие и разрушающиеся тороидальные вихри симметричны. Для призматических тел (цилиндры, пластины) вихри возникают попеременно то с одной стороны тела, то с другой, и их срыв происходит несимметрично. Установив обтекаемые тела в качестве элементов, упакованных в массообменные аппараты, можно добиться такого расположения элементов в вертикальном направлении насадки, в результате чего возникает одновременный или общий режим вихреобразования. Этот режим характеризуется большими энергозатратами и, следовательно, высокой эффективностью. При течении жидкости вдоль ряда твердых тел, расположенных рядом, существует некоторое критическое расстояние между

обтекаемыми телами, превышение которого приводит к образованию вихрей с частотой, зависящей от размеров обтекаемых тел. Чем меньше зазор, тем больше частота схода и образования вихрей. Увеличение количества вихрей, образующихся при малых значениях расхода, способствует тому, что более высокая эффективность может быть достигнута при более низких затратах энергии.

Экспериментальные данные гидродинамических и кинетических характеристик насадки «Инжехим» получены в лабораторных условиях. В ряду насадок, выпускаемых ООО ИВЦ “Инжехим”, отсутствовала насадка со средним эквивалентным диаметром (0.01 – 0.03 м), которая могла бы быть использована в колоннах среднего диаметра.

Поэтому была разработана новая насадка «Инжехим» с $d_э = 0.025$ м, которая, с учетом проведенных ранее исследований, была выполнена с регулярной шероховатостью (рис.1).



Рис. 1 – Насадка ‘‘Инжехим’’

Гидродинамические исследования данной насадки проводились в колонне диаметром 400 мм.

Таблица 1 – Геометрические характеристики насадки ‘‘Инжехим’’

Характеристика насадки	Значение
материал насадки	листовая сталь 0.25 мм
размер элемента	25 х 25 х 1 мм
удельная поверхность, **a**	190 $м^2/м^3$
удельный свободный объем **ε**	0.605 $м^3/м^3$
количество элементов в 1 $м^3$ **N**	50600 шт./$м^3$
эквивалентный диаметр $d_э$	0.025 м

Высота слоя насадки составляла 0.25 м.

Данные по перепаду давления при разных скоростях воздуха и плотностях орошения на Рис. 2-4.

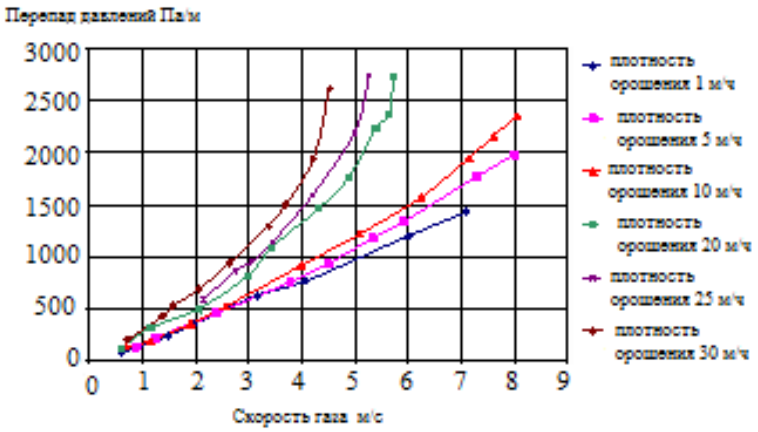


Рис. 2. – Гидравлическое сопротивление слоя насадки в зависимости от фиктивной скорости газа и плотности орошения.

Таким образом, мы пришли к выводу, что разработанная насадка может быть рекомендована для использования в массообменных аппаратах при проведении процессов разделения при высоких нагрузках по газовой фазе (скорость газа выше 3 м/с) и средней плотности орошения (до 30 м/ч).

Полученные результаты являются основой для системы автоматического управления гидродинамическими режимами работы насадочных колонн селективной очистки газовых выбросов, позволяющая автоматически регулировать режимы работы аппарата.

Литература:

1. Пат. Россия RU 2290992 C1 (2007)

2. Пат. Россия RU 32707 U1 (2003)

3. Billet R. Packed towers in processing and environmental technology. VCH. , New York, 1995. - 480p.

4. Eckert J.S. Chem. Eng. Progr. 1961. V. 57. № 9, p. 54–58.

5. Зиннатуллина Г.Н., Давыдов А.В., Бронская В.В., Зиннатуллин Н.Х. Расчет основных технологических параметров ценробежных пленочных тепло-и массообменных аппаратов. Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 3. С. 89-92.

6. Давыдов А.В., Бронская В.В., Зиннатуллин Н.Х.Гидродинамика тонкопленочного центробежного теплообменника. Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 23. С. 145-14

УДК 662.76

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ БЛОКА РЕКТИФИКАЦИИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ

Минныразиев Р.И., Хоменко А.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: razil10x_m4a1@mail.ru

Химическая промышленность является крупнейшим потребителем энергии. На ее нужды тратится около 15 % всех энергоресурсов страны. В то же время полезное использование энергии в химической промышленности не превышает 35% [1,2].

Энергосбережение в настоящее время является одной из приоритетных задач эффективного развития промышленности. Поскольку процессы ректификации очень энергоемкие и наиболее распространенные массообменные процессы в химической технологии, то их энергоэффективность часто определяет экономику производства в целом.

Ректификация является одним из основных процессов химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и смежных отраслей промышленности. На долю ее приходятся громадные капиталовложения и энергозатраты. В то же время ректификация имеет один из наиболее низких энергетический КПД среди всех процессов химической технологии [4]. Поэтому рациональное аппаратурное оформление процессов ректификации и снижение затрат энергии на их осуществление является актуальной задачей.

Важным этапом в проектировании оптимальных схем разделения является моделирования процесса ректификации и определение оптимальных параметров моделей. Расчет процесса ректификации основан на расчете парожидкостного равновесия разделяемой смеси. В литературе известно много моделей позволяющих делать это. Однако все подобные модели требуют знания точного состава смеси и свойств компонентов.

При ректификации сложных смесей с не идентифицированными компонентами возникают большие проблемы с описанием парожидкостного равновесия и, как следствие, с термодинамическим расчетом отдельных колонн и системы в целом. Поиск путей расчета ректификации смесей с ограниченными сведениями о составах и парожидкостном равновесии представляет большой практический интерес.

В литературе описано большое количество способов сокращения расходов тепла в процессах ректификации. Выбор того или другого способа энергосбережения возможен только после их детального анализа применительно к конкретной колонне и установке. В этой связи проблема энергосбережения неразрывно

связанна с изучением методик анализа химико-технологических систем. Использование их позволяет достичь главной цели - максимального снижения потребления энергоресурсов при сохранении или увеличении выработки продукции заданного вида и качества.

По литературным данным все способы энергосбережения разделить на два вида. Первый вид методов экономии тепла связан с изменением режима работы и управления аппаратами, а также с повышением эффективности работы отдельных колонны. Второй вид способов связан с изменением схемы установок ректификации. Второй подход требует определенных капиталовложений. Однако как правило, эффект от реализации оказывается положительным [5,6].

Объектом исследования является блок деэтанизации который входит в состав установки ГФУ-300, находящийся в г. Альметьевске Управления «татнефтегазопереработка». Этот блок предназначен для извлечения этана из широкой фракции легких углеводородов (ШФЛУ). Принципиальная технологическая схема рассматриваемого блока представлена на рис. 1.

Одним из способов сокращения расхода тепла на ректификацию является определение оптимальных параметров процесса [3]. Для того чтобы решить вопрос об оптимальных условиях проведения процесса, должен быть сформулирован критерий оптимальности, который принимает экспериментальные значения. В противном случае следует говорить о более или менее выгодных условиях работы установки. Рассмотрим несколько методов по уменьшению энергозатрат, для достижения оптимальной работы блока.

1. Оптимальное флегмовое число.

Одной из важных характеристик процесса ректификации является флегмовое число R. От величины R в той или иной степени зависят все параметры колонны: ее высота, диаметр, количество контактных элементов, эффективность их работы, потребление энергии.

Существует обратная связь между числом единиц переноса (ЧЕП) и флегмовым числом. Чем больше R, тем меньше значение ЧЕП, а значит, требуется меньше контактных устройств для достижения заданной степени разделения. Однако увеличение флегмвого числа приведет к увеличению расхода жидкости по колонне. В конечном итоге для работы колонны потребуется большее количество тепла [6].

Вопрос о выборе рабочего флегмового числа решается путем нахождения его оптимального значения ($R_{ОПТ}$). При $R_{()nT}$ имеет место компромисс между количеством контактных устройств (размером колонны) и потреблением тепла.

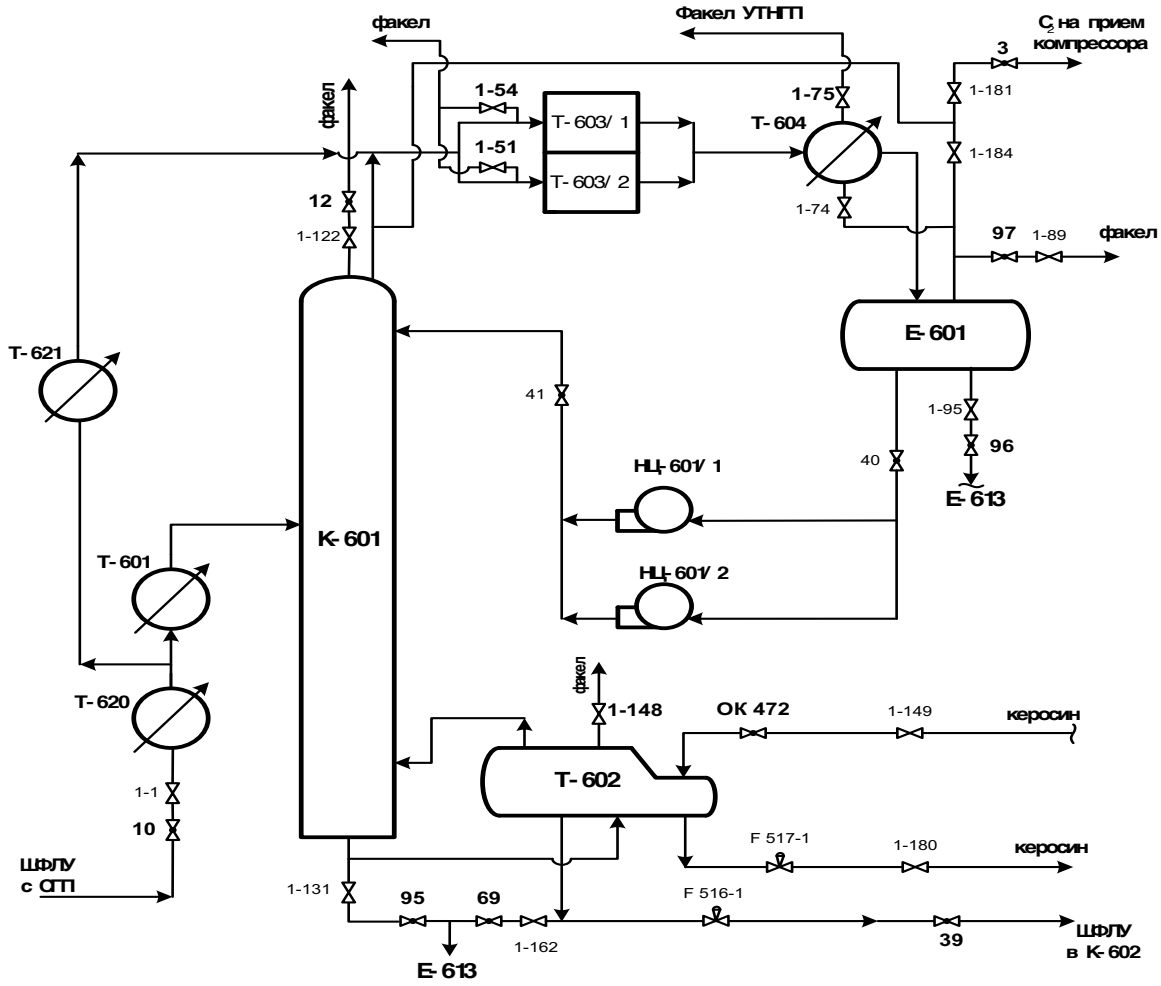


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема блока деэтанизации. К-601 – ректификационная колонна (деэтанизатор); Е-601 – рефлюксная емкость; Т-602 – испаритель; Т-601 – теплообменник сдвоенный; Т-620, Т-621,Т-604 – теплообменник; Т-603 – аппарат воздушного охлаждения; НЦ-601 – насос орошения

Существует несколько методов нахождения $R_{ОПТ}$. В [7, 8] рекомендуется выбирать рабочее флегмовое число в соответствии с формулой:

$$R = 1{,}3 \cdot R_{МИН} + 0{,}3 \qquad (1.1)$$

где $R_{МИН}$ - минимальное флегмовое число.

В [9] оптимальное значение флегмового числа определяется путем нахождения минимального значения критериев:

$$n_{ТС}\,(R + l) \quad \text{или} \quad N_{ОГ} \cdot (R + l) \qquad (1.2)$$

где $N_{ОГ}$ - число единиц переноса; $n_{ТС}$ - число теоретических ступеней.

Критерии (1.2) косвенно характеризуют как эксплуатационные затраты, так и капитальные вложения. В них $N_{ОГ}$ или $n_{ТС}$. характеризуют размеры колонны

(капитальные вложения), а (R+1) потребление тепла (эксплуатационные затраты).

Указанные выше методы по определению коэффициента избытка флегмы слишком приближенны и не отвечают требованиям энергосбережения в процессах ректификации. Лучшим критерием оптимальности следует считать экономический, а именно приведенные затраты [4].

2. Оптимальные давление и температура колонны.

От условий проведения процесса ректификации - давления Р и температуры Т

зависят все основные показатели, в том числе и расход энергии. Поэтому выбор наиболее выгодных условий входит в рамки проблемы энергосбережения.

Понижение температуры и давления вызывает, как правило, увеличение относительной летучести, которое, в свою, очередь, позволяет сократить потребности в орошении. Это приводит к уменьшению расхода энергии [6]. Кроме того, понижение температуры позволяет использовать для обогрева испарителя теплоноситель с более низким температурным потенциалом, а, следовательно, и более дешевый. Однако для охлаждения конденсатора теперь потребуется хладагент с более низкой температурой, что в ряде случаев может сделать понижение давления и температуры нецелесообразным [4,6].

В большинстве случаев уменьшение давления и температуры ведет к росту движущей силы процессов массообмена. Однако эти параметры влияют не только на парожидкостное равновесие. От их значений существенно зависит гидродинамика и кинетика массообмена, которые, в свою очередь, определяют гидравлическое сопротивление аппарата (ΔР) и высоту единиц переноса (ВЕП) [6].

В [7] указывается, что пропускная способность тарельчатых колонн пропорциональна давлению в степени 0,5. Это значит, что при понижении давления потребуется колонна большего диаметра. С понижением давления в тарельсатых колоннах наблюдается увеличение гидравлических потерь ΔР. Все сказанное, правда в меньшей степени, имеет место и при использовании насадочных аппаратов [6].

Следует учитывать тот факт, что изменение давления и температуры поразному влияет на коэффициенты массоотдачи в паровой и жидкой фазах. Если большая часть сопротивления массообмену сосредоточена на стороне жидкой фазы, то понижение температуры приводит к снижению скорости массообмена вследствие снижения коэффициентов диффузии и возрастания вязкости жидкой фазы. Если основное сопротивление массообмену сосредоточено на стороне паровой фазы, то влияние давления и температуры противоположно [6].

Поэтому, в каждом конкретном случае следует учитывать сложное влияние давления и температуры на протекание процессов разделения. В некоторых случаях
эта зависимость имеет экстремальный характер и проходит через максимум.

Сложность выбора условий ректификации очевидна. Задача относится к нахождению оптимума, при котором колонна без ущерба для ее разделяющей способности будет иметь низкое энергопотребление. Во многих случаях эта задача решается экспериментальным путем [6].

Выбор оптимальных условий работы колонны еще более усложняется необходимостью комплексного анализа, учитывающего связи её с другими узлами технологического процесса [4]. В этом случае неэффективная работа одной колонны может быть оправданна при анализе всего комплекса.

3. Установка дополнительных или более эффективных контактных устройств

Уменьшение потребления энергии ректификационной колонной можно достичь увеличением числа контактных устройств и повышением их эффективности. Установка большего количества и более эффективных контактных устройств приведет к увеличению разделяющей способности колонны. В этом случае продукты заданной чистоты можно получать при меньшем расходе орошения, а это, в свою очередь, ведет к экономии энергии [4].

Однако установка большего количества контактных устройств ведет к увеличение перепада давления и температур между верхом и низом колонны (ΔP) из-за увеличения гидравлического сопротивления. Это, в свою очередь, может потребовать более дорогих теплоносителей для испарителя и конденсатора колонны [7].

Целесообразность установки дополнительных и более эффективных кон-
тактных устройств определяется на основе анализа рентабельности данной реконструкции. В этом случае приходится пересчитывать колонну как новую.

4. Энергосберегающие схемы ректификации.

Уменьшение энергозатрат на разделение может быть достигнуто применением рекуперации тепла, смешением потоков, использованием схем со связанными и частично связанными тепловыми потоками, а также схем с разделяющими агентами.

Уменьшение энергозатрат достигается за счет некоторого усложнения разделительного процесса, увеличения числа аппаратов и усложнения схем регулирования.

Литература:

1. Лейтес И.Л., Сосна М.Х., Семенов В.П. Теория и практика химической энерготехнологии. М.: Химия, 1986, -280 с.

2. Гамаев И.П. Костерин Ю.В. Экономия тепла в промышленности. М.: Энергия, 1979.-96 с.

3. Губанов Н.Д., Ульянов Б.А. Методы термодинамического анализа энерго-химико-технологических систем. Изд. Иркутского политехнического института, 1987, -71 с.

4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А., Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии, изд. 10-е, М., Химия, 1987, -576 с.

5. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Изд. 3-е. В 2-х кн.: Часть 2. Массообменные процессы и аппараты.- М.: Химия, 2002 -368 с.

6. Зельвенский Я.Д. Пути энергосбережения при разделении смесей ректификацией //Хим.пром., 2001, №5, С. 21-27.

7. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1971,-784 с.

8. Некоторые аспекты обеспечения промышленной безопасности опасных объектов. Имитационное моделирование / В. А. Алексеев, С. И. Валеев, С. А. Вилохин [и др.] ; Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань : Фэн, 2020. – 128 с.

УДК 536.632

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УТИЛИЗАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ ASPEN HYSYS

Музипов Н.А., Габитова А.Р.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: nmuzipov@mail.ru

В современном мире в результате резкого увеличения потребления пресной воды возникает проблема загрязнения водоемов различными органическими и неорганическими веществами, сбрасываемыми, как правило, промышленными предприятиями. Одним из возможных способов решения данной проблемы является утилизация промышленных сточных вод, в процессе сверхкритического водного окисления (СКВО), позволяющем полностью нейтрализовать воздействие вредных веществ. Процесс комплексной очистки промышленных стоков был спроектирован и смоделирован с помощью программного обеспечения для моделирования Aspen Hysys[1,2]. Кроме того, был выполнен экономический анализ с использованием Aspen Process Economic Analyzer.

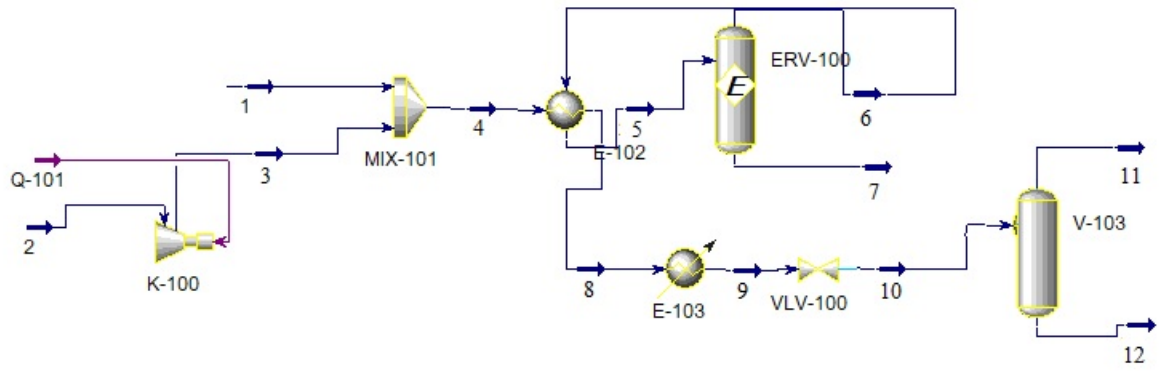


Рис 1. Технологическая процесса утилизации сточных вод, образующихся при эпоксидировании пропилена, в программном пакете Aspen Hysys.

Компоненты отхода стекают в кубовую часть ректификационной колонны и под своим давлением подаются на отделение окисления (поток 1). Одновременно с этим в компрессоре К-100 кислород воздуха поток 2 сжимается до 25 МПа и поступает (поток 3) вместе со стоком (поток 1) в смеситель с проточным ультразвуковым эмульгатором MIX-101, в котором образуется высокодисперсная эмульсия. Для очистки 1 м^3 стока понадобится около 250 м^3 воздуха. При сжатии такого количества воздуха до давления 25 МПа его объем уменьшится до объема 250 м^3/250 = 1 м^3 , т. е. на 1 л стоков расходуется 1 л сжатого воздуха. Далее смесь водных стоков (поток 4) с воздухом поступает в теплообменник–рекуператор Е-102, где предварительный нагрев осуществляется за счет

потока 6, выходящего из реактора ERV-100. Затем смесь поступает в сам реактор, где созданы сверхкритические условия для воды по температуре (до 500 ^{0}C) и давлению (до 30 МПа) и происходит реакция СКВО. Время достаточное для проведения реакции в реакторе составляет от 10 сек. до 1 мин. Нагрев смеси в реакторе происходит с помощь высокочастотного индукционного нагревателя. Молибден, не растворившийся в сверхкритической воде, выпадает в твердый осадок в нижней части реактора и удаляется из него для дальнейшего извлечения (поток 7) . Далее в каталитической части реактора, заполненной гранулами носителя со слоем катализатора на внешней поверхности, завершается процесс окисления оставшихся органических соединений. Реакция СКВО протекает с выделением тепла и не требует больших затрат энергии после выхода на рабочий режим. Продукты реакции СКВО после реактора проходят через теплообменник Е-102 и, отдавая тепло, нагревают поток, входящий в реактор и затем охлаждаются в холодильной машине Е-103 до 40-50 ^{0}C (поток 8) и далее в жидком виде через регулятор давления VLV-100 (поток 9,10) поступают в сборник очищенной воды и отделитель газов – сепаратор V-103, где вода (поток 12) и углекислый газ (поток 11) разделяются.

Экономический анализ, выполненный с использованием Aspen Process Economic Analyzer показал стоимость закупки и монтажа необходимого оборудования 146 699 USD (11 328 108 RUR) и общую стоимость предложенной технологии 202 589 USD (15 643 938 RUR), и на основании цены продажи некоторых очищенных компонентов стока (пропиленгликоль, молибден) также рассчитал срок окупаемости, который составил 1,2 года.

Цена продажи 3 тонн молибдена по 2.2 млн руб за тонну = 6.6 млн.руб

Пропиленгликоля 120 тонн по 74250 руб/тонна = 8.91 млн.руб.

Результаты показали, что сверхкритическая технология перспективна с экономической точки зрения, т.к. установка имеет небольшой период окупаемости и высокую экологичность в сравнении с технологией сжигания.

Литература:

1. Aspen Hysys // mydocx.ru URL: https://mydocx.ru/9-62318.html
2. Моделирующие программы для нефтяной и газовой промышленности // interface.ru URL: https://www.interface.ru/home.asp?artId=39512

УДК 532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ

Набиев Д.С., Сидоров А.А., Салин А.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

В настоящее время исследовано и разработано большое количество разнообразной аппаратуры, использующей центробежные силы для интенсификации различных массообменных процессов, начиная от простейших перемешивающих устройств до сложнейших многомодульных конструкций центробежных экстракторов.[1] Для решения задач оптимизации конструкций необходимо физическое моделирование, которое в свою очередь трудоемкое и дорогостоящее, поэтому актуальным для изучения гидродинамики истечения из отверстий является использование CFD. В работе [2] уже рассматривается подобное исследование с однофазным потоком в вычислительном комплексе гидрогазодинамики CFD ANSYS Fluent, в данном же исследовании применяется модель двухфазного потока.

С целью исследования влияния формы отверстия, из которого происходит истечение, на скорость движения жидкости была использована геометрическая модель контактного цилиндра центробежного экстрактора [Рисунок 1]. Модель была построена с помощью САПР «Компас 3D» по имеющимся схемам из диссертации Бочкарева В.Г.[3] Она представляет собой цилиндр диаметром 200 мм, внутри которого находится чаша диаметром 64,2 мм с исследуемыми отверстиями.

Было построено пять геометрических моделей с различными отверстиями. Две модели с отверстиями круглого сечения диаметром 0,769 мм и 2,07 мм, две - с отверстиями квадратного сечения со сторонами 0,769х0,769 и 2,07х2,07 мм и одна геометрическая модель с коническими отверстиями диаметром 2,07 мм на внутренней стенке и 0,769 мм на внешней.

Моделирование истечения жидкости из отверстий во вращающемся цилиндре проводилось в вычислительном комплексе гидрогазодинамики CFD ANSYS CFX. Применяемая модель турбулентности – k-ε. Количество фаз – 2. В исследуемый цилиндр поступает смесь вода-н-гексан в соотношении 1:1. На входе в цилиндр задается давление 0,12 МПа, а на выходе 0,11 МПа. Скорость вращения цилиндра 1500 об/мин.

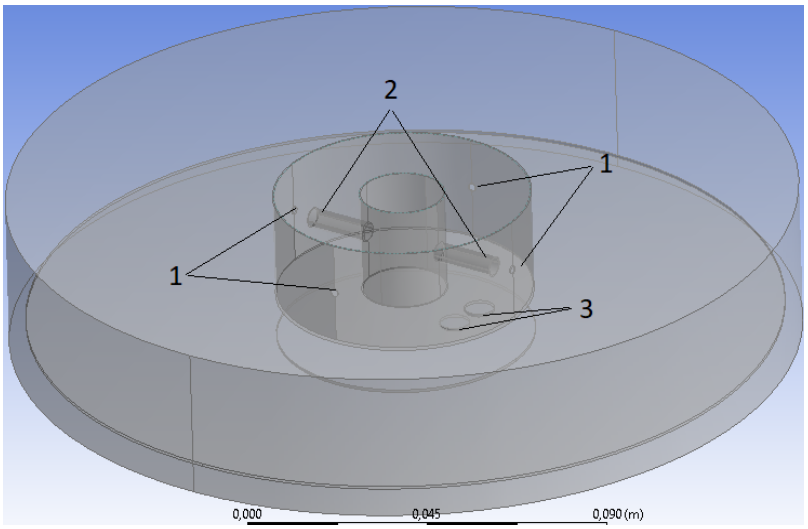


Рисунок 1 – Геометрическая модель контактного цилиндра центробежного экстрактора: 1 – исследуемые отверстия, 2 – переливные трубки, 3 – отверстия для слива легкой фазы.

На [Рисунке 2] представлено разделение смеси по массовой доле в исследуемом цилиндре. Можно заметить, что в центре цилиндра легкая фаза, а тяжелая у периферии.

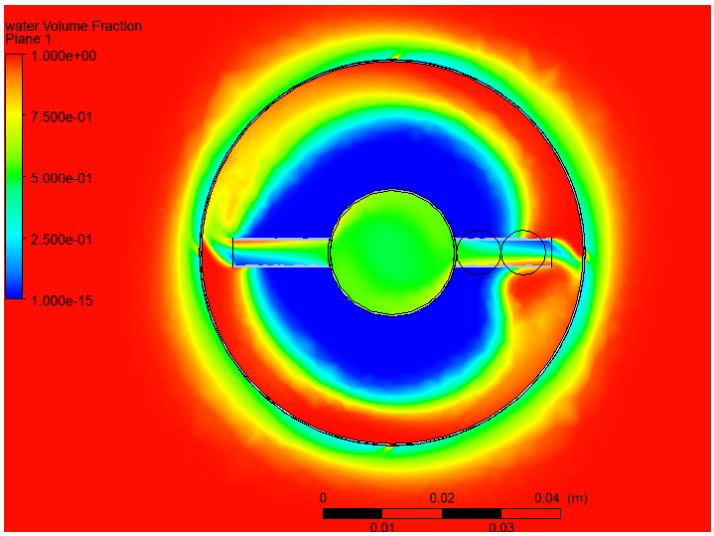
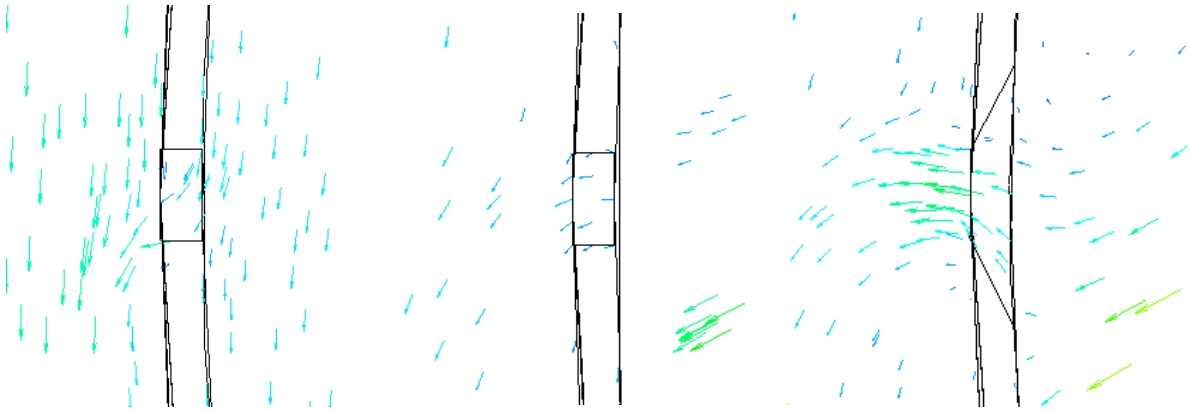


Рисунок 2 – Разделение смеси в цилиндре по массовой доле

На [Рисунке 3] приведены вектора скоростей в отверстиях с круглым, квадратным и коническим сечениями. По нему видно, то что после прохождения отверстия круглого сечения поток сразу меняет траекторию движения по направлению вращения, а в отверстии конического сечения поток некоторое время сохраняет направление параллельное оси отверстия. В свою очередь через отверстие квадратного сечения истечение происходит менее интенсивно.



а) б) в)

Рисунок 3 – Вектора скоростей в отверстиях: а - круглого, б – квадратного, в - конического сечений

В [Таблице 1] приведены данные о скоростях истечения жидкости на осевой линии исследуемых отверстий, полученные в результате моделирования. Значения получены на входе, в середине и на выходе из отверстия.

Таблица 1

№	Исследуемое отверстие	Скорость истечения тяжелой фазы, м/с		
		На входе в отверстие	В середине отверстия	На выходе из отверстия
1	Круглое отверстие Ø 0,769 мм	3,38	2,8	2,16
2	Круглое отверстие Ø 2,07 мм	2,56	2,88	3,02
3	Квадратное отверстие 0,769х0,769	1,66	1,55	1,45
4	Квадратное отверстие 2,07х2,07	1,76	1,27	0,75
5	Коническое отверстие Ø 0,769 на внутренней поверхности стенки и Ø 2,07 на внешней	1,4	2,2	3,1

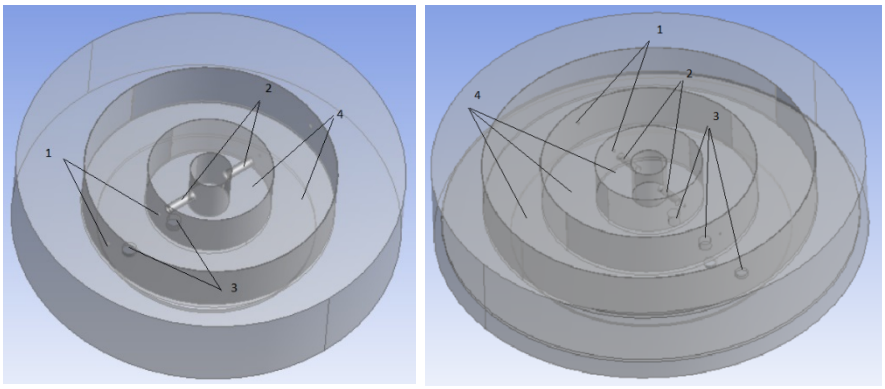
На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы. В отверстии круглого сечения диаметром 0,769 мм скорость истечения заметно уменьшается от входа в отверстие к выходу. «На входе» в отверстие, она составляет 3,38 м/с, «в середине» отверстия скорость равна 2,8 м/с, а «на выходе» из отверстия 2,16 м/с. При изменении диаметра отверстия до 2,07 мм характер

изменения скорости меняется. «На входе» в отверстие скорость равна 2,56 м/с, «в середине» 2,88 м/с, «на выходе» 3,02 м/с.

При прохождении через отверстия квадратного сечения скорость истечения уменьшается, причем в отверстии с сечением 0,769х0,769 мм изменение скорости незначительное (от 1,66 м/с до 1,45 м/с). В отверстии квадратного сечения со сторонами 2,07х2,07 мм скорость истечения снижается более чем в 2 раза. «На входе», «в середине» и «на выходе» из отверстия она равна 1,76 м/с, 1,27 м/с и 0,75 м/с соответственно.

В коническом отверстии скорость истечения тяжелой фазы «на входе» в отверстие составляет 1,4 м/с, «в середине» отверстия значение скорости равно 2,2 м/с, а «на выходе» из отверстия 3,1 м/с. Таким образом наблюдается изменение скорости от входа к выходу с увеличением в 2 раза. Поэтому, можно предположить, то что за счет этого в отверстиях с коническим сечением происходит увеличение интенсивности турбулентности, а также повышение центробежной силы, что способствует увеличению интенсивности перемешивания и разделения.[4,5] Данное исследование показывает, то что модель контактного цилиндра работоспособна, так как движение частиц характерно для геометрических параметров исследуемых отверстий. Целью дальнейшего изучения является изменение геометрических параметров контактного цилиндра, для улучшения эффективности разделения.

В ходе изучения исследований Бочкарева В.Г. было принято решение внести изменение геометрии, а именно аппарата, рассматриваемого в работе, путем увеличения количества контактных цилиндров.



а) б)

Рисунок 4 – Геометрическая модель контактного цилиндра центробежного экстрактора: а – 2 контактных цилиндра; б – 3 контактных цилиндра. 1 – исследуемые отверстия, 2 – переливные трубки, 3 – отверстия для слива легкой фазы, 4 – исследуемые цилиндры.

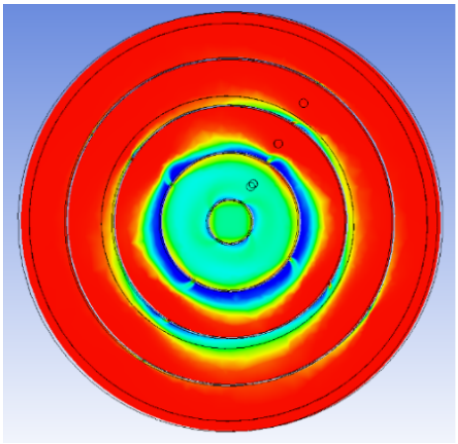


Рисунок 5 – Разделение смеси в цилиндре по массовой доле

Исследование показало, что увеличение количества контактных цилиндров при том же диаметре аппарата позволяет определить оптимальный диаметр, при котором происходит процесс разделения смеси. Данное исследование поможет в дальнейшем при моделировании центробежных экстракторов и изучении гидродинамики двухфазных потоков в центробежном поле.

Литература:

1. Экстракция в поле переменных сил. Гидродинамика, масссапередача, аппараты: монография в 2 ч. Ч.2 / Н.С. Гришин [и др.]; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. техгол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. – 444с.

2. Казаков В.А., Салин А.А. Моделирование истечения жидкости из отверстий во вращающемся цилиндре в вычислительном комплексе гидрогазодинамики CFD Ansys Fluent / Тезисы докладов Седьмой Российской научно-технической студенческой конференции Усманова – Казань: Изд-во КНИТУ, 2020.

3. Экспериментальное исследование течения жидкостей через отверстия в контактных элементах центробежных экстракционных аппаратов: дис. канд. техн. наук / В.Г. Бочкарев. – Казань, 1969. – 146 с.

4. Салин А.А. Особенности движения радиальных потоков в центробежных экстракторах безнапорного типа / А. А. Салин, Н. С. Гришин, С. И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 4. – С. 231-234.

5. Салин А. А. Действие сил Кориолиса на радиальные потоки в центробежных экстракторах / А. А. Салин, Н. С. Гришин, С. И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 7. – С. 228-231.

УДК 621.52

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАЛОТОННАЖНОЙ РЕКТИФИКАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ПО РАЗДЕЛЕНИЮ МОНО- И ДИЭТЕЛИНГЛИКОЛЯ

Назаров Д.С., Осипов Э.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: danil11041999@mail.ru

Смеси гликолей (частности моно и диэтиленгликоля) широко применяются в промышленности, однако начинают разлагаться уже при температурах собственного кипения при атмосферном давлении. Поскольку температура кипения МЭГ (наиболее низкокипящего из гликолей) равна 197,6 ^{0}C, то на протяжении технологического процесса стремятся поддерживать рабочую температуру, не превышающую 185 ^{0}C [1]. Так как необходимо поддержание пониженной температуры смеси на стадии разделения, на практике процесс проводят под вакуумом. Использование вакуума оправдывается как ограничениями, вызванными условиями обеспечения термической устойчивости гликолей, так и экономическими соображениями [2].

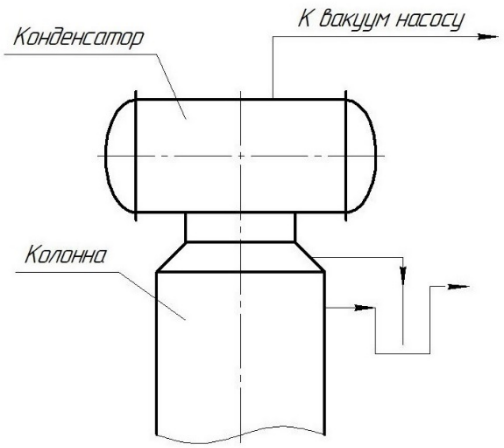


Рис. 1 – Схема верха ректификационной колонны промышленного выделения МЭГ

Так же на сегодняшний день экономически обоснованы процессы «малой» химии, которые храктеризуются небольшими производительностями и «сжатым» пространством для технологического оборудования. Цель настоящей работы – спроектировать малотоннажный процесс разделения смеси гликолей под вакуумом и подобрать оборудование.

В промышленности при выделении МЭГ в качестве контактных устройств используют насадки с высокой разделительной способностью и конденсатор, который устанавливают в верх колонны, где пары гликолей конденсируются и

стекают в колонну в качестве флегмы (рис. 1). В случае, когда диаметр колонны мал (около 150 мм) такое аппаратурное оформление представляет ряд сложностей. Поэтому возникает вопрос об оптимальном конструктивном решении задачи.

При составлении принципиальной схемы одним из условий нормального протекания процесса является то, что поток флегмы, поступающей в верх колонны в качестве орошения, должен иметь давление большее чем в колонне. Поскольку в противном случае пары гликолей будут выходить не из верхнего патрубка, а непосредственно из патрубка ввода флегмы в колонну. Принципиальная схема ректификации смеси МЭГ и ТЭГ представлена на рис. 2.

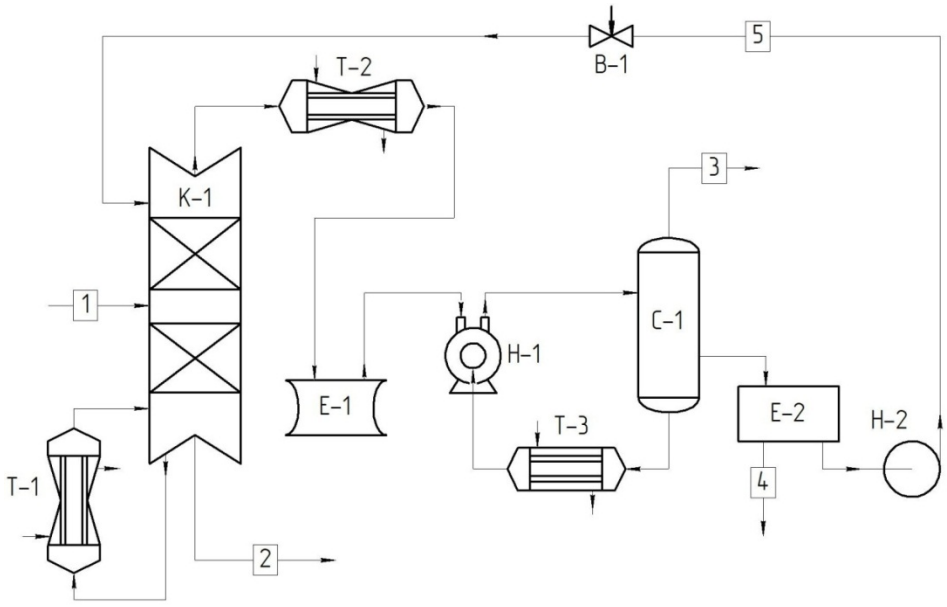


Рис. 2 Принципиальная схема ректификации смеси МЭГ и ТЭГ
Поток: 1 – питание; 2 – кубовый продукт; 3 – неконденсируемые газы; 4 – дистиллят; 5- флегма. Оборудование: К-1 – колонна с насадочным устройством; Т-1 – нагреватель; Т-2, Т-3 – охладители; Е-1, Е-2 – емкости; Н-1 – вакуум насос; Н-2 – насос; С-1 – сепаратор; В-1 – клапан проходной регулирующий

Колонна поз. К-1 снабжена двумя слоями нерегулярной насадки, между которыми подводится сырье (поток 1) с температурой – 20 ^{0}С, общим массовым расходом 30 кг/час, массовыми долями МЭГ и ТЭГ – 85% и 15% соответственно. Пары верха колонны поступают в охладитель поз. Т-2, откуда сконденсировавшаяся жидкость и оставшаяся часть паров гликолей направляется в промежуточную емкость поз. Е-1. Затем смесь откачивается жидкостно-кольцевым вакуум насосом (ЖКВН) поз. Н-1 в сепаратор поз. С-1, откуда неконденсируемая часть (поток 3), состоящая из газов натекания, поступающих в систему из атмосферы, газов термического разложения продуктов переработки, природа которых может быть весьма различной и газов, содержащихся в сырье установки в растворенном

и конденсированном виде [2]. А конденсируемая часть – разделяется на поток, который после охлаждения в теплообменнике поз. Т-3 поступает в ЖКВН поз. Н-1 в качестве рабочей жидкости, которую периодически приходится заменять. И на поток, поступающий в емкость сбора поз. Е-2, который затем разделяется на продукт (поток 4) и флегму, подаваемую насосом поз. Н-2 в колонну в качестве орошения (поток 5). В кубовом потоке содержится ТЭГ, который выводится из колонны.

Условие, описанное ранее, было выполнено тем, что поток флегмы, откачиваемой из емкости сбора, имеет большее давление чем в колонне. Это объясняется тем, что в технологической цепи вакуум насос предшествует емкость сбора и поэтому в ней будет давление больше, чем в колонне.

Нахождение оптимального процессного решения предполагает проведение ряда экспериментов с задание независимых параметров, величины которых варьируются в установленных диапазонах. В качестве таких параметров приняты давление верха колонны – $P_В$, остаточное содержание МЭГ в кубе – $X_{МЭГ}$, число теоретических тарелок (ЧТТ) – $N_Т$, расход флегмового потока - $Q_{Ф.}$ Принятое число независимых переменных требует большого количества численных экспериментов, что является крайне затруднительным. Универсальная моделирующая программа (УМП) UniSim Design Suite предоставляет расширенные возможности, позволяющие решать задачи такого рода.

В соответствии с принципиальной схемой (рис. 2) в УМП UniSim синтезирована расчетная схема установки выделения МЭГ ректификационной колонной малого диаметра (рис. 3).

С использованием подходов, изложенных м [3], vоделирование ректификации проводится по принятому процессному модулю – Tower, основанному на базе потарельчатого расчета с итерационным методом типа Insideout – метод внешних и внутренних циклов. Для описания состояния парожидкостного равновесия смеси – МЭГ и ДЭГ, принята равновесная модель Peng Robinson, которая дает средние результаты в сравнении с другими моделями. В качестве параметров, на величины которых предъявляются строгие требования, принимаются: содержание МЭГ в продуктовом потоке – не менее 98% (масс.); температура кубового потока колонны – не более 180 °С, так как при более высоких температурах начинается термическое разложение гликолей.

В данной модели (рис. 3) вакуум-насос заменен на модуль Control Valve (Клапан), который позволил изменить давление потока. Так же используется модуль Tee (Делитель), который разделяет поток на флегму и дистиллят; модуль Recycle (Операция рецикл), позволяющий направить выходящий поток флегмы из делителя в колонну в качестве орошения; модуль Adjust, который настроен на поддержание максимального содержания МЭГ в потоке Дистиллят в

зависимости от количества возвращаемой в колонну орошения (поток Флегма), модули Cooler (Конденсатор) и Multipurpose Flash (Сепаратор). Для того чтобы включить в процесс газы натекания был введен материальный поток атмосферного воздуха (поток Воздух), поступающий на одну из теоретических тарелок.

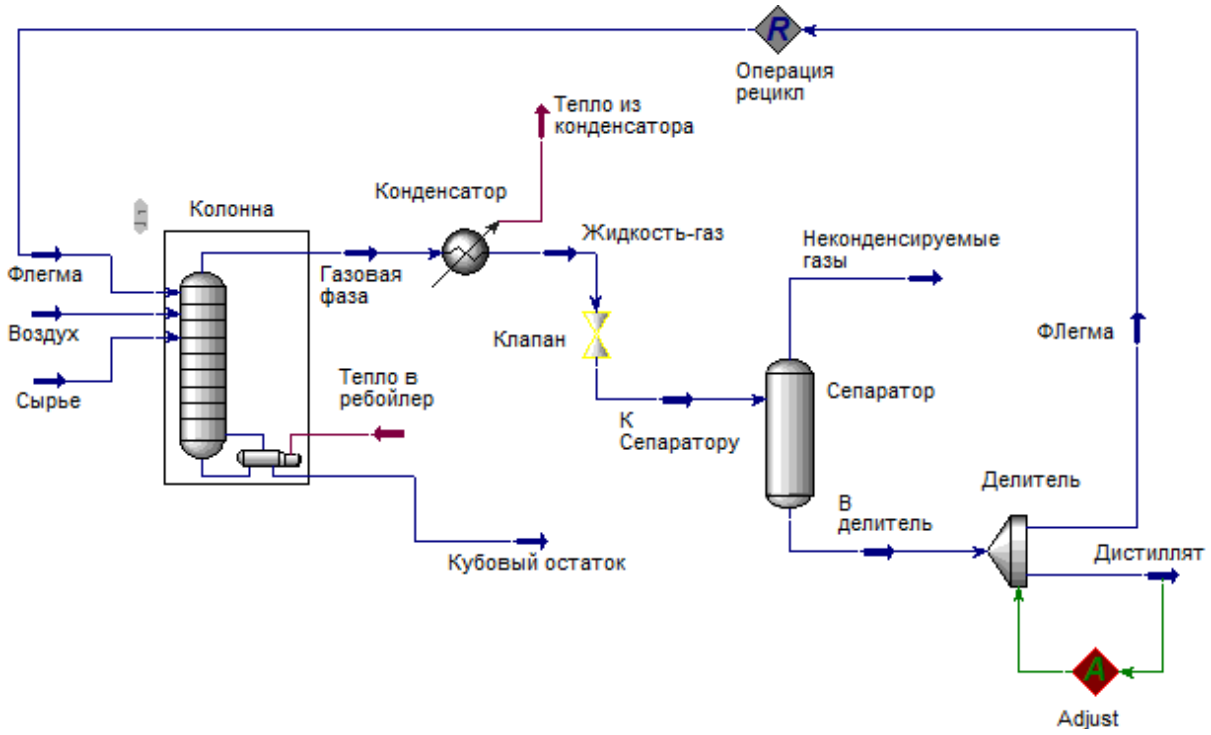


Рис. 3 – Синтезированная расчетная схема установки выделения МЭГ ректификационной колонной малого диаметра

Синтезированная модель позволила провести модельный эксперимент для определения независимых параметров, которые были:

1) Подобраны (для ЧТТ), путем рационального их увеличения в зависимости от чистоты выхода МЭГ;

2) Определены (для $Р_В$), по паспортной характеристике ЖКВН в зависимости от расхода откачиваемого газа;

3) Рассчитаны УМП (для $Х_{МЭГ}$ и $Q_Ф$), где остаточное содержание МЭГ в кубе ($Х_{МЭГ}$) было специфицировано при расчете колонны, а расход флегмового потока ($Q_Ф$) рассчитан модулем Adjust в зависимости от содержания МЭГ в потоке Дистиллят.

Таким образом, построенная в УМП UniSim Design модель позволила сделать вывод об адекватности и работоспособности технологического процесса выделения МЭГ из смеси моно- и диэтиленгликолей ректификационной колонной малого диаметра в определенных условиях аппаратурного, технического и конструктивного решений.

Литература:

1. Дымент, О.Н. Гликоли и другие производные окисей этилена / О.Н. Дымент, К.С. Казанский, А.М. Мирошников. – М.: Химия, 1976. – 376с.

2. Латыйпов Р. М. Анализ и оптимизация аппаратурно-технологического оформления производств гликолей методом гидратации окиси этилена: дис. … канд. техн. наук: 05.17.08. Казан. нац. исслед. технол. ун-т, Казань, 2019 – 166 с.

3. Осипов Э.В. Системное моделирование установок вакуумной ректификации/ Э.В. Осипов, Э.Ш. Теляков, С.И. Поникаров //Бутлеровские сообщения. 2011. Т. 28. №20.

УДК 678.025

ПИТАТЕЛИ-ДОЗАТОРЫ ДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Новоженин Е.А., Хусаинов Р.Н.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: eanovozhenin@yandex.ru

При непрерывной схеме проведения технологических процессов, в частности вакуумной сушки, большое влияние на эффективность работы сушилок оказывает точность дозирования влажного материала в аппарат. Неравномерность загрузки приводит к ухудшению условий теплообмена высушиваемого продукта с греющей поверхностью и в итоге к ухудшению качества готового продукта и снижению производительности технологического оборудования.

Рассмотрим основные типы питателей наиболее часто встречающихся в химической и смежной с ней отраслях промышленности и проанализируем их пригодность для дозированной подачи дисперсных материалов в технологические аппараты. Схемы секторных дозирующих питателей, получивших наибольшее применение в загрузочно-разгрузочных устройствах [1,2] представлены на рис.1

Дозирование материала в устройствах данного типа обеспечивается за счет поочередного заполнения и опорожнения отсеков в процессе вращения барабана. Регулирование производительности таких питателей осуществляется изменением объема дозирующих отсеков, а также за счет изменения частоты вращения рабочего органа. Однако, увеличение скорости сверх некоторого предела приводит к неполному заполнению отсеков материалом, что обусловливает снижение точности дозирования. К недостаткам данного типа питателей и их модификаций следует отнести заклинивание барабана при работе с твердым гранулированным материалом, а также неполное опорожнение дозирующих отсеков при работе с материалами склонных к адгезии.

Наряду с секторными питателями в химической промышленности для разгрузки-выгрузки дисперсных материалов нашли применение шкековые (винтовые) питатели-дозаторы /2/. Сыпучий материал поступает из бункера в межвитковое пространство шнека и далее перемещается им в следующий аппарат. Однако уплотняющее воздействие витков шнека на влажный продукт приводит к его комкованию, вследствие чего снижается точность дозирования и ухудшается работа следующего за ним оборудования. Кроме того, при работе с образивными материалами в шнековых питателях происходит износ деталей, соприкасающихся с продуктом и загрязнение дозируемого материала продуктами износа, что часто недопустимо.

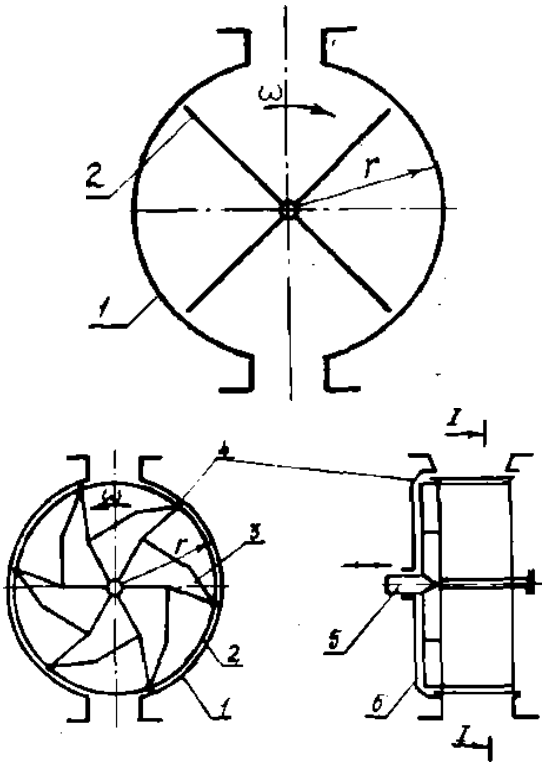


Рис.1 Схемы секторных питателей
I - корпус; 2 - ротор; 3 - поворотная лопасть ротора;
4 - ось; 5 - регулирующий конус; 6 – поводок

Для равномерной подачи сыпучих материалов используются дисковые (тарельчатые) питатели [2,3]. На вращающемся диске материал располагается под углом естественного откоса. Дозируемый с тарелки материал снимается скребком. Частоту вращения диска определяют по соотношению силы трения материала о тарелку питателя и центробежной силы. Аппараты данного типа хорошо зарекомендовали себя при работе с мелкодисперсными сыпучими продуктами. К недостаткам данной конструкции следует отнести ее громоздкость и нестабильность работы с волокнистыми дисперсными продуктами, а также с влажными материалами, обладающими значительным сцеплением.

Эффективная работа рассмотренных типов дозирующих устройств наблюдается лишь при дозировании сыпучих и некомкующихся дисперсных продуктов. Как правило, материал, поступающий на сушку, не обладает хорошей сыпучестью, которая резко ухудшается с увеличением влажности продукта. Кроме того, рассматриваемые аппараты не пригодны для дозированной загрузки сыпучих волокнистых материалов.

Таким образом, существующие питатели-дозаторы непригодны для подачи многих дисперсных продуктов, ввиду их низкой точности дозирования и ненадежности в работе, что сдерживает применение высокоэффективных аппаратов непрерывного действия.

В результате этого наблюдается значительный перерасход топливных и энергетических ресурсов удорожание технологического процесса, снижение качества обрабатываемого продукта.

Проведенный анализ дозаторов дисперсных материалов послужил основанием для разработки и экспериментального исследования дозирующих устройств комкующихся и сжимающихся продуктов. В результате была разработана и зарегистрирована программа ЭВМ для расчета производительности дозаторов [4].

Литература:

1. Видинеев Ю. Д. Дозаторы непрерывного действия / Ю.Д.Видинеев.- М.: Энергия, 1978.- 184 с.

2. Рогинский Г. А. Дозаторы сыпучих материалов / Г. А. Рогинский, - М.: Химия, 1978.- 174 с.

3. Зенков Р.Л. Бункерные устройства / Р. Л. Зенков, Г.П., Гриневич, В. С. Исаев. - М.: Машиностроение, 1977.- 222 с.

4. Хусаинов Р. Н., Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: «Расчет производительности объемного лопастного дозатора сыпучего материала», № 2021616644 от 23 04.2021 г.

УДК 621.522.3

СОПРЯЖЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ФЕНОЛА-АЦЕТОНА И ВСС

Осипов Э.В., Бугембе Д., Харитонова А.И.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: eduardvosipov@gmail.com

Ректификационный блок по переработке отходов основного производства фенола-ацетона включает в себя узел переработки углеводородной фракции с целью извлечения из неё изопропилбензола (ИПБ) и альфа-метилстирола (АМС). Данное производство включает в себя 6 ректификационных колонн, 5 из которых работают под вакуумом [1].

Схема блока представлена на рис. 1.

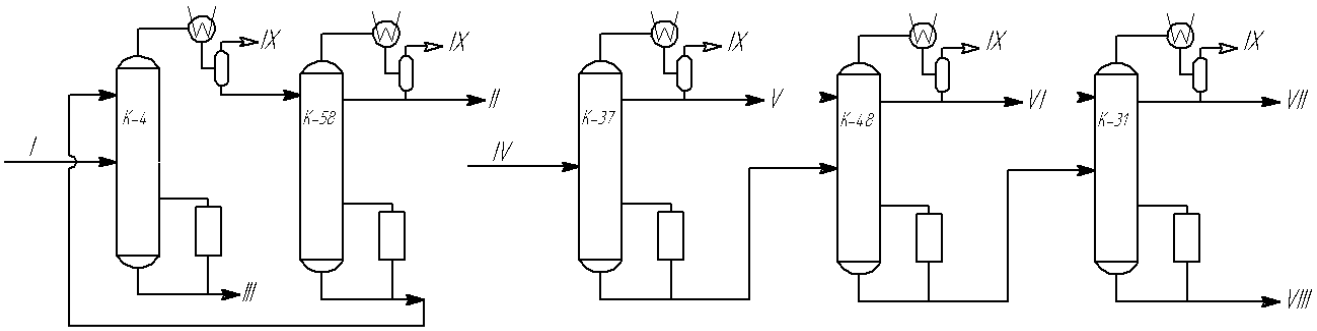


Рис. 1. Вакуумные колонны установки по переработки отходов производства фенола и ацетона.
I - питание колонны К-4; II - фенольная фракция; III - фенольная смола; IV - питание К-37; V - фракция изопропилбензола; VI, VII - фракции альфаметилстирола; VIII - остаток, IX - поток на ВСС.

Основными элементами данной СХТС являются собственно вакуумные ректификационные колонны (ВК), конденсационные узлы (КУ), вакуумсоздающие системы (ВСС) и коммуникационные трубопроводы (ТП) между ВК и КУ и между КУ и ВСС. Трубопроводы оказывают существенное влияние на величину вакуума, достигаемого в РК, а значит и на свойства совокупной СХТС. Изучать отдельные элементы СХТС в отрыве от сопряженных элементов нельзя, поскольку система обладает свойством интегративности. В настоящее время исследование подобных систем наиболее эффективно проводится в средах специальных моделирующих систем, например, в среде Unisim Design R451, предназначенной для моделирования самых разнообразных процессов и аппаратов химической технологии, в том числе и ректификационных систем.

На первом этапе было проведено технологическое обследование существующих режимов работы ректификационных колонн К-4, К-31, К-37, К-48 и К-58.

Основная цель данного исследования заключалась в определении термодинамических параметров состояния потоков откачиваемого газа (давление, температура, состав) на входе в существующие ВСС; сборе информации о характеристиках работающих ПЭНов (расчетное и рабочее давление, характеристики, расход рабочего пара и т.д.); определение параметров технологического режима конденсационной аппаратуры; сбор информации о физико-химических свойствах индивидуальных компонентов откачиваемого газа. Основное значение при обследовании придавалось непосредственному измерению температур и давлений по тракту движения откачиваемых газов от ректификационной колонны до ВСС.

На втором этапе в программном комплексе Unisim Design R451 были синтезированы расчетные модели вакуумных колонн, в которых в качестве спецификаций задавались данные технологического обследования. Расчетные схемы блока представлены на рис. 2-3.

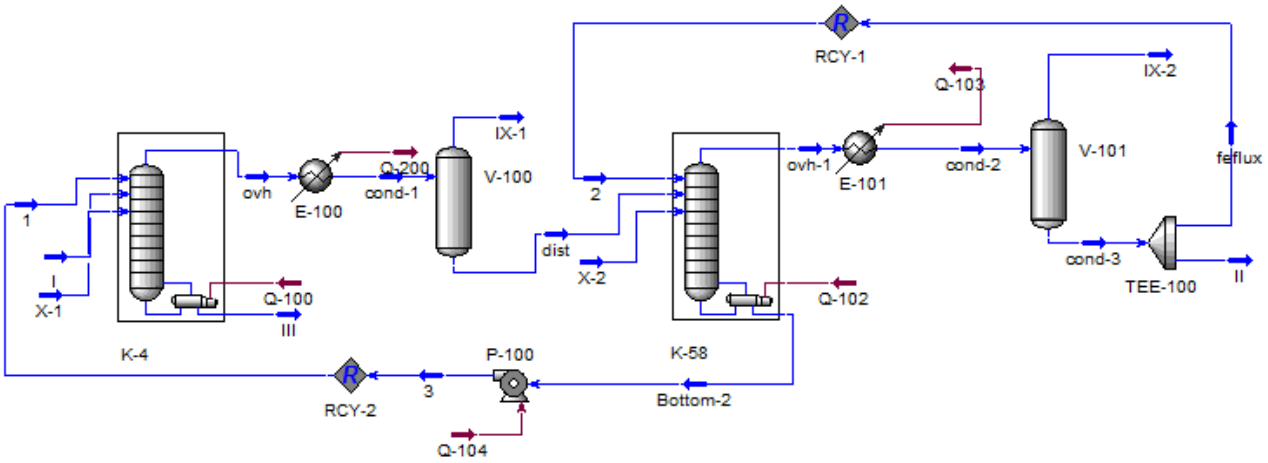


Рис. 2. Расчетная схема колонн К-4 и К-58.

На рис. 2 и 3 обозначения идентичны рис. 1, за исключением потока X, который моделирует поступление атмосферного воздуха в вакуумируемые объекты.

Согласно рекомендациям [2], в качестве модели расчета фазового равновесия была принята модель Wilson [2], в которой неидеальность системы учитывается путем включения дополнительного множителя γ_i к константе равновесия K_i, который для многокомпонентной смеси определяется по уравнению (1):

$$\ln\gamma_i = 1 - \ln\left(\sum_{j=1}^{n} x_j \cdot \Lambda_{ij}\right) - \sum_{k=1}^{n}\left(\frac{x_k \cdot \Lambda_{ki}}{\sum_{j=1}^{n} x_j \cdot \Lambda_{kj}}\right) \qquad (1)$$

Параметры бинарного взаимодействия, рассчитанные в программе Unusin Design R451 и используемые в (4.27) приведены в таблице.

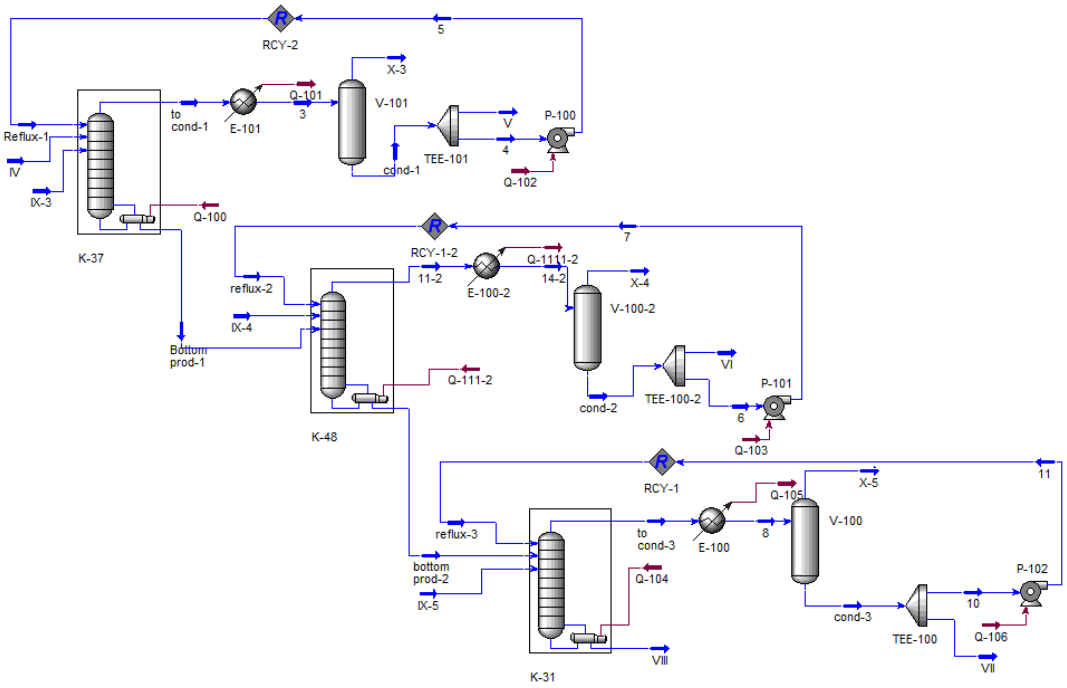


Рис. 3. Расчетная схема колонн К-37, К-48 и К-58.

Таблица 1. Параметры бинарного взаимодействия компонентов в уравнении Wilson (для схемы рис. 2).

	ИПБ	АМС	АЦФ	Воздух	Фенол	Кумилфенол	ДМФК	Смолы
ИПБ	-	57.60396	335.6962	829.4052	1324.012	869.4252319	1013.179	18.01975
АМС	-51.1352	-	273.3898	1008.227	761.7291	599.151001	749.1613	101.6505
АЦФ	112.8385	60.58999	-	-	3175.787	-4.758479118	120.5349	-
Воздух	1445.895	2145.26	-	-	-	-	-	-
Фенол	-27.9497	25.48584	-1335.68	-	-	-929.5286865	-776.686	-
Кумилфенол	76.47569	68.27225	121.004	3172.931	1499.712	646.1915283	814.8365	270.2634
ДМФК	-2.671	88.21104	211.4844	-	-388.444	-250.9771576	-	-
Смолы	61.17418	101.4748	-	-	-	-	-	-

Результаты сравнения расчётных данных с результатами промышленного обследования пред

Таблица 2 31Технологические параметры колонны и данные расчета по колоннам К-3 и К-58

Наименование потока	**Состав, масс. доли.**					**t**	**Расход, кг/час**
	Фенол	**АЦФ**	**ДМФК**	**КМФ**	**Смолы**		
I	0.485	0.083	0.012	0.2	0.22	<150	2294
I	0.488	0.09	0.012	0.19	0.22	140	2294
II	0.97	0.2	0.1	-	-	30-40	1362
II*	0.95	0.3	0.1	0.1	-	40	1354
III	0.08	0.13	0.03	0.36	0.4	122	932
III*	0.01	0.05	-	0.4	0.54	140	940

Таблица 3 Технологические параметры колонны и данные расчета по колонне К-37, 48 и 31

Наименование потока	**Состав, масс. доли.**				**Температура, ^{0}C**	**Расход, кг/час**
	ИПБ	**АМС**	**АЦФ**	**Возд**		
IV	0.22	0.76	0.02	-	<170	1305.3
IV*	0.221	0.76	0.019	-	170	1305
V	0.98	0.015	0.05	-	30-40	242.5
V*	0.98	0.02	-	-	40	239.5
VI	0.081	0.92	0.001	-	30-40	350
VI*	0.14	0.85	0.01	-	40	349
VII	0.02	0.96	0.02	-	30-40	568
VII*	0.01	0.098	0.01	-	40	563
VIII	-	0.84	0.16		122	143.5
VIII*	-	0.83	0.17		127	143.5

В качестве концептуальной идеи реконструкции было выдвинуто предложение об использовании в качестве ВСС единой вакуумсоздающей станции гидроциркуляционного типа на базе ЖКВН. Аналогов использования подобного решения для крупномасштабных промышленных установок в отечественной практике нет. В проект реконструкции был заложен ЖКВН марки P2L 65327 Y 4B производства фирмы SIHI. В качестве рабочей жидкости была использована фенольная вода (концентрация фенола до 4% масс.), поэтому характеристика машины пересчитывалась в соответствии с подходом, изложенном в [3]. На рис. 4 представлено сопряжение характеристик трубопроводного тракта группы сопряженных колонн и ЖКВН.

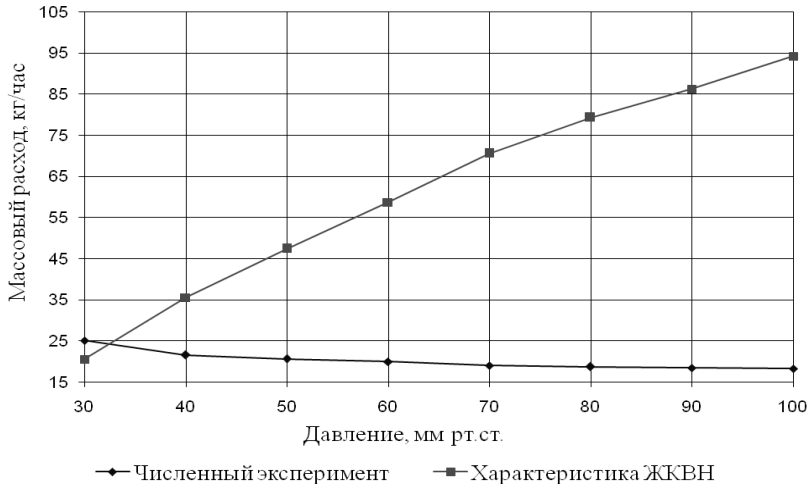


Рис. 4. Сопряжение характеристик трубопроводного тракта вакуумируемого объекта и ЖКВН P2L 65327 Y 4B.

Как видно из рис. 4, характеристики этих элементов сопрягаются в точке 33 мм рт. ст. Учитывая, что точность моделирования гидравлического сопротивления газового тракта и конденсационных узлов является относительно невысокой, было предложено закрепить с помощью антипомпажной защиты насоса давление в системе, равное 40 мм рт. ст.

Разработанная методология моделирования вакуумных блоков позволят существенно увеличить точность моделирования и повысить качество проектирования технологических процессов, проводимых под вакуумом.

Литература:

1. Осипов Э.В. Анализ сложной химико-технологической системы, включающей в себя вакуумные ректификационные колонны и вакуумсоздающую систему на базе ЖКВН / Э.В. Осипов, Э.Ш. Теляков, С.И Поникаров // Вестник Казан. технол. ун-та. -2010. -№8. - С. 434-435.

2. Edwards, J.E. Chemical Engineering in Practice. Design, Simulation and Implementation, 1st ed.; P & I Design Ltd.: Thornaby, UK, 2011; p. 543.

3. Осипов Э.В. Влияние тепло- и массообменных процессов, протекающих в жидкостно-кольцевом вакуумном насосе на его эксплуатационные характеристики / Э.Ш. Теляков, Д. Бугембе // Инженерно-физический журнал. -2019. -Т.92. -№.4, -С.1089-1099

УДК 662.76

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ASPEN HYSYS

Осипов Э.В., Умышев Д.Р.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева,
E-mail: evosipov@kstu.ru

Комбинированные газотурбинные установки (ПГУ) нашли широкое распространение не только в генерирующей промышленности, но и на предприятиях химического, нефтехимического, нефтеперерабатывающего и нефтедобывающего комплексов промышленности. В некоторых странах [1] более 96% электроэнергии производятся с помощью ПГУ, поэтому задача их совершенствования является актуальной, позволяющей снизить затраты на проведение процесса. Основой успешного проектирования ПГУ является точный расчет теплового и материального баланса, по которому рассчитывается основные элементы системы. В работах [1-2] для этих целей использовались программные продукты фирмы Aspen HYSYS, при чем в работе [1] использовалась программа HYSYS, а в работе [2] - Aspen Plus.

Одним из направлений совершенствования газотурбинных установок, используемых на промыслах нефтедобывающих компаний, является их перевод из цикла ГТУ в ПГУ. Так же является перспективным установка котлов-утилизаторов, которые предназначены для получения дополнительного количества водяного пара среднего и высокого давлений.

В программном комплексе Aspen HYSYS были смоделированы 2 схемы: схема 1 - ПГУ, схема 2 - ГТУ с котлом-утилизатором. Данные схемы представлены на рис. 1 и 2. Для моделирования основных процессов, протекающих в комбинированном цикле в соответствии с рекомендациями [1] были использованы модули, входящие базу программы, при этом схема была дополнена блоком подогрева вторичного воздуха, поступающего в кольцевой зазор камеры сгорания.

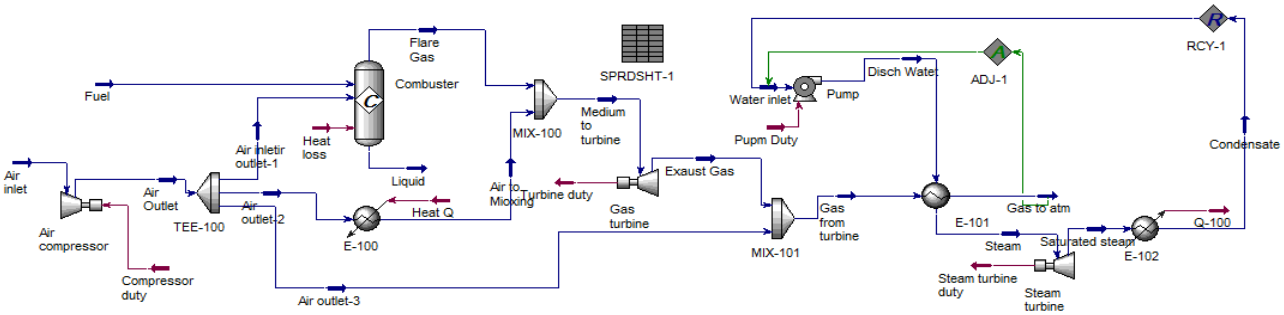


Рис. 1. Расчетная схема ПГУ

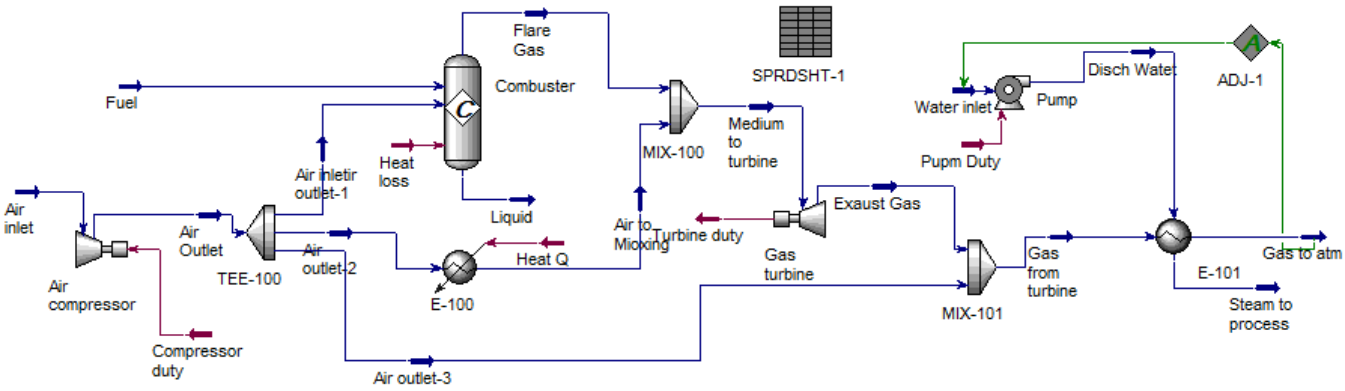


Рис. 2. Расчетная схема ГТУ с котлом-утилизатором.

Использование Aspen HYSYS позволит существенно увеличить точность моделирования схемы и определить необходимые решения для её совершенствования.

Литература:

1. LiuIftekhar Z.. Simulating combined cycle gas turbine power plants in Aspen HYSYS. / Z. LiuIftekhar, A. Karimi // Energy Conversion and Management. -2018. -№71. -P. 1213–1225

2. Лазебный И. П. Верификация модели парогазовой установки / И. П. Лазебный, П. С. Филиппов, А. Ф. Рыжков // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве : сборник докладов VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ’2019) с международным участием (Екатеринбург, 16–17 мая 2019 г.). — Екатеринбург: ООО АМК «День РА», 2019. — С. 108-112.

УДК 665.658.2.

УСТАНОВКА ГИДРООЧИСТКИ НАФТЫ АО «ТАНЕКО». МОДЕРНИЗАЦИЯ КАТАЛИЗАТОРА И ЦИФРОВОЙ ПРОТОТИП УСТАНОВКИ

Сабиров Б.А., Мурзин В.М.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: tulpan19712@gmail.com

Гидроочистка — процесс химического превращения органических веществ нефтяных фракций под воздействием водорода при высоком давлении и температуре.

Объектом исследования являлась установка гидроочистки нафты фракции АО «ТАНЕКО».

Основным продуктом установки гидроочистки является тяжелая нафта, которая используется в качестве сырья для установки каталитического риформинга и в качестве компонента товарных бензинов, а также легкая нафта, используемая в качестве сырья установки изомеризации.

Установка гидрооблагораживания необходима для того, чтобы превращать нежелательные вещества под воздействием водорода при высоком давлении и температуре в среде водородсодержащего газа. Гидроочистка нефтяных фракций направлена на уменьшение содержания соединений серы в готовых нефтепродуктах. Помимо этого, осуществляется насыщение олефиновых углеводородов, уменьшение смолы и соединений, которые содержат кислород и азот. Данный процесс является самым часто встречаемым процессом в нефтепереработке [1].

Данный процесс обладает высоким спросом, поскольку с каждым годом идет повышение количества нефтей с различным содержанием серы и дальнейшая гидроочистка нефтяных остатков повышает экономичность производства больших объемов товарных продуктов на предприятиях [2].

Процесс гидроочистки проводят в реакторах в стационарном слое катализатора. Реактор представляет собой цилиндрический аппарат, у которого есть корпус, штуцера для ввода и вывода сырья, продуктов реакции, распределительное устройство и опорную решетку, на котором расположен катализатор гидроочистки. Реактора могут быть с радиальным или аксиальным вводом сырья. В зависимости от того как располагается катализатор могут быть одно и многосекционными [3].

На условия проведения процесса гидрооблагораживания, глубину и характер, протекающих реакций, значительную степень оказывает катализатор и его состояние.

Катализаторы гидроочистки представляют собой сочетания оксидов и сульфидов кобальта (или никеля) с оксидами или сульфидами молибдена (вольфрама), а именно молибдатов кобальта (никеля), сульфовольфраматов никеля и т.д. В качестве носителей обычно используются оксиды алюминия в чистом виде, модифицированные добавками, а также цеолиты, пемза, бокситы, силикагель [4].

Большинство широко распространенных промышленных CoMo и NiMo катализаторов не обладают достаточной активностью для получения топлив с ультранизким содержанием серы. Они требуют ужесточения режима процесса гидроочистки. Подобное ужесточение условий эксплуатации приводит к быстрой дезактивации катализатора, сокращению срока эксплуатации и снижению производительности. Разработка более активных и стабильных катализаторов является одним из самых перспективных направлений модернизации процесса гидроочистки.

Наиболее распространенными методами повышения активности Co(Ni)Mo катализаторов гидроочистки является использование для приготовления катализаторов органических хелатонов новых или модифицированных алюмооксидных носителей, а также применение новых модификаторов - соединений металлов, являющихся активными элементами [6].

Фирма UOP предлагает катализаторы Impulse: HR, HRK, HDK, HYK, HTS, HF, которые применяются для при переработке любых нефтепродуктов, от нафты и газойлей до остатков.

Катализатор ТК-560 BRIM представляет собой высокоактивный CoMo катализатор, с высокой активностью и стабильностью, но с меньшим содержанием металлов и насыпной плотностью.

Улучшение свойств катализаторов гидроочистки может быть достигнуто изменением природы соединений, используемых для приготовления пропиточных растворов. Пропитка оксида алюминия растворами фосфоромолибдата или силикомолибдата кобальта позволяет увеличить термостабильность катализатора по сравнению с пропиткой растворами традиционных солей. Дополнительным приемом улучшения качества пропиточных катализаторов Co(Ni)–Mo/Al2O3 является предварительное модифицирование поверхности носителя обработкой кислотами, щелочами, водой или термообработкой на воздухе [3].

Далее в статье будет приведена схема материальных потоков и процесс проектирования и создания цифрового двойника установки.

Схема материальных потоков установки представлена на рисунке 1.

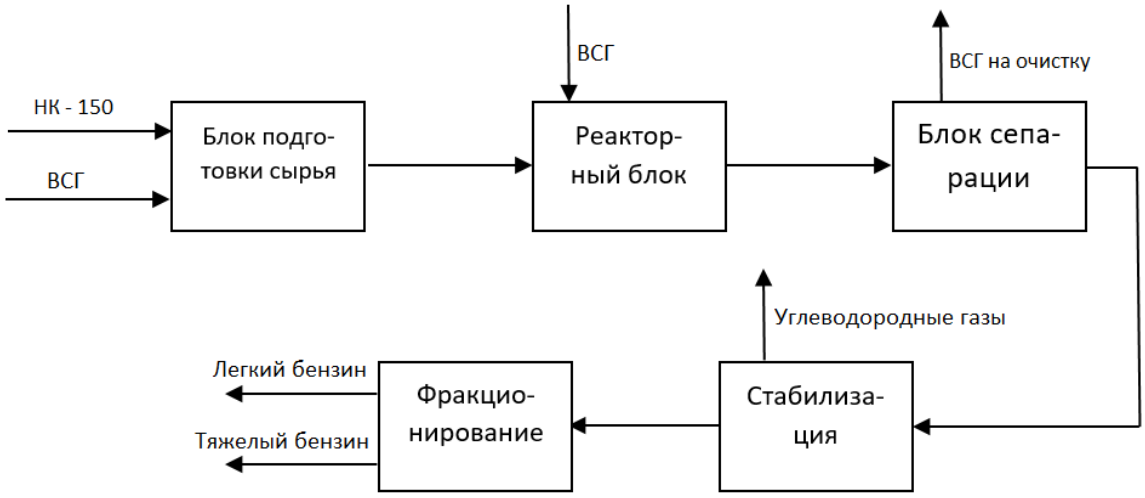


Рисунок 1 – Схема материальных потоков

Подбор теплообменников будем осуществлять с использованием программного обеспечения Aspen Exchanger and Rating v.11 и Aspen Hysys v.11.

Для решения данной задачи необходимы из палитры инструментов выбрать кожу-хотрубчатый теплообменник и перенести на рабочую панель, далее необходимо задать входные и выходные потоки. Далее необходимо выбрать режим автоматического расчета теплообменника, после чего Hysys переведет расчёт в программу Aspen Exchanger and Rating v.11.

Далее переходим во вкладку Verify Geometry, чтобы увидеть чертеж теплообменника, который представлен на рисунках 2.

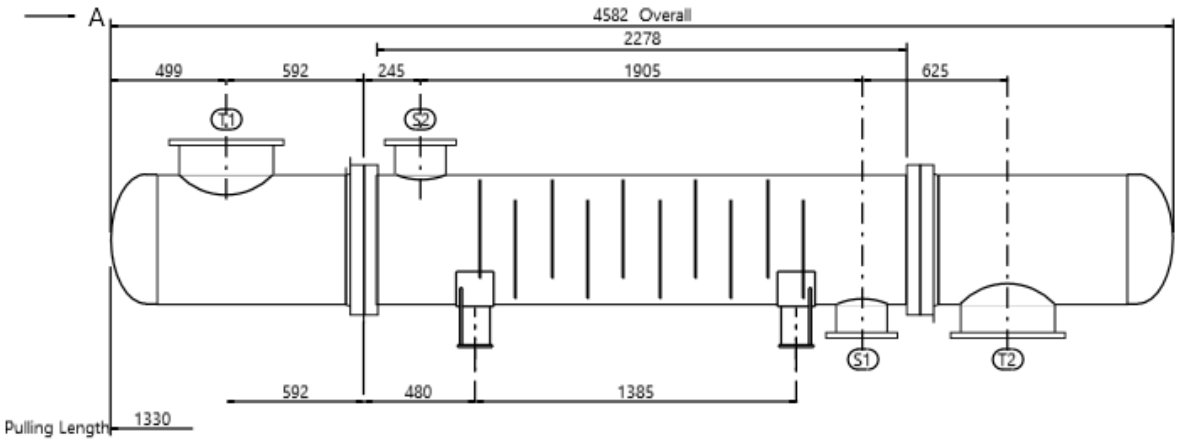


Рисунок 2 – Геометрические размеры теплообменника

Модельная схема цифрового двойника установки гидроочистки нафты представлена на рисунке 3.

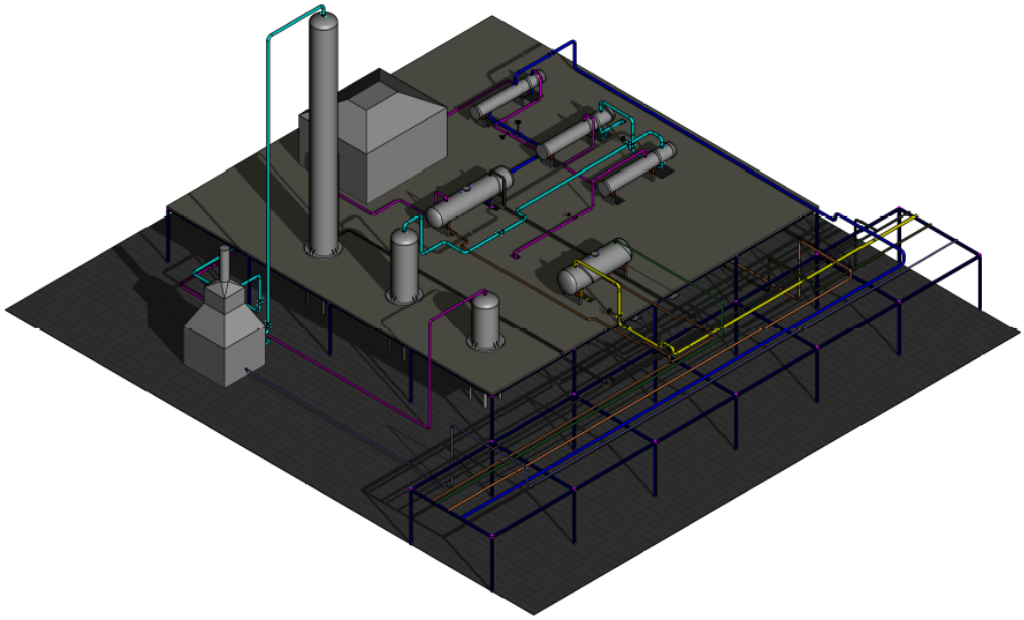


Рисунок 3 – 3D модель установки

В процессе проектирования осуществлен расчет материальных балансов действующего производства и реконструированного производства.

С помощью программного обеспечения Aspen HYSYS проведены расчеты основного оборудования: реакторов конверсии диолефинов, гидроочистки и доочистки, а также вспомогательного оборудования: колонны стабилизации и разделения, теплообменников, холодильников и аппаратов воздушного охлаждения. Найдены линейные размеры реактора гидроочистки, проведен механический расчет. С помощью программного обеспечения Mathcad проведены расчеты вспомогательного оборудования, таких как: насосы, рефлюксные емкости и технологическая печь.

Проведенное технико-экономическое обоснование, которое свидетельствует о том, что уменьшение времени простоя оборудования, за счет современных технологий, позволяет увеличить выход гидроочищенного сырья, что на следующей ступени даст увеличение товарного компонента бензина. Проведенное технико-экономическое обоснование свидетельствует о том, что проект является устойчивым и эффективным, проектные предложения по совершенствованию технологического процесса целесообразны.

Литература:

1. Технологический регламент № ТР-НПЗ-03-2016 установки гидроочистки нафты. АО «ТАНЕКО», 2017.

2. Суханов В.П. Каталитические процессы в нефтепереработке. 3-изд., перераб. И доп.- М.: Химия, 1979 г. 344 с.

3. Солодова Н.Л. Гидроочистка топлив: учебно-методическое пособие / Н.Л. Солодова, Н.А. Тереньева. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-т, 2008. – 104 с.

4. [Электронный ресурс] режим доступа: URL: https://studwood.ru

5. Ахметов С.А., Сериков Т.П., Кузеев И.Р., Баязитов М.И. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа: - учебное пособие.- СПб.: Недра, 2006. - 868 с.

6. Пимерзин А.А. Гидроочистка дизельных фракций на нанесенных сульфидных катализаторах, реализующих эффект спилловера водорода / Сам. гос. технол. ун-т; А.А. Пимерзин. – Самара, 2015. – 127 с.

7. Технологии, продукты и услуги от Axens/ листок-каталог/ 24 с.

8. [Электронный ресурс] режим доступа: URL: https://www.topsoe.com/

УДК 536.3

ЭМИССИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ТИТАНА В ОБЛАСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ТВЕРДОЕ ТЕЛО-ЖИДКОСТЬ

Смирнов Н.А., Ахатова Л.И., Косенков Д.В., Аляев В.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: Dmi-kosenkov@yandex.ru

Передача тепловой энергии эмиссией нашла широкое применение в металлургической промышленности. Для проектирования установок и расчета этого вида теплообмена, необходимы знания эмиссионных характеристик используемых материалов. Теоретические модели [1] и последние экспериментальные исследования в этой области [2-4] дают возможность оптимизировать тепловые процессы и совершенствовать конструкции машин и аппаратов в металлургии.

Количественные расчеты теплообмена излучением невозможны без знания радиационных характеристик конструкционных материалов, в твёрдом и жидком состоянии. Потребность в таких данных возрастает в связи с тем, что интенсификация технологических процессов осуществляется за счет повышения рабочих параметров - температуры и давления. Несмотря на большие успехи, достигнутые в исследовании радиационных свойств веществ, методика их расчетов для твердых тел далека от совершенства

Авторами проведено экспериментальное исследование титана марки ВТ1-00, в котором допускается массовая доля алюминия не более 0,3% в соответствии с ГОСТ 19807-91.

Исследование проводилось на экспериментальном стенде лаборатории кафедры «Вакуумная техника электрофизических установок» ФГБОУ ВО КНИТУ. Конструкция измерительной ячейки и методика проведения эксперимента подробно изложена ранее в [5].

Исследования проведены абсолютным радиационным методом без фокусирующей оптики в температурном диапазоне, ограниченном упругостью пара исследуемого материала

На рис.1 представлены экспериментальные значения интегральной полусферической эмиссионной способности титана в твердом и жидком состоянии, включая область фазового перехода твердое тело-жидкость.

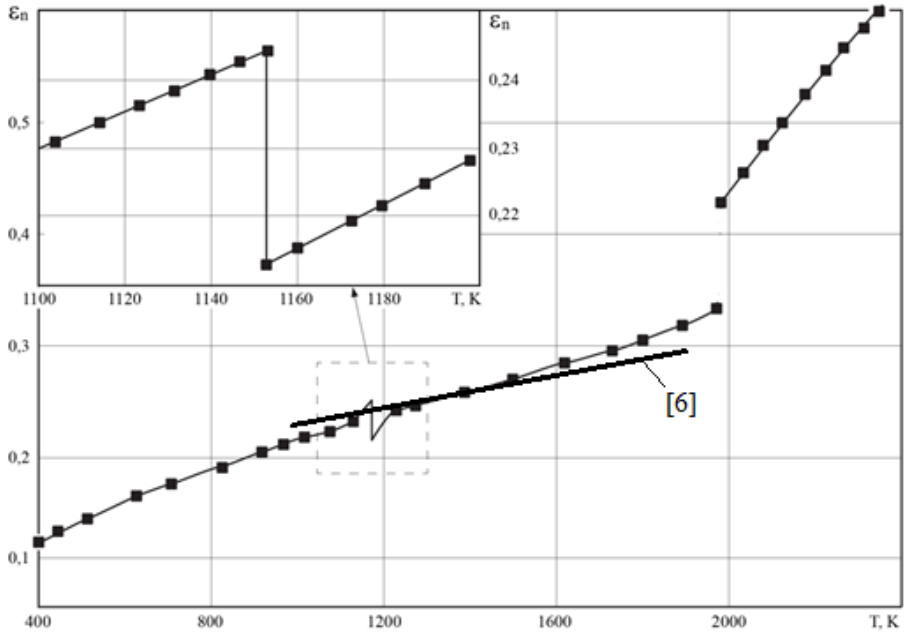


Рис. 1. Нормальная интегральная эмиссионная способность титана, включая фазовые переходы первого и второго рода:
■ – измерения авторов статьи, сплошная линия по [6].

Эмиссионная способность титана в пределах 8% согласуются с данными авторов [6]. При фазовом переходе (Т=1155К) α-титан в β-титан наблюдается скачкообразное изменение эмиссионной способности от температуры. Авторы отмечают, что поведение эмиссионной способности титана при переходе согласуется с поведением электросопротивления титана [7].

Величина эмиссионной способности при плавлении титана ($T_{пл.}$=1943 К) возрастает на 27%.

По результатам работы были сделаны следующие выводы: полученные экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с результатами исследований [6] в пределах оценки погрешности эксперимента; экспериментальное определение эмиссионной способности титана показало уверенный рост и скачкообразное изменение эмиссии при плавлении в рассмотренном температурном диапазоне эксперимента.

Литература:

1. Thermal Radiation Heat Transfer, ed. by R. Siegel, J.R. Howell (Hemisphere publ. corp., Washington, 2000).

2. T. Ishikawa, C. Koyama, Y. Nakata, Y. Watanabe, P.-F. Paradis. J. Chem. Thermodyn., 131, 557 (2019).

3. S. Kumar, S.V. Krishnamurthy, K. Balasubramaniam. 10.21611/qirt.2019.048, (2019).

4. G. Pottlacher, K. Boboridis, C. Cagran, T. Hupf, A. Seifter, ¨ B. Wilthan. AIP Conf. Proceed., 1552, 704 (2013). DOI: 10.1063/1.4819628.

5. В.В. Сагадеев, В.А. Аляев. Излучательная способность жидких металлов и сплавов: монография (Изд-во КНИТУ, Казань, 2018).

6. Shur, B. & Peletskii, V.. (2009). Radiation characteristics of getter materials in the region of a phase transformation. Instruments and Experimental Techniques - INSTRUM EXP TECH-ENGL TR. 52. 148-153.

7. Belskaya, E. & Kulyamina, E.. (2007). Electrical Resistivity of Titanium in the Temperature Range From 290 to 1800 K. High Temperature - HIGH TEMP-ENGL TR. 45. 785-796.

УДК 004.032.26

ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ В ТРУБЕ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ

Мустеева Э. И., Султанов Р. И., Бронская В. В., Харитонова О. С.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: os_kharitonova@mail.ru

Одним из перспективных направлений математического описания процессов химической технологии является нейросетевое моделирование [1-3]. Изучение структуры потоков в аппаратах химической технологии необходимо для качественного и количественного описания взаимовлияющих процессов тепло- и массообмена с целью получения продукта с контролируемыми качественными характеристиками[4-7]. В статье приводится расчет гидродинамики горизонтальной трубы круглого сечения с помощью нейронной сетью в Wolfram Mathematica.

Опытные данные были получены с помощью лабораторной установки – цилиндрической трубы с внутренним диаметром 20 мм, длиной 2,5 м. Для этого импульсно ввели индикатор при расходе $\dot{V} = 0{,}000052$ м/с (ламинарный режим течения).

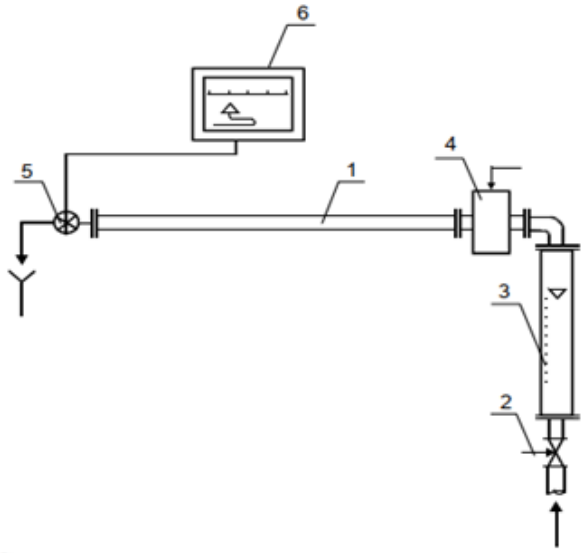


Рис.1 Схема установки для изучения структуры потоков в трубе
1-цилиндрическая труба, 2-вентиль, 3-ротаметр, 4-устройство для ввода индикатора, 5-датчик для ввода индикатора, 6-самописец

В результате мы получаем кривую отклика и в ходе обработки данных переходим к безразмерной функции распределения $f_i^* = f_i^*(\theta_i)$. На основе опытных данных обучили нейросеть в Wolfram Mathematica с функциями активации гиперболического тангенса, который задается как “Tanh”.

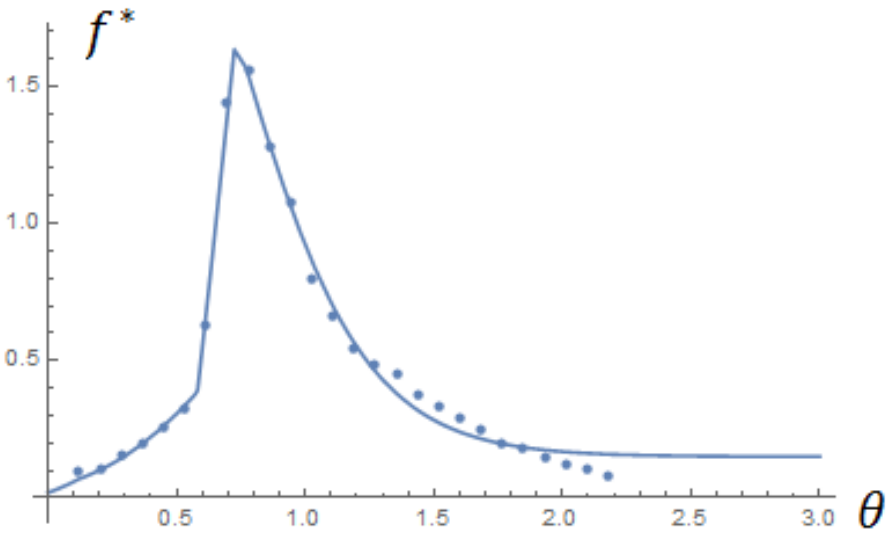


Рис.2. Безразмерная функция распределения $f_i^* = f_i^*(\theta_i)$ (сплошной линией обозначен результат расчета нейросети, а точками – исходная безразмерная функция) с функциями активации “Tanh”

Замена функции “Tanh” на “Ramp” дала более эффективное обучение. Увеличив число эпох обучения в 50 раз, мы получили результат с минимальным отклонением расчетных данных от эксперимента.

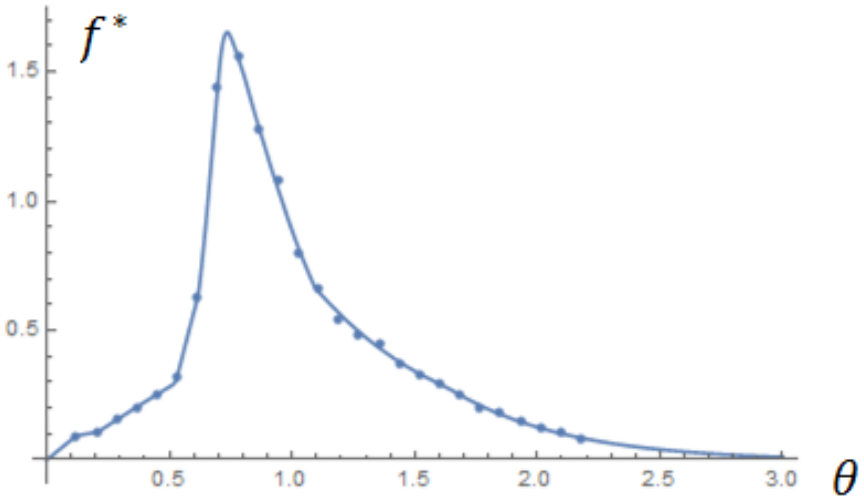


Рис.3. Безразмерная функция распределения $f_i^* = f_i^*(\theta_i)$ (сплошной линией обозначен результат расчета нейросети, а точками – исходная безразмерная функция) с функциями активации “Ramp”.

Таким образом, нейронная сеть является перспективным направлением в описании сложных структур. В дальнейшем планируется усложнение нейронных сетей и распространение их для аппаратов и процессов химической технологии. По выходным данным нейронных сетей можно предсказать оптимальные конструктивные размеры аппаратов.

Литература:

1. Цапаев А.А., Харитонова О.С., Бронская В.В., Володченко Т.В., Мусина Ф.А., Бальзамов Д.С., Игнашина Т.В. Нейросетевая модель процесса утилизации промышленных водных стоков. В сборнике: Приоритетные направления развития науки и технологий. доклады XXVI международной научно-практической конференции. Под общей редакцией В.М. Панарина. 2019. С. 150-152.

2. Ахметова И.Г., Бальзамова Е.Ю., Бронская В.В., Бальзамов Д.С., Лапин К.В., Харитонова О.С. Выбор оптимального типа теплоизоляционной конструкции на основе нейросетевого моделирования. В сборнике: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 92- е заседание семинара учрежденного при ИСЭМ СО РАН. В 3-х книгах. Иркутск, 2020. С. 186-190.

3. Харитонова О.С., Цапаев А.А., Бронская В.В., Игнашина Т.В., Котова Н.В., Шайхетдинова Р.С. Основа системы нейросетевого управления процесса абсорбции. В сборнике: Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. Сборник научных статей по итогам шестой международной научной конференции. 2019. С. 80-81.

4. Аминова Г.А., Мануйко Г.В., Демидова Э.В., Бронская В.В., Игнашина Т.В., Дьяконов Г.С., Суханов А.П. Математическое моделирование процесса синтеза бутадиенового каучука на литийорганической каталитической системе в присутствии толуола и модификатора. Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 4. С. 175-182.

5. Мануйко Г.В., Аминова Г.А., Дьяконов Г.С., Бронская В.В., Исмагилова А.И., Салахова Э.И., Антонова И.О. Моделирование периодического процесса полимеризации бутадиена на модифицированном литиевом катализаторе с учетом изменения его активности. Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 1. С. 76-81.

6. Давыдов А.В., Бронская В.В., Зиннатуллин Н.Х. Гидродинамика тонкопленочного центробежного теплообменника//Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 23. С. 145-147.

7. Аминова Г.А., Мануйко Г.В., Бронская В.В., Игнашина Т.В., Дьяконов Г.С., Башкиров Д.В. Контроль и управление характеристиками бутадиенового каучука на основе молекулярно-массового распределения// Теоретические основы химической технологии. 2009. Т. 43. № 2. С. 218-224.

УДК 665.63

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЫХОДА СВЕТЛЫХ ФРАКЦИЙ НЕФТИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Султанова Л.Р., Харитонова О.С., Костромин Р.Н., Бронская В.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: os_kharitonova@mail.ru

В последние годы, наряду с увеличением объемов переработки нефти и ужесточением требований оценки качества производимых продуктов, также наблюдается тенденция к снижению общезаводских затрат на выпуск продукции. Снизить эти затраты можно путем усовершенствования методов предварительной оценки качественных характеристик подлежащего переработке нефтяного сырья. В связи с этим значительный интерес представляют работы по внедрению методов расчетного определения содержания светлых фракций в нефти без проведения опытов с применением дорогостоящего, занимающего большие площади оборудования. Одним из путей решения данной проблемы является использование нейронных сетей [1-3].

В настоящее время «искусственный интеллект» стремительно внедряется во все сферы нашей жизни. Особенно, это происходит в промышленных отраслях. На территории Российской Федерации имеется множество компаний, которые привыкли работать на устаревших методах контроля и управления производства. Однако, все же есть компании, рискнувшие внедрить искусственный интеллект в промышленный ряды. После внедрения данной технологии компании очень хорошо отзывались и до сих пор отзываются об отличной эффективности работы искусственного интеллекта на производстве.

В основном, внедрение технологий искусственного интеллекта происходит на особо опасных участках заводов и предприятий. Благодаря новым технология, искусственному интеллекту, полнейшей автоматизации, прогнозированию аварийных ситуаций и другим технологиям заводы стали новым источником процветания страны, так как все это способствовало уменьшению риском и угроз жизни и здоровью не только работников предприятий, но и людям в целом.

В добавок, стоит отметить, что применение искусственного интеллекта помимо снижение вероятности происхождения аварийной ситуации, приводит к увеличении выработки готовых продуктов без оптимизации и модернизации производства, к снижению производственных ошибок и, соответственно, повышают качество продуктов и снижение затрат на энергоресурсы.

В качестве экспериментальных значений для обучения нейронной сети использовались справочные данные из источников [4-7]. Были отобраны необходимые для моделирования показатели плотности, вязкости при 50°С и процент

отгона фракций до 350°С для 520 нефтей. Получен обширный массив данных, на основании которого построена зависимость двойного логарифма вязкости ln(lnμ) от выхода фракций, выкипающих до 350°С (рис. 1).

Процесс обучения нейронной сети (рис. 1):

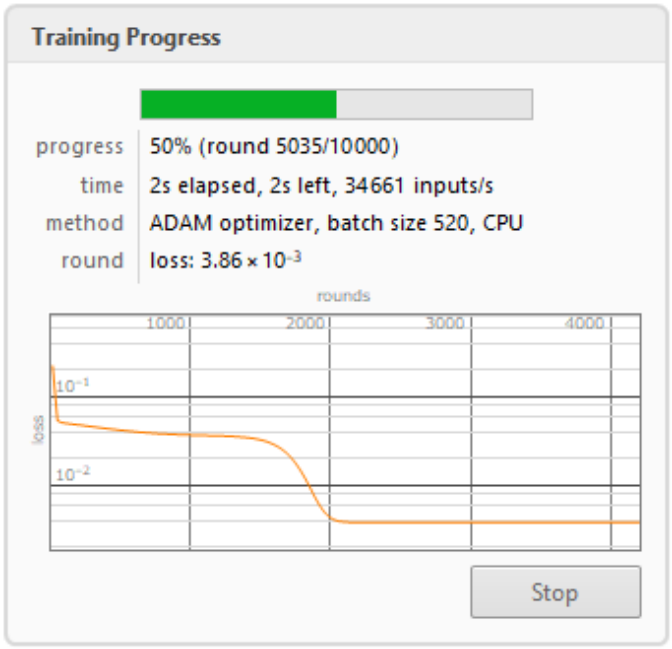


Рис. 1. Процесс обучения нейронной сети

Подход решения представлен в виде полученной зависимости (рис. 2):

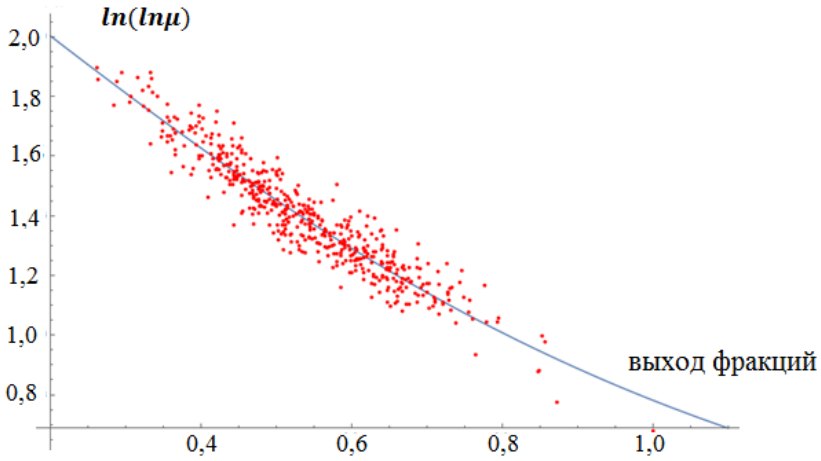


Рис. 2. Зависимость $ln(ln\mu)$ от выхода фракций (экспериментальные данные и результат расчета нейронной сетью)

Нефтяная промышленность - это большая часть экономики России. Данная отрасль в России производят примерно 40% доходов федерального бюджета, 20% ВВП и около 40% поступлений от экспорта нефти и газа. Все это говорит о зависимости российской экономики от нефти и углеводородных продуктов, а искусственный интеллект и цифровые инновационные технологии способны

увеличить прибыть нефтяных предприятия и компании. В работе приводится пример возможностей применения нейронных сетей в области нефтехимии, которые способны после своего обучения на порядок повысить точность получаемых на выходе данных. Полученные результаты в дальнейшем будут использованы для прогнозирования потенциального содержания светлых фракций в нефтях.

Литература:

1.Цапаев А.А., Харитонова О.С., Бронская В.В., Володченко Т.В., Мусина Ф.А., Бальзамов Д.С., Игнашина Т.В. Нейросетевая модель процесса утилизации промышленных водных стоков. В сборнике: Приоритетные направления развития науки и технологий. доклады XXVI международной научно-практической конференции. Под общей редакцией В.М. Панарина. 2019. С. 150-152.

2.Ахметова И.Г., Бальзамова Е.Ю., Бронская В.В., Бальзамов Д.С., Лапин К.В., Харитонова О.С. Выбор оптимального типа теплоизоляционной конструкции на основе нейросетевого моделирования. В сборнике: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 92- е заседание семинара учрежденного при ИСЭМ СО РАН. В 3-х книгах. Иркутск, 2020. С. 186-190.

3.Харитонова О.С., Цапаев А.А., Бронская В.В., Игнашина Т.В., Котова Н.В., Шайхетдинова Р.С. Основа системы нейросетевого управления процесса абсорбции. В сборнике: Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство. Сборник научных статей по итогам шестой международной научной конференции. 2019. С. 80-81.

4. Дриацкая З. В., Ивченко Е. Г., Лазарева И. С. Нефти СССР. Справочник: в 4-х т. М.: Химия, 1971. Т-1: Нефти северных районов Европейской части ССР и Урала. – 504 с.

5. Дриацкая З. В., Олейникова А. П., Лазарева И. С. Нефти СССР. Справочник: в 4-х т. М.: Химия, 1972. Т-2: Нефти Среднего и Нижнего Поволжья. – 392 с.

6. Дриацкая З. В., Лазарева И. С, Журба А. С. Нефти СССР. Справочник: в 4-х т. М.: Химия, 1973. Т-3: Нефти Кавказа и западных районов Европейской части СССР. – 616 с.

7. Дриацкая З. В., Лазарева И. С, Ходжаев Г. Х. Нефти СССР. Справочник: в 4-х т. М.: Химия, 1974. Т-3: Нефти Средней Азии, Казахстана, Сибири и о. Сахалин. – 792 с.

УДК 004.942: 62-408.8

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА

Фомин С.Л., Сабанаев И.А.
Нижнекамский химико-технологический институт,
E-mail: sabanaevia@nchti.ru

Пассивные методы интенсификации теплообмена уже достаточно давно используются на практике [1-3]. Представляет интерес, как на основе опытных данных и математического моделирования можно оценить эффективность того или иного способа. В статье приводятся результаты исследования, выполненные по этой проблеме в рамках работы над магистерской диссертацией. Опытная установка построена из доступных материалов, сантехнических запасных частей и бытовых приборов, таких как электрический фен, аквариумный насос, электронный термометр, мультиметр с возможностью подключения термопар. Математическая модель представляет собой математическое описание обратной задачи теплопроводности, требующая решения относительно коэффициентов теплоотдачи путем подгонки расчетных температур под график роста измеренных температур на стенках внутренней трубы модели теплообменного аппарата типа «труба в трубе».

Для оценки интенсивности теплообмена для того или иного интенсификатора, на основе которого реализована дискретная шероховатость, рассчитывается коэффициент теплопередачи путем измерения коэффициентов теплоотдачи на обеих поверхностях внутренней трубы, выполненной из полипропилена. Выбор материала обусловлен его доступностью, простотой сварки и низкой теплопроводностью, которая в данном случае – случае моделирования, играет положительную роль, позволяя получать большие разности температур на стенках. Указанные температуры измеряются с помощью термопар из тонких проводов, которые вплавляются в стенки трубы во время соединения (рис. 1). Схема опытной установки для исследования влияния различных интенсификаторов на процесс теплообмена, показана на рисунке 2. Диаметр полипропиленовой трубы – 25 мм. Наружная труба – сантехническая труба диаметром 50 мм. В межтрубное пространство нагнетается горячий воздух. Для варианта интенсификатора, показанного на рисунке 1, можно оценить влияние на результат шага S и высоты выступов h. Рисунок 1 схематичен, т.к. реальные профили шероховатости при пайке труб получаются более грубыми и прямоугольными.

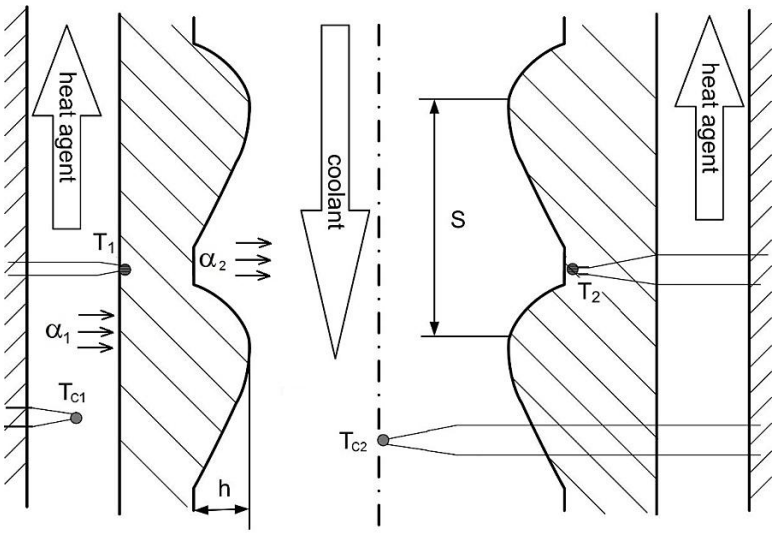


Рис. 1 - Схема установки термопар в распечатанный сегмент

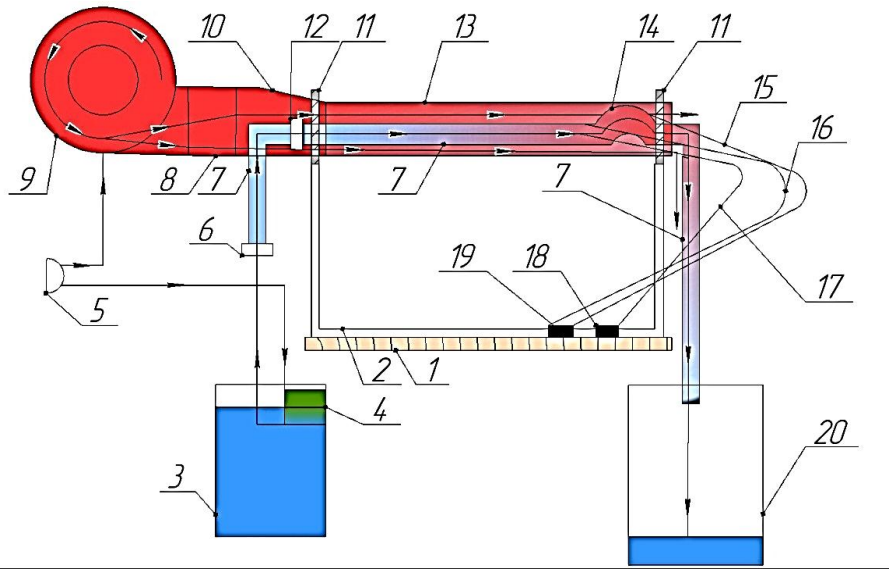


Рис. 2 - Схема модели теплообменника: 1- стол; 2- станина; 3- емкость с теплоносителем; 4- насос ; 5- источник питания; 6- муфта; 7- полипропиленовая труба Ø20 мм.; 8- муфта канализационная Ø110 мм. ; 9- вентилятор для горячего воздуха; 10- переход с Ø110 мм. на Ø50 мм.; 11- хомут; 12- муфта- американка; 13- наружная труба Ø50 мм.; 14- гидрозатвор; 15,16,17- датчик температуры; 18, 19- мультиметр; 20- емкость для слива воды

Для определения величины коэффициентов теплоотдачи на поверхностях трубы α_1 и α_2 решается обратная задача теплообмена, суть решения которой состоит в восстановлении расчетного профиля температур по известным $T_1(\tau)$ и $T_2(\tau)$ – измеренным с помощью термопар значениям в заданных точках $r = R_1$, $r = R_2$.

Математическая модель задачи в форме дифференциального уравнения в цилиндрической системе координат, граничных и начального условий, в размерном виде записывается в идее системы уравнений (1):

$$\begin{cases} \rho c \dfrac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\dfrac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \dfrac{1}{r} \dfrac{\partial T}{\partial r} \right) \\ \lambda \dfrac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=R_2} = -\alpha_2 \left[T_{C2} - T_2 \right] \\ \lambda \dfrac{\partial T}{\partial r}\Big|_{r=R1} = \alpha_1 \left[T_{C1} - T_1 \right] \\ T\Big|_{\tau=0} = T_0 = T_{C1} \end{cases} \tag{1}$$

где c, ρ, λ – теплофизические характеристики материала стенки трубы.

При решении задачи граничные условия математической модели (1) формируются путем аппроксимации опытных кривых $T_1(\tau)$ и $T_2(\tau)$ полиномом второй степени и последующим дифференцированием полученных регрессионных моделей. Основное уравнение решается методом конечноразностной аппроксимации. Приближение к опытным данным проводится методом дихотомии. Признаком окончания итераций служит минимальное значение F-критерия, рассчитываемого по дисперсии регрессионной модели и дисперсии решения численным методом.

В уравнении теплопроводности производится разложение второй производной по толщине стенки в центральную разность (ЦР), первую производную по времени в левую разность (ЛР), первую производную по толщине стенки – в правую разность (ПР):

$$\frac{T^j - T^{j-1}}{\Delta t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \left(\frac{T_{i+1}{}^j - 2T_i^j + T_{i-1}{}^j}{\Delta r^2} \right) + \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{1}{r} \cdot \left(\frac{T_{i+1}{}^j - T_i^j}{\Delta r} \right) \tag{2}$$

По известным температурам из граничных условий можно вычислить коэффициенты теплоотдачи:

$$\alpha_2 = \frac{\lambda \left(T_{i=2}^{j=m} - T_{i=1}^{j=m} \right)}{\Delta r \left(T_{i=1}^{j=m} - T_{c2} \right)} \tag{3.1}$$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda \cdot \left(T_{i=n}^{j=m} - T_{i=n-1}^{j=m} \right)}{\Delta r \left(T_{c1} - T_{i=n}^{j=m} \right)} \tag{3.2}$$

Расчет выполняется с помощью специально разработанной программы «РасчетТО». Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии получаются в результате интерполяции исходных данных, полученных с датчиков температуры, с помощью полиномов от второй до шестой степени (рис. 3).

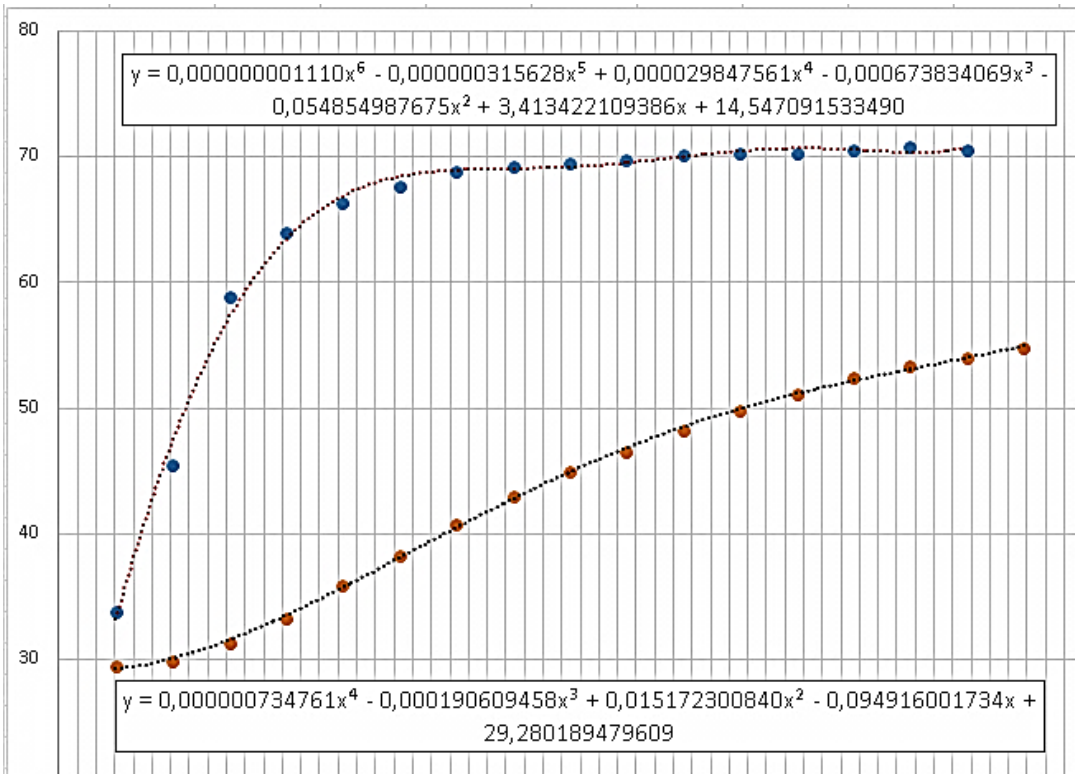


Рис. 3 - Интерполяция опытных данных с термопар полиномами

Полученные значения коэффициентов уравнения регрессии вводятся в соответствующие поля табличного процессора и, в последующем, считываются программой «РасчетТО». Вывод результатов моделирования производится в новый файл табличного процессора.

Литература:

1. Яруллин Р.Р., Сабанаев И.А. Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. №23. С. 121-123.

2. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена: монография / И.А. Попов, Х.М. Махянов, В.М. Гуреев. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 560 с.

3. В.Н. Белозерцев, В.В. Бирюк. Интенсификация теплообмена: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. – 208 с.

УДК 662.76

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОРАЗБРЫЗГИВАЮЩЕЙ КАСКАДНОЙ ФОРСУНКИ УДАРНОГО ТИПА

Фролагин М.Ю., Хоменко А.А., Фахретдинов М.Ф.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

Водоразбрызгивающие форсунки (сопла) – это приспособления для распыления жидкости или газа.

В промышленности форсунки нашли применение в башенных градирнях для распыления выходящей из водораспределительной системы воды для увеличения площади орошения и максимального охлаждения [1].

По принципу действия различают следующие типы форсунок градирен: центробежные, струйно-винтовые и ударные [2].

К центробежным соплам относятся тангенциальные и эвольвентные. Принцип работы центробежной форсунки состоит в том, что жидкость, получившая интенсивное вращение в камере закручивания, вытекает из сопла в виде тонкой пленки, образующей полый конус. Пленка под влиянием окружающей газовой среды и других возмущений распадается на капли и оседает на оросительное устройство градирни.

Струйно-винтовые форсунки - раструбные и цельнофакельные – похожи по принципу действия на центробежные. Основным отличием является то, что жидкость получает вращение благодаря специальному элементу – завихрителю, установленному внутри сопла.

Самое же большое количество разновидностей форсунок относится к ударному типу. Принцип действия такого сопла довольно прост – разбрызгивание воды происходит при ударе струи об отражатель. К ударному типу относятся форсунки с чашечным отражателем, сопла с зубчатым отражателем, каскадные.

Основные требования:

- эффективный факел разбрызгивания и равномерное распределение воды по всей площади орошения;
- малое гидравлическое сопротивление;
- оптимальный размер капель;
- стойкость к механическим, химическим и другим воздействиям;

Остановимся на соплах ударного типа. В качестве примера рассмотрим каскадную форсунку (рис.1).

Конструкция данного сопла достаточно проста: несколько чашек – рассекателей прикреплены к резьбовому патрубку при помощи трех направляющих из

металла. Форсунки каскадные трехтарельчатые хорошо разбрызгивают воду при установке как вверх каскадами, так и вниз.



Рисунок 1 – Форсунка каскадная ударного типа

Принцип работы форсунки: вода разбивается чашками на несколько соосных кольцевых сегментов, которые перекрывают значительную площадь тонким слоем воды, уменьшая неравномерность орошения и увеличивая проток. Размер капель составляет 2-3 мм в диаметре.

Построим математическую модель каскадной форсунки по заданным геометрическим размерам и расходу воды на входе. И сравним с экспериментом (рис.2).

Для построения трехмерной модели (рис.3) используем программу КОМПАС-3D. Геометрические параметры взяты из паспорта на модель данного типа форсунки.

Для расчета используем программу Particleworks.

Для начала импортируем 3Д модель в программу, задаем параметры на входе в частности расход равный 9м^3/ч (взят по паспорту); граничные условия; параметры рабочей жидкости – плотность (1000 кг/м^3), молярную массу, кинематическую вязкость (1е-6 м^2/с), силы поверхностного натяжения (0,072 Н*м), удельная теплоемкость (4200 Дж/кг*к), теплопроводность (0,6 Вт/ м*К). Задаем направление расхода воды и гравитации. Настраиваем рабочую область. Задаем временные параметры для расчета, корректируем визуализацию результата.

Запускаем расчет. Рассчитанная модель вышедшая на режим представлена на рисунке 4.



Рисунок 2 – Форсунка каскадная ударного типа эксперимент

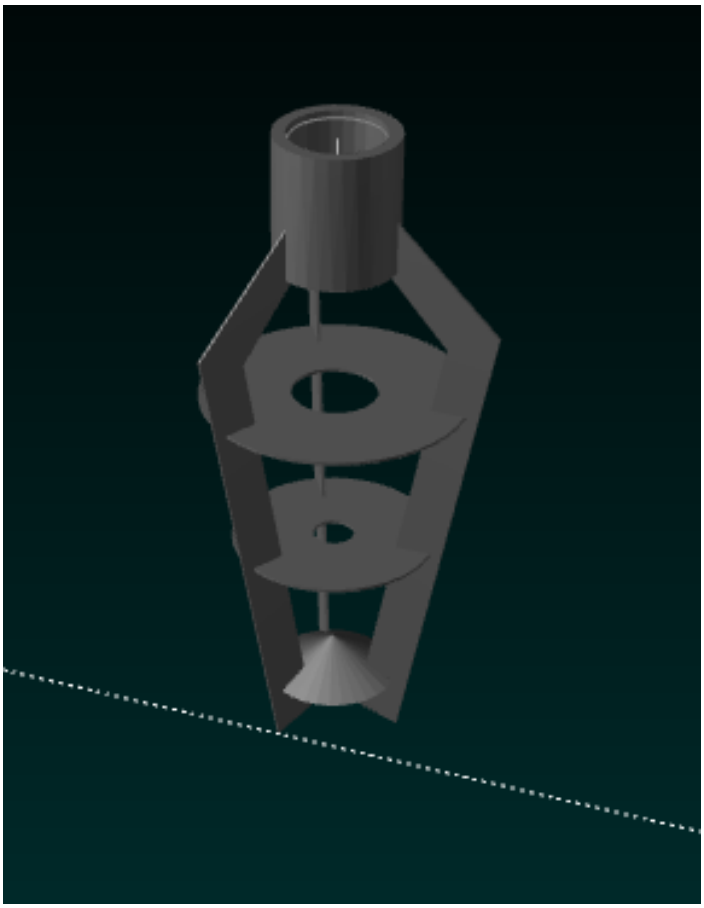


Рисунок 3 – Форсунка каскадная ударного типа 3Д модель

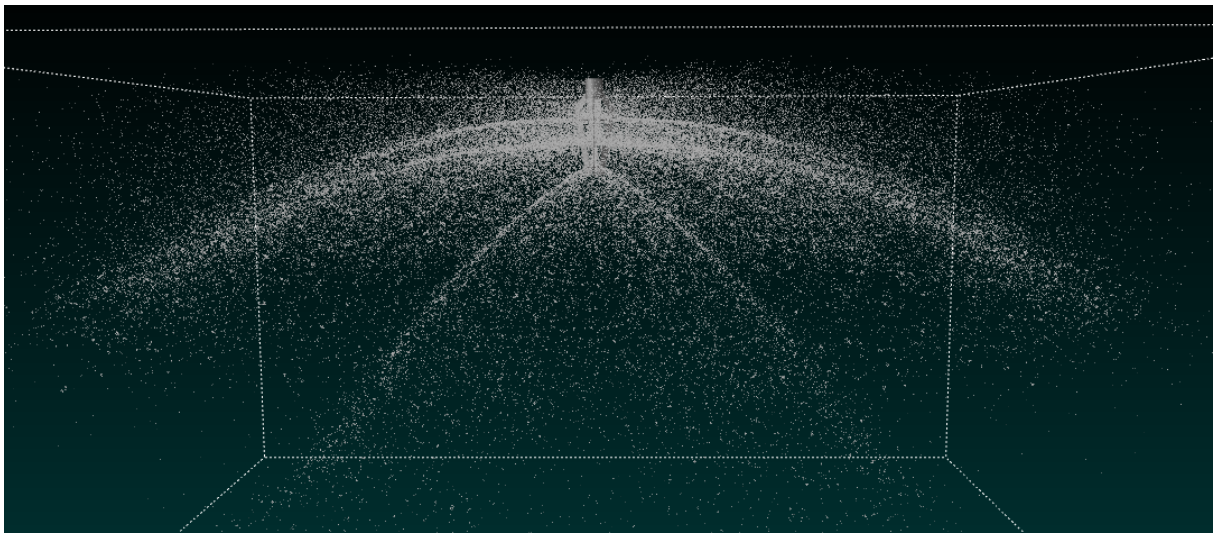


Рисунок 4 – Форсунка каскадная ударного типа математическая модель

Проанализируем получившийся результат. Входящий поток воды с заданным расходом 9м^3/ч истекает из входного патрубка соударяется с первой чашей и разделяется на два потока: один – стекает по поверхности чаши, вектор скорости направлен по ее радиусу; второй проходит через отверстие в ней и имеет скорость направленную по оси форсунки. Второй поток соударяется со второй ступенью, где происходит аналогичная картина. Далее поток, проходящий по оси форсунки соударяется с третьей ступенью, представляющей собой конус, и стекает по нему с углом, равным углу его образующей.

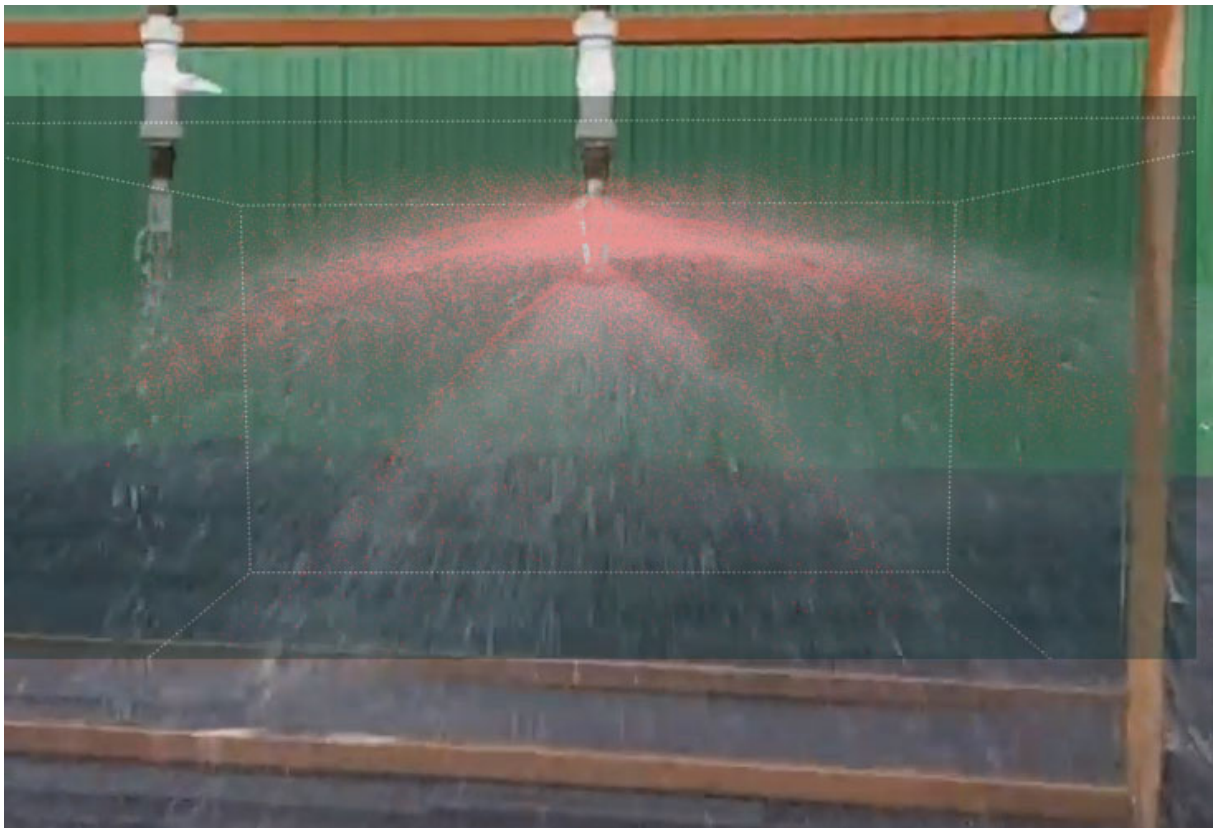


Рисунок 5 – Сравнение эксперимента и математической модели

Угол распыления первой и второй ступени примерно 160 градусов, третьей – примерно 90. Поток воды однородный, плотный, равномерный и охватывает большую площадь. Угол распыления в эксперименте первой и второй ступени также примерно 160 градусов, третьей – примерно 90. Сравнение реального эксперимента и модели представлены на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что распыление воды форсункой, представленной математической моделью (отмечено красным цветом), полностью совпадает с экспериментальным.

Литература:

1. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М: Химия, 1984. – 248с.

2. Пажи Д. Г., Галустов В.С. Распылители жидкостей. М: Химия, 1979. – 216с.

3. Форсунка каскадная из нержавеющей стали [Электронный ресурс]: НПО Агростройсервис. – Режим доступа: https://acs-nnov.ru/forsunka-kaskadnaya.html (дата обращения: 12.04.2022).

4. Некоторые аспекты обеспечения промышленной безопасности опасных объектов. Имитационное моделирование / В. А. Алексеев, С. И. Валеев, С. А. Вилохин [и др.] ; Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань : Фэн, 2020. – 128 с.

УДК 66-911

МИКРОРЕАКТОРЫ ПРОТОЧНОГО ТИПА

Теляков Э.Ш., Харитонова А.И., Хоменко А.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: ariadna.haritonov@yandex.ru

Одним из очень важных направлений развития современной химической технологии является так называемая интенсификация химико технологических процессов. Такая интенсификация подразумевает существенное сокращение размеров оборудования, в том числе и реакторов.

В этой связи и возникает интерес к таким микроструктурированным устройствам как микрореакторы. Данный вид аппаратов обладают существенными преимуществами перед традиционными аппаратами, особенно при использовании в малотоннажных производствах.

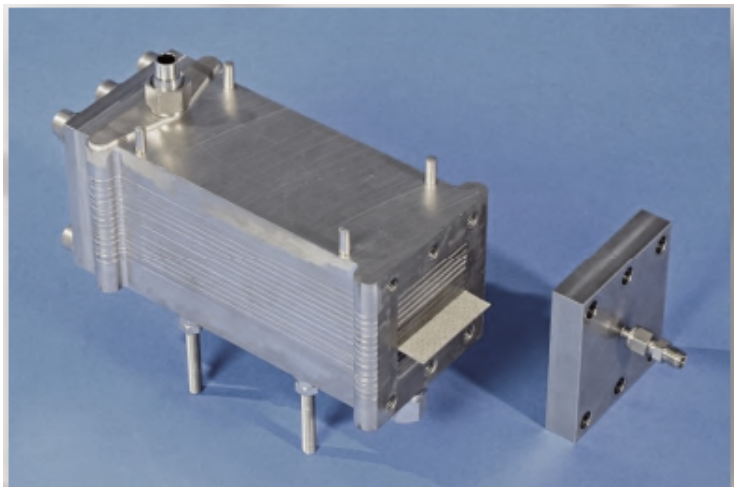


Рис. 1 – Блочный универсальный микрореактор

Отсутствие продукции малотоннажной химии во многом сдерживает развитие средне- и крупнотоннажных производств, химическая промышленность влияет на всю промышленную отрасль в целом и стратегически важна для государства.

Сегодня зависимость от зарубежных поставщиков малотоннажного сырья «просто катастрофическая». Кроме того, развитие малотоннажной химии лежит в основе «зелёной химии», предполагающей практически безотходное производство.

Микрореакторные системы представляют собой аппараты непрерывного действия с микрореакторами объемом от микролитров до миллилитров и длиной от микрометров до миллиметров. Характеризуются малыми объёмами реакционного пространства, высокими скоростями протекания реакций, более точным

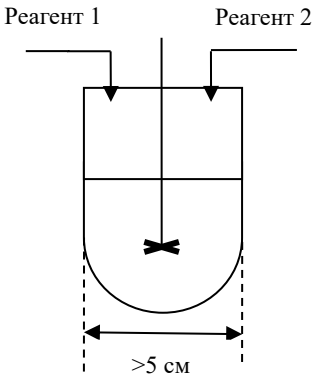


Рис. 2 - объемный реактор

- Классический реактор;
- Турбулентное смещение в объеме;
- Соотношение площади контакта к объему реакционной смеси максимально 100 м^2/м^3;

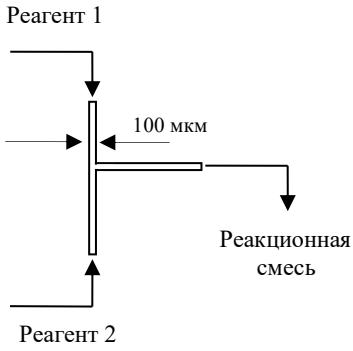


Рис. 3 - проточный реактор

- Реактор идеального смешения и вытеснения;
- Ламинарное смешение в потоке;
- Соотношение площади контакта к объему реакционной смеси от 10000 до 50000 м^2/м^3;

контролем параметров процесса (температура, давление) в силу малой инерционности, а также малыми диффузионными путями молекул, что значительно ускоряет процессы массопереноса. Небольшой размер микрореакторов обуславливает ламинарное течение внутри каналов и обратно пропорциональную зависимость коэффициента теплопередачи от диаметра. Ламинарный характер течения потока, является прямым следствием самоперемешивания[1].

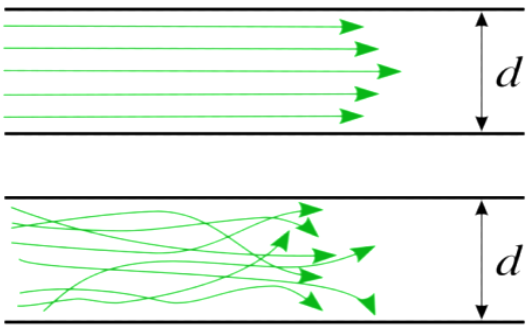


Рис. 4 - Ламинарное и турбулентное течение потока

Высокий коэффициент теплопередачи позволяет эффективно осуществлять быстрый нагрев или охлаждение, поддерживая изотермические условия реакции во всех точках системы.

Скорость теплообмена прямо пропорциональна площади поверхности, предопределяя ключевую роль на несколько порядков более высокой площади контакта микроструктурных реакторов.

Отвод теплоты реакций, особенно быстропротекающих или сильно экзотермических, является самой серьёзной проблемой при масштабировании процессов.

Так как коэффициент теплообмена обратно пропорционален диаметру канала, в микроструктурных реакторах достигаются значения до 10 Вт/м·К, которые намного выше традиционных теплообменников.

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (1)$$

Nu - число Нуссельта

λ - коэффициент теплопроводности жидкости при средней температуре, Вт/(м·град);

d - эквивалентный диаметр;

Кроме теплопередачи, также и массопередача довольно эффективна, что позволяет уменьшить влияние массопереноса на скорость реакции и изучать так называемые быстрые процессы, исследование которых в стандартных лабораторных реакторах представляет значительные трудности[2].

Таким образом, микроразмеры капилляров обуславливают возможность использования таких реакторов и для работы под высоким давлением.

Все вышеперечисленные факторы определяют кинетику реакций:

- площадь контакта,
- теплообмен,
- температура,
- давление

Современные микрореакторные системы имеют возможность подключения к персональному компьютеру, программное обеспечение которого позволяет в полном автоматическом режиме контролировать и регулировать процесс.

Центральным элементом системы являются микроканальные пластины (чипы) с катализатором – микрореакторный узел или их система. Помимо микрореакторного узла основополагающим является использование насосных модулей, поскольку создаваемое механическое нагнетание может вызывать пульсирующий поток, что может быть невыгодным [3].

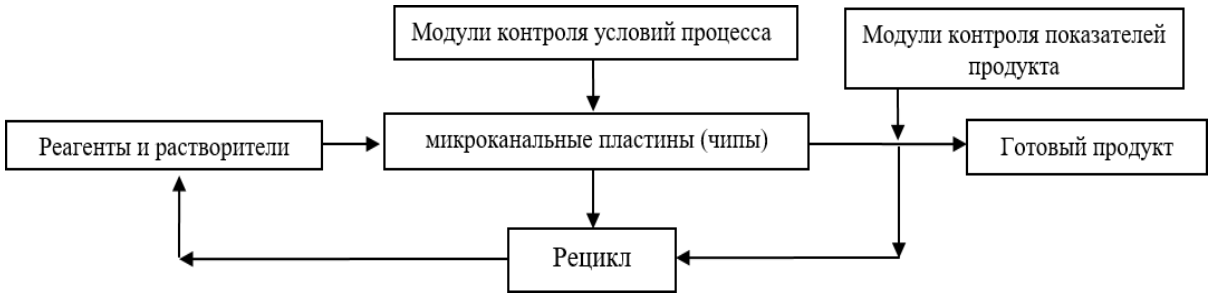


Рис. 5 – Принципиальная схема микрореакторной системы

В качестве модулей контроля условий процесса могут быть использованы блоки, обеспечивающие нагрев или охлаждение, воздействие электромагнитного или микроволнового, ультразвукового УФ-излучения, а в качестве модулей

контроля показателей продукта - установки высокоэффективной жидкостной хроматографии, спектрофотометры, микроскопы и др.

Как мы выяснили микрореакторы состоят из набора микроканальных пластин (МКП) с каналами субмиллиметровых размеров. Он может включать системы жидкость-жидкость, а также системы твердое тело-жидкость, например, стенки каналов, покрытые гетерогенным катализатором. Необходимо отметить, что микрореакторы, как правило плохо переносят твердые частицы, часто забиваясь.

В случае гетерогенного катализа остается сложной задача нанесения активной фазы (возможны неравномерность покрытия, неравномерное распределение металла на подложке, слабое закрепление катализатора и его дезактивация).

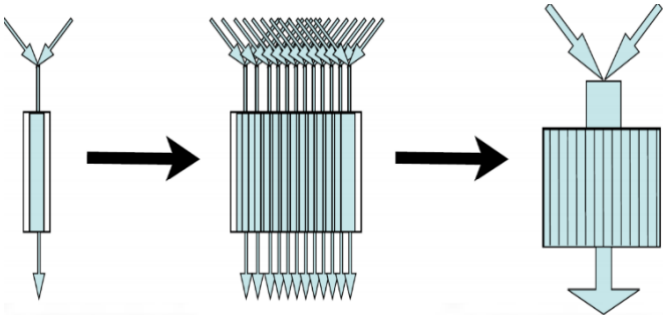


Рис. 6 – Наглядное увеличение производительности микрореакторов

Микроканальные пластины (МКП) являются носителями каталитически активного компонента и их обычно изготавливают из материалов с высокой теплопроводностью.

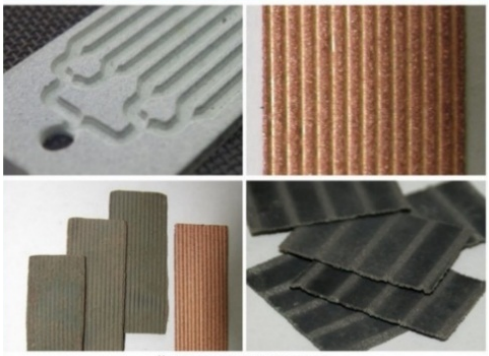


Рис. 7 - Микроканальные пластины (чипы) с катализатором

Пластины могут различаться размерами и геометрией соединений каналов, свойствами поверхности и типом материалов подложки.

Поэтому проектирование и изготовление микрореакторов требует решения ряда проблем, связанных с выбором МКП:

- оптимизацией размещения МКП в микрореакторе;
- разработкой способов нанесения и акрепления катализатора на МК носителе с высоким коэффициентом теплопроводности;

К настоящему времени накоплен определенный опыт в части проектирования и конструирования реакторов проточного типа, однако систематизация этого опыта далеко не завершена. Истинный потенциал микропроцессорной технологии для интенсификации процессов еще не полностью ясен и требует активного изучения и развития методических и технологических принципов проектирования микрореакторнной техники и технологии.

Важным преимуществом реакторов проточного типа является практически полное исключение проблемы масштабирования реакторов этого типа, при изменении не только производительности единичного производства, но и кинетических закономерностей протекания для родственных процессоров.

Из этого следует, что применение реакторов данного типа позволяет совместить стадии предпроектных исследований, разработки эскизных и рабочих проектов. При этом резко сокращается время на освоение новых производств химических и биохимических, а также фармакологических продуктов (например, противоэпидимичисеких вакцин).

Литература:

1. K. Eric Drexler “Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology”, Anchor Books, New York, USA 1986.

2. Абиев Р.Ш./ Современное состояние и перспективы применения микротехники в химической промышленности// Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им.Д.И. Менделеева), 2011. №1-С1-3.

3. Вагин В.А., Абиев Р.Ш./ Исследование гидродинамики двухфазного течения и массопереноса в микрореакторе зигзагообразной формы//Вестник технологического университета. – 2018. №1-С78-81.

4. Абиев Р.Ш., Светлов С.Д./ Устройство для диспергирования в жидкости капель или пузырей в микроканалах и способ его эксплуатации. Патент РФ № 2614283. Заявл. 15.02.2016. Опубл. 24.03.2017 Бюл. № 9

УДК 66.03.081

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ И ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА РАВНОВЕСНЫХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ: ЭТАНОЛАМИНОГО РАСТВОРА - H2S – CO2

Осипов Э.В., Харитонова А.И., Хоменко А.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: ariadna.haritonov@yandex.ru

В мировой практике наибольшее распространение для сероочистки углеводородного сырья нашли процессы этаноламиновой очистки.

Амины характеризуются высокой поглотительной способностью. Из всех применяемых веществ только они способны удалить из газа 99,9% сероводорода.

К этаноламинам, которые применяются в классических методах химической очистки газа от сероводорода и углекислоты с 1930г., относятся:

- Моноэтаноламины (МЭА)
- Диэтаноламины (ДЭА)
- Триэтаноламины (ТЭА)

Причем вещества с приставками моно- и ди- устраняют из газа H_2S и CO_2, а вот третий вариант помогает удалить лишь сероводород.

Процессы этаноламиновой очистки газов от кислых примесей относятся к наиболее характерным примерам хемосорбционных процессов. В этих процессах имеет место обратимая химическая реакция, протекающая с достаточно высокой скоростью.

При нормальных и пониженных температурах, идет прямая реакция (связывание кислых компонентов в комплексы, молекулами аминов), а при повышенных – обратная реакция (разрушение комплексов с выделением H_2S и CO_2).

Отсюда, делаем вывод, что большое влияние на процесс, оказывает кинетика массообмена и кинетика химической реакции. Поэтому, строгое описания процесса предполагает использование кинетических моделей. Однако, в математическое описание в этом случае приходится вносить целый ряд допущений и ограничений, что существенно снижает достоинства подхода [1].

По отмеченным причинам, в практике большое распространение нашли модели, описывающие этот процесс, как чисто физического массопереноса, хотя химическое взаимодействие между этаноламинами и H_2S косвенно учитывается в информации о парожидкостном равновесии, которая является необходимой частью описания процесса на основе кинетических закономерностей.

Таким образом, исследование данной темы, опирается на принципиальное влияние описания парожидкостного равновесия исследуемой системы и

надежности полученных результатов, которые отражаются на дальнейшем моделирования процесса при любой постановке задачи.

К настоящему времени в литературе опубликовано достаточно обширный материал по паро(газо)-жидкостному равновесию в системах [2-4]:

H_2S-ЭА-H_2O, CO_2-ЭА-H_2O, H_2S-CO_2-ЭА-H_2O

Данные различных авторов получены для этаноламинов различной чистоты и в разной области параметров технологического режима. Простая интерполяция или экстраполяция этих данных зачастую приводит к существенным ошибкам. Подходы к обобщению опытных данных также противоречивы и не всегда теоретически обоснованы.

Наибольший интерес представляет уравнение, описывающее равновесие с позиции закона действующих масс для электролитов [3]:

$$P_{H2S} = \frac{K_w}{k_{1c} \cdot k_i \cdot H} \cdot \frac{\gamma^2}{a \cdot} \cdot \frac{[H\bar{S}][RNH3]}{[RNH_2]} \qquad (1.1)$$

P_{H2S} – Давление H_2S над раствором (мм.рт.ст.);

K_W – Константа равновесия диссоциации воды (моль);

K_{1C} – Константа равновесия диссоциации H2S (моль);

K_i – Константа равновесия ионизации этаноламина (моль);

H – Константа Генри для системы H_2S-$_{H2O}$ (моль/1000 г H_2O мм.рт.ст);

δ – Мольная доля для воды в растворе;

α–Коэффициент, учитывающий активность свободного ЭА по сравнению с водой;

γ - Средний коэффициент активности ионов;

$[H\bar{S}]$, $[RN_3^+]$, $[RNH_2]$ – концентрация гидросульфидинов, ионизированного и свободного ЭА [моль/моль].

Уравнение (1.1) может быть выраженно через общую концентрацию сероводорода – X [моль H_2S/моль МЭА] и общую концентрацию этаноламина – [моль ЭА/1000г H_2O]:

$$P_{H2S} = \frac{K_W}{K_{1C} \cdot K_i \cdot H} \cdot \frac{\gamma^2}{a \cdot \delta} \cdot \frac{m \cdot X^2}{1 - X} \qquad (1.2)$$

Указанные зависимости удовлетворительно описывают конкретные экспериментальные данные, но не могут претендовать на широкое обобщение.

Поэтому, нами предпринята попытка описать равновесные свойства системы в широком диапазоне изменения составов, температур и концентрации растворов МЭА и ДЭА. Для этого были проанализированы экспериментальные точки.

В качестве базового описания были выбраны уравнения (1.1) - (1.2).

Было учтено, что при высоком уровне насыщения раствора диоксидуглеродом (>0,25 моль CO_2/моль ЭА) необходимо учитывать концентрацию гидрокарбонат ионов [HCO_3^-].

Поэтому уравнение (1.2) было приведено к виду:

1. Для интервала $0 \leq \sum X_i \leq 0.25$

$$P_{H2S} = \frac{K_W \cdot \gamma^2 \cdot m}{K_i \cdot K_{1C} \cdot H_{H2S} \cdot \alpha \cdot \delta} \cdot \frac{X_{H2S} \cdot (X_{H2S} \cdot X_{CO2})}{(1 - X_{H2S} - 2X_{CO2})} \quad (1.3)$$

$$P_{CO2} = \frac{\gamma^2}{K_M \cdot a^2 \cdot \delta^2} \cdot \frac{X_{CO2} \cdot (X_{H2S} + X_{CO2})}{(1 - X_{H2S} - X_{CO2})^2} \quad (1.4)$$

2. Для интервала $0.25 \leq \sum X_i \leq 0.7$

$$P_{H2S} = \frac{K_W \cdot \gamma^2 \cdot m}{K_i \cdot K_{1C} \cdot H_{H2S} \cdot \alpha \cdot \delta} \cdot \frac{X_{H2S} \cdot (X_{H2S} \cdot X_{CO2})}{(\frac{[HCO_3^-]}{m} + 1 - X_{H2S} - 2X_{CO2})} \quad (1.5)$$

$$P_{CO2} = \frac{\gamma^2}{K_M \cdot a^2 \cdot \delta^2} \cdot \frac{(X_{CO2} - \frac{[HCO_3^-]}{m}) \cdot (X_{H2S} + X_{CO2})}{(\frac{[HCO_3^-]}{m} + 1 - X_{H2S} - X_{CO2})^2} \quad (1.6)$$

$$\frac{[HCO_3^-]}{m} = \sqrt{(\frac{\frac{K_1}{\alpha \cdot m} + 1 - X_{H2S} - 2X_{CO2}}{2})^2 + \frac{K_i \cdot X_{CO2}}{\delta \cdot m}} - \frac{\frac{K_i}{\alpha \cdot m} + 1 - X_{H2S} - 2X_{CO2}}{2} \quad (1.7)$$

Расчет коэффициентов:

$$lg_{K_W} = -5736.4/\mathrm{T} + 59.953 - 22.108lgT \quad (1.8)$$

$$lg_{K_{1C}} = -3171.9/\mathrm{T} + 43.673 - 16.167lgT \quad (1.9)$$

$$lg_{H_{H2S}} = 4252.2/\mathrm{T} - 79.265 + 24.712lgT \quad (1.10)$$

$$lg_{Ki^{\text{МЭА}}} = -1691.7/\mathrm{T} + 5.854 - 0.0157lgT \quad (1.11)$$

$$lg_{Ki^{\text{ДЭА}}} = -3286.9/\mathrm{T} + 14{,}416 - 0{,}0287T \quad (1.12)$$

$$lg_{Km^{\text{МЭА}}} = -15.55 + 4762/\mathrm{T} \quad (1.13)$$

$$lg_{Km^{\text{ДЭА}}} = -13.31 + 3595/\mathrm{T} \quad (1.14)$$

$$K_1 = K_i \cdot K_{1y} \cdot H_{CO2}/K_W \cdot K_M \quad (1.15)$$

$$K_y \cdot 10^7 = -25 + 0.1639T - 0.000219T^2 \quad (1.16)$$

$$lg_{H_{co2}} = 2711.5T - 47.241 + 13.657lgT \quad (1.17)$$

$$m = \frac{1}{\rho/_N - \text{МЭА}/_{1000}} \quad (1.18)$$

$$-lg_{\gamma^{\text{МЭА}}} = 0.561 \cdot \frac{\sqrt{\mu}}{1+\sqrt{\mu}} + 0.0118\mu \quad (1.19)$$

$$-lg_{\gamma^{\text{ДЭА}}} = 0.610 \cdot \frac{\sqrt{\mu}}{1+\sqrt{\mu}} + 0.0260\mu \quad (1.20)$$

$$\alpha = 1 - 0{,}4 \cdot m_C \text{ при } m_c < 0.3$$
$$\alpha = 0.872 \text{ при } m_c \geq 0.3 \text{ для МЭА} \quad (1.21)$$

$$\alpha = 1 - 0{,}039 \cdot m_C \text{ при } m_c < 0.3$$
$$\alpha = 0{,}862 \text{ при } m_c \geq 0.3 \text{ для ДЭА} \quad (1.22)$$

$$m_c = m(1 - X_{H2S} - X_{CO2}) \text{ для системы } H_2S - CO_2 - \text{ЭА} - H_2O \quad (1.23)$$

$$m_c = m(1 - X_{H2S}) \text{ для системы } H_2S - H_2O - \text{ЭА} \quad (1.24)$$

$$\mu = m \cdot X_{H2S} \text{ для системы } H_2S - H_2O - \text{ЭА} \quad (1.25)$$

$$\mu = m(X_{H2S} + X_{CO2}) \text{ для системы } H_2S - CO_2 - H_2O - \text{ЭА} \quad (1.26)$$

$$\sum X_i = X_{H2S} + X_{CO2} \quad (1.27)$$

В последних уравнениях:

ρ – плотность раствора (кг/л);

μ - ионная сила;

N – содержание этаноламина в растворе (моль/л);

m_c – концентрация свободного этаноламина в растворе (моль/1000г H_20).

Проведенные расчеты, результаты которых, отображены в табл.1. показали, что отклонение расчетных значений парциальных упругостей кислых газов над растворами этаноламинов от экспериментальных для интервала 40-100 °С находятся для системы H_2S-CO_2-ЭА-H_2O, не на критическом расхождении, в некоторых точках сходимость расчетных данных достигает 82%. Данная модель будет использована для разработки программы расчета абсорбционных и десорбционных колонн этаноламиновой очистки.

Данная модель парожидкостного равновесия для системы H_2S-CO_2-МЭА(ДЭА)-H_2O была реализована в виде программы расчета с помощью программного инструмента EXCEL, позволяющей проводить расчет равновесных давлений насыщенных растворов ЭА при заданных степенях сульфидирования (X_{H2S}), карбонизации (X_{CO2}) раствора и закреплении его температуры. Составленная программа расчета, имеет поддержку макроса, который позволяет программировать алгоритм действий.

Главным недостатком программы является необходимость использования целого ряда допущений при описании теплового взаимодействия фазовых потоков и закрепление соотношения между стендами сульфидирования и карбонизации раствора при расчете равновесия.

Перспектива данной работы, заключается в том, что она может быть в дальнейшем использована для построения более реалистичной модели

абсорбционной и десорбционной колон этаноламиновой очистки в различных программных пакетах моделирования производственных линий.

Таблица 1. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по равновесию

Эксперимент						Расчет			
t	XCO_2	XH_2S	$\sum Xi$	PCO_2	PH_2S	По методике [17]		По разработанной методике	
						P_{CO2}	P_{H2S}	P_{CO2}	P_{H2S}
100	0,38	0,005	0,385	217	8,6	107	3,4	46,4	3,6
100	0,186	0,007	0,193	15	2,1	8,6	2	22,5	1,3
100	0,0233	0,04	0,0633	30	17	17,3	15,2	20	2,4
100	0,07	0,548	0,618	77	932,4	32,4	720	34	424
120	0,322	0,005	0,327	328	6,6	159	8,3	183,3	4,4
60	0,00166	0,0107	0,01236	0,8	5,9	0,4	5,4	0,9	5,4
60	0,038	0,088	0,126	14,2	23,2	10,2	18,1	0,03	15,8
40	0,029	0,35	0,379	7,8	76,4	5,1	62	11,2	62
40	0,047	0,027	0,074	13,3	5,4	7,2	4,2	0,01	0,1

Литература:

1. Клямер С.Д. Газовая промышленность, 1971, №9, с.38.
2. Семенова Т.А., Лейтес И.Л. Очистка технологических газов. Москва, Химия,1977.
3. Афанасьев А.И. Промышленный опыт очистки малосернистого природного газа МДЭА / А.И. Афанасьев, В.М. Стрючков, В.С. Прокопенко // Газовая промышленность. – 1987. – № 5. – С. 14–16.
4. Аминовая очистка газа от сероводорода: принцип, эффективные варианты и схемы установок [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://sovet-ingenera.com/gaz/safety/aminovaya-ochistka-gaza-ot-serovodoroda.html, свободный.

УДК 621.64

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ТРУБОПРОВОДОВ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Хусаинов И.Д., Карибуллина Ф.Р.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: axel.mecheti@mail.ru

Введение

Газ транспортируется в трубопроводах под высоким давление. После укладки трубопровода, необходимо провести чистку и провести его опрессовку (тест давлением, для проверки прочности и герметичности). Наиболее распространенным способом является проведение гидравлических испытаний. После данных испытаний и слива жидкости трубопровод остается влажным внутри.

Влага внутри трубопровода должна быть удалена (т.е. необходимо осуществлять процесс сушки), т.к. её наличие приводит к: загрязнению транспортируемого газа, возникновению реакций жидкости с газом, протекание процессов коррозии. Некоторые газы при реакции с водой образуют твердый осадок (со временем происходит заростание трубопровода).

Но не только гидравлические испытания являются следствием коррозии внутри трубопровода. Во время транспортировки и хранения элементы трубопровода подвергаются воздействию атмосферы, например при транспортировке труб морским путем неизбежен контакт с агрессивной соляной атмосферой. Перед монтажом трубопровода составные элементы необходимо предварительно очищать от ржавчины.

Финальная очистка и проверка трубопроводов – последний этап, когда возможно проводить какие-либо работы, в дальнейшем (после пуска трубопровода) любые работы приводят к огромным материальным затратам. Чистка и осушение трубопровода имеют решающее значение для последующей многолетней безаварийной эксплуатации.

Испытание на прочность и проверка на герметичность

К испытаниям трубного узла приступают после окончания всех подготовительных работ, и проведения очистки полости трубного узла, по распоряжению председателя комиссии.

Испытание на прочность и герметичность производится в два этапа, согласно СТО Газпром 2-3.5-354-2009 [2]:

1-й этап:

испытание на прочность:

$P_{исп}$=1,25х$P_{раб}$=9,25 МПа - продолжительность 12 часов;

испытание на герметичность:

$P_{исп}=P_{раб}=7,4$ МПа – продолжительность - необходимая для осмотра, но не менее 12 часов.

2-й этап:

испытание на прочность:

$P_{исп}=1,1xP_{раб}=8,14$ МПа - продолжительность 12 часов;

испытание на герметичность:

$P_{исп}=P_{раб}=7,4$ МПа – продолжительность - необходимая для осмотра, но не менее 12 часов.



Рисунок 1 – График изменения давления в трубопроводе при испытании

Процесс осушки магистральных газопроводов

Большинство трубопроводов требуют эффективную очистку и сушку перед использованием, чтобы удалить загрязнения и оставшуюся воду. [1]

Качественная осушка продлит жизнь трубопровода и снизит эксплуатационные расходы.

Способы сушки:

После очистки, трубопровод должен быть высушен одним из следующих способов:

- Вакуумная осушка
- Сушка при помощи супер сухого воздуха
- Сушка с использования метанола и гликоля
- Сушка инертным газом

Самым эффективным способом является осушка трубопроводов с помощью вакуумных насосов. Это обуславливается возможностью удалять большие объемы воды за короткий промежуток времени, соответственно, меньшие затраты на данную операцию.

Преимущества вакуумной осушки:

- Вся вода удаляется из трубопровода, в том числе из байпаса
- Необходимое место для оборудования небольшое
- Небольшое потребление энергии
- Осушка может быть осуществлена только с одного конца трубопровода
- После вакуумной сушки трубопровод сразу готов к использованию

Недостатки вакуумной осушки:

- Доступ к водоснабжению для охлаждения насосов
- Медленный процесс из-за низкой мощности насосов
- Перемещение системы насоса к различным расположениям
- Трудный доступ к удаленным областям

Для того чтобы правильно оценить время сушки для трубопровода, запрашиваются следующие данные:

- Диаметр и длина трубопровода
- Температура окружающего воздуха
- Температура внутри трубопровода
- Толщина водяной пленки внутри трубопровода
- Наличие электропитания

2.2 Принцип вакуумной осушки

Принцип вакуумной осушки заключается в том, что температура кипения воды изменяется с давлением. [1]

То есть при давлении окружающей среды 9 мбар (а) вода кипит при температуре 5 ° С.

Процесс вакуумной осушки включает в себя три этапа:

1-й этап: Снижение давления в трубопроводе, до давления испарения жидкости

2-й этап: Испарение жидкости

3-й этап: Финал сушки

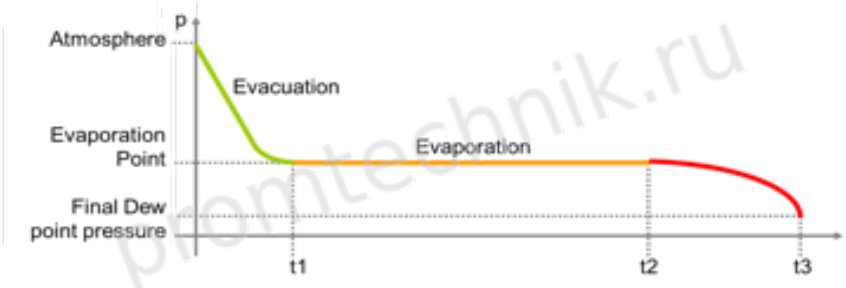


Рисунок 2 – Процесс вакуумной осушки

1) Давление внутри трубопровода уменьшается до давления насыщенного пара при температуре трубопровода (вода превращается в пар)

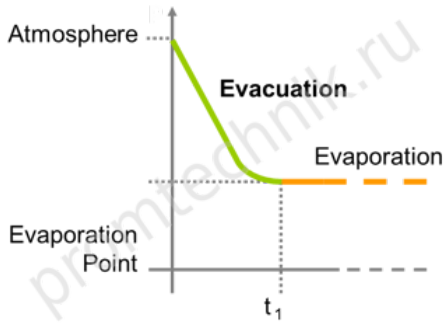


Рисунок 3 – 1-й этап осушки

t_1-время первого этапа

2) Испарение жидкости. Давление постоянно до того момента, когда вода полностью не превратится в пар

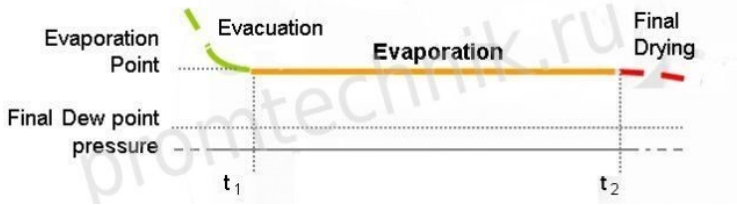


Рисунок 4 – 2-й этап осушки

t_2-время второго этапа

3) После того, как вся вода внутри трубопровода превратится в пар, он будет откачиваться из трубопровода до достижения необходимого уровня влажности внутри трубопровода.

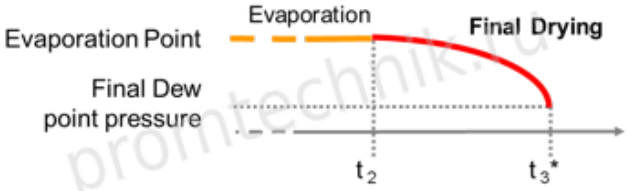


Рисунок 5 – 3-й этап осушки

t_3-время третьего этапа

Литература:

1. Процесс вакуумной сушки трубопровода (https://megatechnika.com/protsess-vakuumnoy-sushki-truboprovoda)

2. СТО Газпром 2-3.5-354-2009 (http://bs.proplus.ru/docs/2-3.5-354-2009.pdf)

УДК 621.52

РАСЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ВАКУУМНОГО МАСЛА ВМ-1С

Шарафутдинова Д.Р., Валиев А.Р., Сагдеев Д.И., Абдулагатов И.М.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Дагестанский государственный университет,
E-mail: sagdeevdamir1948@mail.ru

Измерение является единственным способом получения количественной информации о величинах, характеризующих те или иные явления и процессы. Большинство показателей, характеризующих качество изделий и различных видов продукции, устанавливаются путем соответствующих измерений.

Целью данной работы является измерение неопределенностей реовискозиметра ВТ-КХТИ, работающего по методу падающего груза, для исследования коэффициента динамической вязкости вакуумных рабочих жидкостей в интервале изменения температур от 293 К до 473 К при атмосферном давлении [1].

К метрологическим исследованиям высокой точности можно отнести эксперименты по измерению физико-химических свойств газов и жидкостей. Данные измерения представляют совокупность прямых, а в большинстве случаев - косвенных измерений, в которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и измеряемыми аргументами.

В России в настоящее время имеется большое количество литературы по оценке погрешности измерений. После появления зарубежной работы по измерению неопределенностей при измерениях появился ГОСТ Р 54500.3-2011 [3], который позволяет осуществить единое руководство по выражению неопределенности измерения.

В концепции выражения неопределённости разделение на случайную и систематическую составляющие заменено классификацией по типу расчёта неопределённости. Неопределённости типа А оцениваются статистическими методами, а неопределённости типа В - нестатистическими методами. Основными характеристиками случайной величины при расчёте неопределённости по типу А являются: математическое ожидание, выборочная дисперсия, выборочное стандартное отклонение и стандартное отклонение среднего значения (оно же стандартная неопределённость типа А).

Выборочное стандартное отклонение характеризует разброс значений относительно математического ожидания. Стандартное же отклонение среднего значения (неопределённость типа А) характеризует неточность определения математического ожидания.

Интервал возможных значений измеряемой величины (расширенная неопределённость) при заданной доверительной вероятности (уровне доверия) определяется с помощью выражения (1):

$$U_p(\bar{x}) = u(\bar{x}) \cdot t_{95}(\nu), \quad (1)$$

где $t_{95}(\nu)$ – коэффициент охвата при ν степеней свободы ($\nu = n - 1$).

В случае, когда единственной известной информацией является интервал возможных значений величины, расчёт неопределённости проводят по типу В на основе априорного предположение о функции распределения. Так, стандартную неопределённость типа В при нормальном распределении находят из выражения (1). Для других форм функции распределения (прямоугольной, трапециевидной, треугольной) при симметричных и несимметричных границах имеются собственные уравнения.

В случае же когда измеряемая величина является функцией нескольких аргументов, неопределённости каждого из них вносят свой вклад в общую (суммарную) неопределённость измерения.

В случае косвенных измерений, функция распределения неопределённостей уже не является нормальной, а может быть представлена как t-распределение Стьюдента с эффективным числом степеней свободы, рассчитываемым по формуле Уэлча-Саттертуэйта.

Неопределенность при исследовании коэффициента динамической вязкости методом падающего груза вакуумного масла ВМ-1С производства ОАО "Московский нефтемаслозавод" ТУ 38.1011187–88, измеренная при температурах от 293 К до 473 К при атмосферном давлении, была рассчитана по выражению (2 и 3)

$$\eta_{ж} = \exp A, \quad (2)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} -a_0 + \ln w_{гр} + (1 - a_1 + 2a_2) \cdot \ln d_{экв} + a_1 \cdot \ln D + \\ +(1 + a_2) \cdot \ln \rho_{ж} + a_2 \cdot \ln \tau \end{bmatrix} \cdot (1 + 2a_2)^{-1}, \quad (3)$$

Выражение (2) получено методом анализа размерностей для вискозиметров с вертикальным расположением измерительного узла в виде падающего груза, имеющего конечные размеры, который перемещается в зоне установившегося движения со скоростью $w_{гр}$, которая зависит от физических свойств жидкости: коэффициента динамической вязкости $\eta_{ж}$ и плотности $\rho_{ж}$, геометрических факторов: внутреннего диаметра измерительной трубки D, эквивалентного диаметра $d_{экв}$ и напряжения сдвига τ.

Результаты расчетов расширенной неопределённости косвенного измерения коэффициента динамической вязкости вакуумного масла ВМ-1С М

были произведены для температуры t=92,79 ^{0}C с падающим грузом с числом зубьев n=30 шт, при нагрузке m=200 г, при плотности масла $\rho_ж$=822,17 кг/м^3, при времени падения груза $\tau_{гр}$=0,301 с и скорости падения груза $w_{гр}$=0,09967 м/с, которые приведены в табл. 1.

Результаты по оценке погрешности представленные в табл. 1 позволяют сделать вывод, что расчетная погрешность эксперимента при измерении коэффициента динамической вязкости вакуумного масла ВМ-1С М методом падающего груза (реовискозиметр ВТ КХТИ) при доверительной вероятности $P_{дов}$=0,95 составляет Δ=±2,57 %, что достаточно хорошо для данного класса вискозиметров с падающим грузом Δ=±(2÷4) %.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №22-19-00117).

Таблица 1 Результаты расчета расширенной неопределённости косвенного измерения коэффициента динамической вязкости вакуумного масла ВМ-1С М при температуре t=92,79 ^{0}C

Вязкость исследуемого вещества Вариант калибровки эквивалентного диаметра			
Коэффициент динамической вязкости	$\eta_ж$	мПа·с	16.39
Производная по $w_{гр}$	$\delta\eta_ж/\delta w_{гр}$		-1,67E+02
Производная по $d_{экв}$	$\delta\eta_ж/\delta d_{экв}$		-1,38E+05
Производная по D	$\delta\eta_ж/\delta D$		7,86E+03
Производная по $\rho_ж$	$\delta\eta_ж/\delta\rho_ж$		-1,70E-04
Производная по τ	$\delta\eta_ж/\delta\tau$		1,01E-01
Производная по t	$\delta\eta_ж/\delta t$		-1,84E+00
Суммарная дисперсия	$u_c^2(\eta_ж)$	см^6	0,04
Суммарная стандартная неопределённость	$u_c(\eta_ж)$	см^3	0,19
Число эффективных степеней свободы	$\nu_{эфф}$	-	12
	$t_{95}(\nu_{эфф})$	-	2,16

Коэффициент охвата при уровне доверия 95%			
Расширенная неопределённость	$U(\eta_ж)$	$г \cdot см^{-3}$	0.42
Относительная расширенная неопределённость	$U(\eta_ж)/\eta_ж \cdot 100$	%	2.57

Литература:

1. Sagdeev D.I, Gabitov I.R., Khairutdinov V.F., Fomina V.G., Alyaev V.A., Sal'manov R.S., Minkin V.S., Gumerov F.M., Abdulagatov I.M. New Design of the Falling-Body Rheoviscometer for High and Extra -High Viscous Liquid Measurements. Viscosity of Vacuum Oils. J. Chem. Eng. Data, 2020, т.65(4). DOI: 10.1021/acs.jced 9b01071.

2. ГОСТ Р 54500.3─2011/ Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008 "Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения". М., Стандартинформ. 2012. – 101 с.

УДК 66.021

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Шатунов Д.Н., Малыгин А.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: totalwar1235@gmail.com

В настоящее время актуальным является вопрос защиты окружающей среды, связанный с антропогенным воздействием человека на атмосферу Земли. Основным фактором негативного воздействия на атмосферу являются выбросы парниковых газов (природного и антропогенного характера), которые поглощают и переизлучают инфракрасное излучение, тем самым приводя к повышению приземной температуры и изменению климата. Список основных парниковых газов, оказывающих негативное воздействие и подлежащих ограничению определены Рамочной Конвенции ООН об изменении климата, в приложении "А" к Киотскому протоколу [1], которое было подтверждено Парижским соглашением. К ним относятся: диоксид углерода (CO_2); метан (CH_4); закись азота (N_2O); гидрофторуглероды; перфторуглероды; гексафторид серы (SF_6).

Основной негативный фактор производственной деятельности человека связан с выбросами CO_2при сжигании ископаемых топлив. В рамках концепции улавливания CO_2существует несколько альтернативных решений, таких как предварительное сжигание [3], сжигание кислородного топлива [4], последующее сжигание и улавливание CO_2 [5]. Последнее наиболее применимо в качестве решения для модернизации существующих электростанций [6,7].

В статье рассматривается вопрос моделирования процесса абсорбционной очистки дымовых газов электростанций от CO_2 с использованием прикладного пакета AspenHysys V12. Состав дымовых газов определяется видом топлива и его составом, на котором работают тепловые электростанции (ТЭС) и теплоэлектроцентраль (ТЭЦ). Виды топлива, на которых могут работать ТЭС и ТЭЦ, это природный газ, уголь и мазут. Наиболее распространенным сейчас является природный газ, который является наиболее экологичным из ископаемых видов топлива. Но даже при его сжигании неизбежно образование CO_2:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + 892 \text{ кДж}. \quad (1)$$

Кроме, того сжигание метана выделяется большое количество теплоты. Данный факт приводит к тому, что дымовые газы имеют на выходе высокую температуру, что негативно сказывается на кинетике процесса абсорбционной очистки. Поэтому температуру поступающих на очистку дымовых газов необходимо снижать минимум до 40÷50°С. Состав дымовых газов примерно постоянен и определяется количеством воздуха подаваемого на сжигание, что оказывает

влияние на полноту сгорания топлива и состав продуктов сгорания. Количество избыточного воздуха может составлять от 3 до 70% от объема воздуха, кислород которого участвует в процессе сжигания топлива. При 10% содержании избыточного атмосферного воздуха уходящие дымовые газы, при номинальном режиме сжигания природного газа, имеют примерно следующий состав: 71% азота (N_2), 18% воды (H_2O), 9% углекислого газа (CO_2) и 2% кислорода (O_2).

В промышленности при производстве карбамида для поглощения CO_2 используется процесс химической абсорбции (аминовая очистка), который обычно проводится при избыточном давлении (~25 атм). В случае сорбционной очистки дымовых газов от CO_2 процесс идет при давлении порядка 1÷1.5 атмосфер. В качестве поглотителей используются водные растворы аминов: моноэтаноламин (МЭА), диэтаноламин (ДЭА),метилдиэтаноламин (МДЭА), диизопропаноламин (ДИПА), дигликольамин (ДГА). Аминовый процесс обеспечивает тонкую очистку от диоксида углерода и других кислых компонентов.

В работе при моделировании процесса поглощения использовался водный раствор МЭА. Поглощение CO_2 основано на реакции CO_2 (слабой кислоты) с амином (слабым основанием), в ходе которой образуется водорастворимая соль:

$$2\mathrm{MEA} + \mathrm{CO_2} \leftrightarrow \mathrm{MEAH^+} + \mathrm{MEACOO^-} \qquad (2)$$

Концентрация МЭА в процессах абсорбции обычно составляет 15 - 20% мас. Несмотря на то, что повышение концентрации МЭА повышает емкость абсорбента по CO_2, что позволяет уменьшить его циркуляцию и снизить количества тепла, расходуемого на его регенерацию, в то же самое время повышение концентрации МЭА выше 30% увеличивает коррозию оборудования. Кроме того, увеличением концентрации МЭА сопровождается ростом вязкости раствора абсорбента, что приводит к снижению скорости массо- и теплообменных процессов и увеличивает гидравлическое сопротивление в системе.

Установка абсорбционной очистки состоит из двух основных частей: колонны абсорбции и колонны десорбции. В качестве контактных элементов используются регулярные или нерегулярные насадочные элементы. Модель расчета была создана в программном пакете AspenHysysV12 с использованием термодинамического пакета AcidGas (кислый газ). Данный пакет разработан специально для моделирования процесса химической абсорбции кислых газов водными растворами аминов. Адекватность использования данного термодинамического пакета при улавливании CO_2 из дымовых газов была подтверждена на основе моделирования действующей установки [8].

В моделировании использовался насадочный абсорбер с насадкой кольца Палля 38 мм (металлические), количество слоёв - 3 шт., высота слоя 4.3 м. В колонне регенерации используется такая же насадка, количество слоёв - 5 шт. На третий слой подается раствор обогащённого амина, а верхние слои орошаются

флегмой. Моделирование установки проводится на расход дымовых газов 4 м^3/с (н.у), соответствующего котлу мощностью 11 МВт. Состав дымовых газов показан на рисунке 2. Полученная двухколонная схема (рис.1) оптимизировалась с помощью встроенного инструмента AspenHysys (adjust) под требуемую степень поглощения CO_2, с целью определения требуемого количества абсорбента и энергозатрат на его регенерацию.

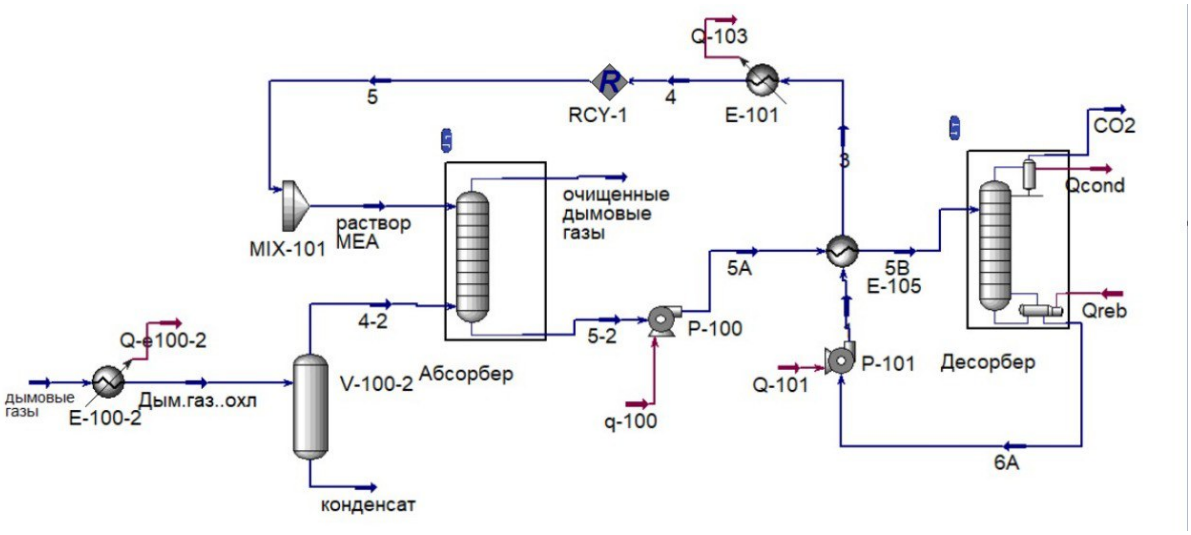


Рис. 1. Двухколонная схема улавливания CO_2 из дымовых газов.

Результаты моделирования двухколонной схемы улавливания CO_2 представлены в таблице 1. Как видно из представленных результатов для заданной конструкции аппаратов двухколонной схемы увеличение степени улавливания CO_2 более 90% требует значительного увеличения количества абсорбента. Данный факт приводит к существенному увеличению как размеров десорбера, так и затрат на регенерацию абсорбента, поэтому, с точки зрения минимума затрат, оптимальным является вариант улавливания из дымовых газов 90% CO_2. На рисунке 2 представлены составы газовых потоков двухколонной схемы для степени улавливания CO_2 - 90%.

Таблица 1. Параметры процесса улавливания CO_2 водным раствором МЭА.

		Степень улавливания CO_2, 85%	Степень улавливания CO_2, 90%	Степень улавливания CO_2, 95%
Диаметр абсорбера, м		1,45	1,5	1,6
Диаметр десорбера	верх, м	0,35	0,4	0,75
	низ, м	0,65	0,8	1,2
Расход абсорбента, м^3/ч		20	25	37
Затраты энергии на регенерацию абсорбента, МВт		1,483	1,980	4,235

	Массовые доли	Массовые доли	Массовые доли
H2O	**0,0620**	0,0671	0,0190
H2S	**0,0000**	0,0000	0,0000
CO2	**0,0594**	0,0075	0,9797
MDEAmine	**0,0000**	0,0000	0,0000
Nitrogen	**0,7265**	0,7648	0,0002
Oxygen	**0,1396**	0,1469	0,0001
MEAmine	**0,0000**	0,0004	0,0000
Argon	**0,0126**	0,0132	0,0011

Рис. 2. Состав газовых потоков двухколонной схемы улавливания CO_2: первый столбец - входящие дымовые газы, второй - очищенные дымовые газы на выходе из абсорбера, третий - концентрированный CO_2 на выходе из десорбера.

Литература:

1. UN FCCC: https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf

2. UN FCCC: https://unfccc.int/files/essential_background/convention/ application/pdf/english_paris_agreement.pdf

3. Cousins A., Feron P., Hayward J., Zhai R., Jiang K., Garcia M. GHGT-14; Melbourne, Australia. IEAGHG. 2019, p. 1-10

4. Chen L., Yong S.Z., Ghoniem A.F. Prog. Energy Combust. Sci. 2012. T.38. V.2, p. 156–214.

5. Feron P.H.M., Cousins A., Jiang K., Zhai R., Garcia M. Fuel. 2020. V.273, 117776.

6. Sreedhar I., Nahar T., Venugopal A., Srinivas B. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017. V.76, p. 1080–1107.

7. Vega F., Baena-Moreno F.M., Gallego Fern´andez L.M., Portillo E., Navarrete B., Zhang Z. Appl. Energy. 2020. V.260, 114313

8. United Mexican States MX TF Carbon Capture. Utilization and StorageDevelopment, Mexico, Nexant Inc., 2016.

9. Mostafavi E., Ashrafi O., Navarro P. Cleaner Engineering and Technology 2021. V.4, 100249

УДК 665.6/.7

ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТА И КАЧЕСТВА СЫРОЙ НЕФТИ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Яруллин И.Р., Алексеев В.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

В данной статье мы проанализируем свойства продукции скважин, а также получим формулы и уравнения для оценки основных параметров производительности нефтепровода.

При добыче нефти неизбежные ее спутники – нефтяной газ и пластовая вода (от <1 до 80-90% по массе), которая, диспергируясь в нефти, образует с ней эмульсии типа "вода в нефти" или наоборот. Пластовая вода, как правило, в значительной степени минерализована хлоридами Na, Mg и Ca (до 2500 мг/л солей даже при наличии в нефти всего 1% воды), а также сульфатами и гидрокарбонатами и содержит механические примеси [1].

Т.е. продукция скважин представляет собой водонефтяную эмульсию, в которой имеется растворенный и нерастворенный газ. Количество нерастворенного газа может меняться при изменении давления. Этот газ может находиться в жидкости в виде пузырьков, а также может расслаиваться и двигаться в трубопроводе отдельным потоком (слоем) или в виде «пузырей». Состав добываемой нефти обычно характеризуется обводненностью (вода % или доля по массе или объема) и газовым фактором ($м^3/м^3$или $м^3/т$).

Физические свойства нефти – жидкость от светло-коричневого до черного цвета; плотность 750-1050 (обычно 820-900) $кг/м^3$; нефть содержит большое число разных органических веществ и поэтому характеризуется не температурой кипения, а интервалом кипения (в пределах 28-360 °С в зависимости от плотности) и фракционным составом; температура застывания от минус 60 до +30 °С (зависит от содержания парафина – чем его больше, тем температура застывания выше и легких фракций – чем их больше, тем эта температура ниже)

Нефть представляют собой смеси индивидуальных углеводородов и других соединений, поэтому они характеризуются средней молекулярной массой. Средняя молекулярная масса многих нефтей 250-300 кг/кмоль. Первый представитель жидких углеводородов нефти — пентан C_5H_{12} — имеет молекулярную массу 72 кг/кмоль. У наиболее высокомолекулярных гетероатомных соединений нефти и ее высоковязких фракций молекулярная масса составляет 1200—2000 кг/кмоль.

Плотность большинства нефтей находится в диапазоне 0,770-0,840 $г/см^3$. Кинематическая вязкость нефти изменяется в широких пределах: от 2 до

300 мм^2/с (20°С). Однако в среднем вязкость большинства нефтей не превышает 40 – 60 мм^2/с.

Попутный нефтяной газ (ПНГ) растворен в самой нефти, а также находится в пространстве между горной породой и залежами нефти, именуемой «шапкой». При вскрытии нефтяных пластов обычно сначала начинает фонтанировать газ нефтяных шапок. Впоследствии основную часть добываемого ПНГ составляют газы, растворенные в нефти.

Углеводородные компоненты попутного нефтяного газа представлены метаном CH_4 и его гомологами: этаном C_2H_6, пропаном C_3H_8, бутаном C_4H_{10}, пентаном C_5H_{12}, гексаном C_6H_{14}, гептаном C_7H_{16}, октаном C_8H_{18}, нонаном C_9H_{20}, деканом $C_{10}H_{22}$ и т.д. вплоть до доказана $C_{22}H_{46}$.

В нефтяном месторождении из общего объема ПНГ почти 2/3 приходятся на метан, около 8% — на этан, 17 %- пропан, 8% — бутан и его производные. В газонефтяном месторождении доля метана еще выше — до 89 процентов.

Важной характеристикой природного газа является растворимость его в нефти.

Коэффициент растворимости газа (газовый фактор) показывает, сколько газа растворяется в единице объема жидкости при повышении давления на единицу. Коэффициент растворимости в зависимости от условий растворения изменяется от $0.4x10^{-5}$ до $1x10^{-5}$ Па$^{-1}$. Со снижением давления до определенного значения (давление насыщения) начинает выделяться растворенный в нефти газ.

По мере поступления от скважины нефти с газом, газ имеет свойство расширяться, в результате - объем газа больше объема поступления нефти. Газовый фактор не на всех месторождениях, пластах одинаков. Он обычно колеблется от 30 м^3/м^3 до 100 м^3/м^3 и выше [4].

Давление, при котором из нефти начинают выделяться первые пузырьки растворенного газа, называют давлением насыщения пластовой нефти. Это давление зависит от состава нефти и газа, соотношения их объемов и от температуры [3]. Плотность ПНГ составляет - от 0,8 до 1,3 кг/м^3.

Вязкость углеводородного газа при нормальных условиях невелика и не превышает 10 мкПа·с.

Пластовые воды имеются в большинстве нефтегазовых месторождениях и являются обычным спутником нефти. Пластовые воды обычно сильно минерализованы. Степень их минерализации колеблется от нескольких сот граммов на 1 м^3 в пресной воде и до 80 кг/м^3 в концентрированных рассолах. Минеральные вещества, содержащиеся в пластовых водах, представлены солями натрия, кальция, магния, калия и других металлов. Основные соли пластовых вод - хлориды, а также карбонаты щелочных металлов. Плотность пластовой воды

в зависимости от количества растворенных в ней солей колеблется в пределах 1,01-1,02 г/см^3 и более.

Вязкость пластовой воды в большинстве нефтяных месторождений меньше вязкости нефти. С повышением температуры вязкость воды уменьшается. Вязкость пластовой воды зависит в первую очередь, от температуры, а также от минерализации и химического состава. Вязкость пластовых вод нефтяных и газовых месторождений составляет 0,2–1,5 мПа×с. Мы можем сделать вывод что основные физические свойства измеряемого продукта зависят от: плотности, вязкости, месторождения нефти и ее типа, состава продукции скважины (обводненность, газовый фактор), температуры, давления.

Свойства газожидкостных смесей (ГЖС). Если давление в трубопроводе меньше давления насыщения, то растворенный нефтяной газ будет выделяться в виде газовой фазы. В таком случае через сечение трубы при движении по ней ГЖС проходит некоторое количество газа и жидкости. Можно представить, что все газовые пузырьки занимают в сечении трубы суммарную площадь $f_г$, а жидкость - остающуюся площадь в том же сечении $f_ж$, так что $f_{г+}f_ж = f$, где f - площадь сечения трубы. Плотность ГЖС в таком случае определится как средневзвешенная: $\rho_{c=\rho_ж} \times \frac{f_ж}{f} + \rho_г \times \frac{f_г}{f}$ (1), где $\rho_ж$ и $\rho_г$ - плотность жидкости и газа при термодинамических условиях сечения. Обычно $f_г/f$ обозначают через φ. Тогда $f_ж / f = 1 - \varphi$, $\rho_{c=\rho_ж} \times (1 - \varphi) + \rho_г \times \varphi$ (2)

Величина $\varphi = f_г / f$ называется истинным газосодержанием потока.

Обозначим V - объемный расход газа через данное сечение; q - объемный расход жидкости через то же сечение; $С_г$ - линейная скорость движения газа относительно стенки трубы; $С_ж$ - линейная скорость движения жидкости относительно стенки трубы.

Тогда можно записать следующие соотношения:

$f_г = \frac{V}{С_г}$; $f_ж = \frac{q}{С_ж}$ (3) и $f = f_{г+}f_ж = \frac{V}{С_г} + \frac{q}{Сж} = \frac{V \times Сж + q \times Сг}{Сж \times Сг}$ (4)

Подставляя (3) и (4) в (1), и делая некоторые сокращения, получим:

$\rho_с = \rho_ж \times \frac{q}{V \times \frac{Сж}{Сг} + q} + \rho_г \times \frac{V}{V + q \times \frac{Сг}{Сж}}$ (5), обозначим $\frac{Сг}{Сж} = b > 1$ (6), $\frac{V}{q} = r$ (7)

Разделив числитель и знаменатель в (5) на q и вводя новые обозначения согласно (6) и (7), получим: $\rho_с = \rho_ж \times \frac{b}{r+b} + \rho_г \times \frac{r}{r+b}$ (8), где r – доля свободного (не растворенного) газа, приведенный к термодинамическим условиям рассматриваемого сечения. При $С_г = С_ж$, b = 1 и из (8), так как скорости фаз одинаковы следует: $\rho_с = \rho_ж \times \frac{1}{r+1} + \rho_г \times \frac{r}{r+1} = \rho_и$ (9)

В нашем случае $\rho_ж$, это плотность водонефтяной эмульсии.

$\rho_ж = \rho_ч e+(1- e)\rho_{ср}$, где: $\rho_ч$, $\rho_{ср}$ – плотности частиц и дисперсной фаз (эмульсии типа "вода в нефти" или наоборот, т.е. «вода- нефть»); e - объемная доля дисперсной фазы (при эмульсии "вода в нефти" равна обводненности, если наоборот, то равна (1-e)). Т.е. плотность ГЖС: $\rho_{гжс} = \left(\rho_{вода} e + (1 - e)\rho_{нефть}\right)\frac{1}{r+1} + \rho_г \frac{r}{r+1}$ (10) если r – доля свободного (не растворенного) газа = 0.

$\rho_{гжс} = \left(\rho_{вода} e + (1 - e)\rho_{нефть}\right)$(11)

Для оценки вязкости используются эмпирические уравнения:

А. Эйнштейн предложил следующую формулу: $\mu_э = \mu_с \times (1 + 2{,}5 \times W_\vartheta)$, где $\mu_э$-вязкость эмульсии; $\mu_с$- вязкость дисперсионной среды (нефти); W_ϑ - коэффициент обводненности - отношение объема дисперсной фазы (воды) к общему объему системы (воды + нефти). Формула справедлива только при низких концентрациях диспергированного вещества (воды).

Позднее была установлена возможность использования формулы Эйнштейна при обводненности нефти до 15%. Тейлор предложил следующую формулу

$\eta_э = \eta \times (1 + 2.5 \times \varphi \times \frac{\eta_1 + \frac{2}{5} \times \eta}{\eta_1 + \eta})$, где $\eta_э$-вязкость эмульсии; η_1-вязкость внутренней фазы; η- вязкость внешней фазы [4].

Увеличение содержания воды в нефтяной эмульсии до определенного предела увеличивает кажущуюся вязкость $\eta_э$ эмульсии, а, следовательно, и увеличивает энергетические затраты на перекачку такой эмульсии. Критическая концентрация воды Wкр называется точкой инверсии. В точке инверсии происходит обращение фаз, и дисперсная фаза (вода) становится дисперсионной средой, а дисперсионная среда (нефть) – дисперсной фазой. Т.е. эмульсия меняет свой тип с В/Н на тип Н/В. Обращение фаз нефтяных эмульсий имеет исключительно большое практическое значение. Эмульсия типа Н/В транспортируется при меньших энергетических затратах, чем эмульсия типа В/Н. Поэтому при транспортировании эмульсии выгодно, чтобы внешней фазой была вода, при этом трубопроводы должны быть защищены от коррозии.

Кинематическая вязкость двухфазного потока (газ-жидкость) определяется по формуле Манна: $\frac{1}{\nu_{см}} = \frac{\beta}{\nu_г} + \frac{1-\beta}{\nu_ж}$, где β-объемное газосодержание двухфазного потока, определяемое по формуле $\beta = \frac{\nu_г}{\nu_{г+\nu_ж}}$, где $\nu_г$ и $\nu_ж$ соответственно объемный расход газа и жидкости при средних давлении и температуре в трубопроводе. В данном случае жидкость - нефтяная эмульсия, газ - попутный нефтяной (не растворенный в жидкости), т.е. при его отсутствии *β=0.*

Литература:

1. Шаймарданов В. Х. Процессы и аппараты технологий сбора и подготовки нефти и газа на промыслах: учебное пособие / Под ред. В. И. Кудинова. — М.– Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2013. — 508 с.
2. https://ozlib.com
3. https://studopedia.ru
4. https://oilloot.ru

УДК 621.521

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУР В РАБОЧЕМ МЕХАНИЗМЕ БЕСМАСЛЯНОГО СПИРАЛЬНОГО ВАКУУМНОГО НАСОСА

Тюрин А.В., Рябчиков К. Е., Бурмистров А.В., Саликеев С.И.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

Откачные характеристики бесконтактных вакуумных насосов в первую очередь зависят от обратных перетеканий через зазоры роторного механизма, как правило, величины этих зазоров не превышает 0,3 мм, типичным значением является 0,1-0,15 мм, для большинства бесконтактных насосов малой и средней производительности [1-3].

Поэтому минимизация обратных перетеканий связана с уменьшением зазоров роторного механизма при проектировании бесконтактных вакуумных насосов, это касается спиральных, винтовых, двухроторных и кулачково-зубчатых безмасляных вакуумных насосов. Было установлено, что изменение зазоров под влиянием силовых деформаций рабочих элементов [4] незначительно по сравнению с температурными деформациями [5]. По этой причине определение стационарных тепловых полей бесконтактных вакуумных насосов является актуальной задачей. Имея температурные поля можно корректнее рассчитывать откачные характеристики бесконтактных безмасляных вакуумных насосов.

В рамках настоящей работы проведено исследование температур неподвижной спирали спирального вакуумного насоса, температур во входном и выходном патрубке в зависимости от давления на входе в насос.

Температуры подвижной спирали при помощи термоиндикаторных этикеток «Thermax», которые клеились на ступицу подвижной спирали. Перед каждой установкой нового давления, на ступицу клеилась свежая термоиндикаторная этикетка.

Измерения проводились при синхронной частоте вращения приводного вала 1500 об/мин при трех давлениях: предельном остаточном давлении (~ 1 Па) и при давлениях на входе 1330 Па и 13300 Па. Для каждого давления при включенном насосе проводились измерения температуры неподвижной спирали в трех точках - Т1, Т2, Т3. Расположение термопар для насоса НВСп-12 показано на (рис. 1) [6]. Первые 10 мин измерения проводились через 2 мин, в дальнейшем – через 5 мин.

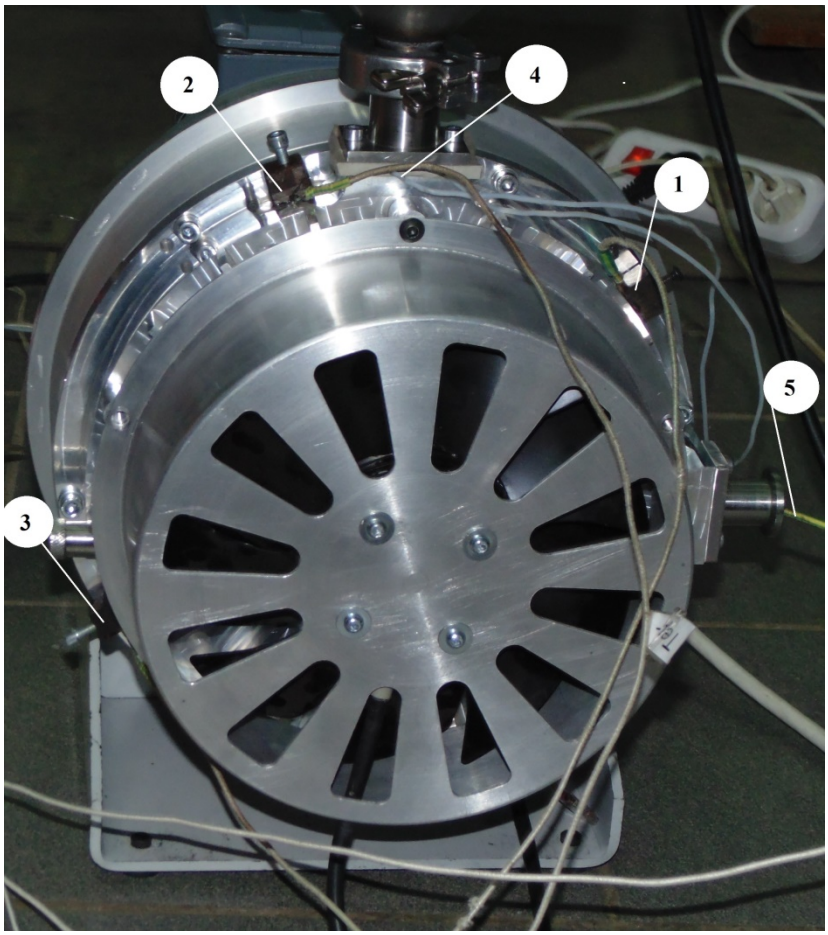


Рисунок 1 – Схема расположения термопар на корпусе НВСп-12

Термопарой, установленной в потоке газа на входе в насос, измеряется температура газа на входе в насос – Т4. Термопарой, установленной в потоке газа в выходном патрубке – Т5, измеряется температура газа на выходе из насоса.

Все измерения температуры проводились до достижения установившегося теплового режима работы насоса. При таком режиме температура корпуса насоса меняется не более чем на 1 °С в течение 15 мин. Время выхода на стационарный тепловой режим составляет около 60 минут.

По результатам измерений построены графики зависимостей температуры неподвижной спирали и газа на входе и выходе от времени (рис. 2-4).

Путем обобщения данных рис. 2-4 получена зависимость стационарных температур от давления на входе в насос.

Анализ полученных зависимостей (рис. 5) позволяет сделать следующие выводы:

1. Падение температуры на входе насоса с ростом давления на входе в насос является следствием уменьшение количества горячего газа, перетекающего с выхода на вход;

2. Рост температуры газа на выходе из насоса с повышением давления на входе в насос объясняется повышением работы сжатия, так называемым

процессом пережатия газа, т.е. превышения давления на выходе из насоса относительно атмосферного;

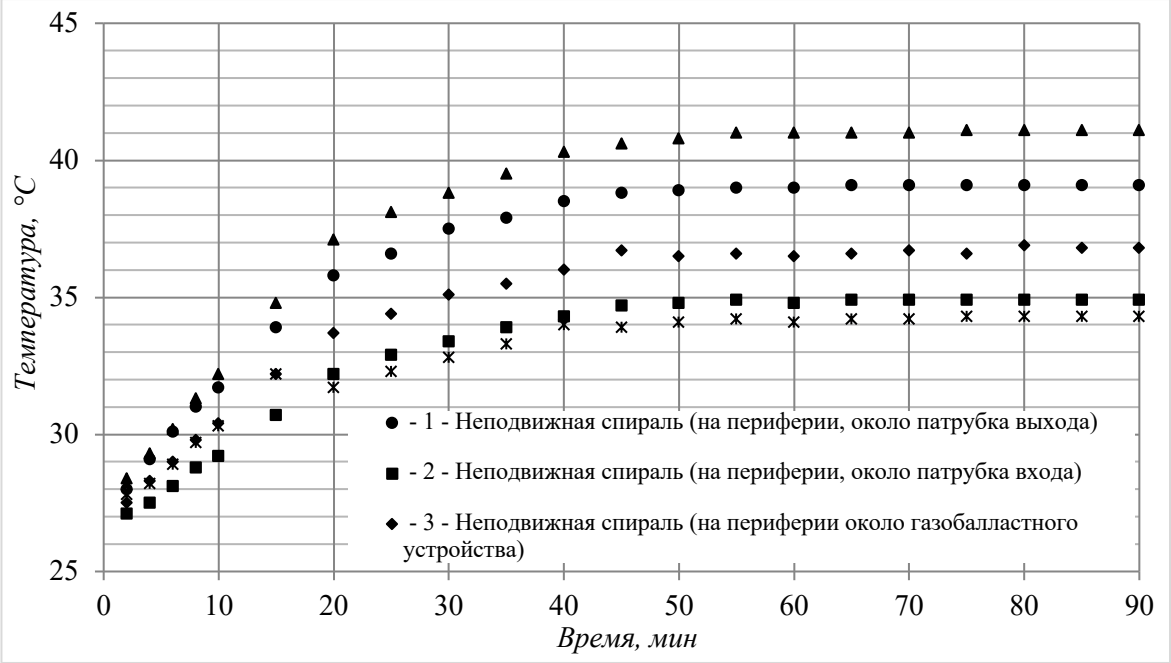


Рисунок 2 – Зависимость температуры неподвижной спирали и газа на входе и выходе от времени при Рвх = Рост ~ 1 Па

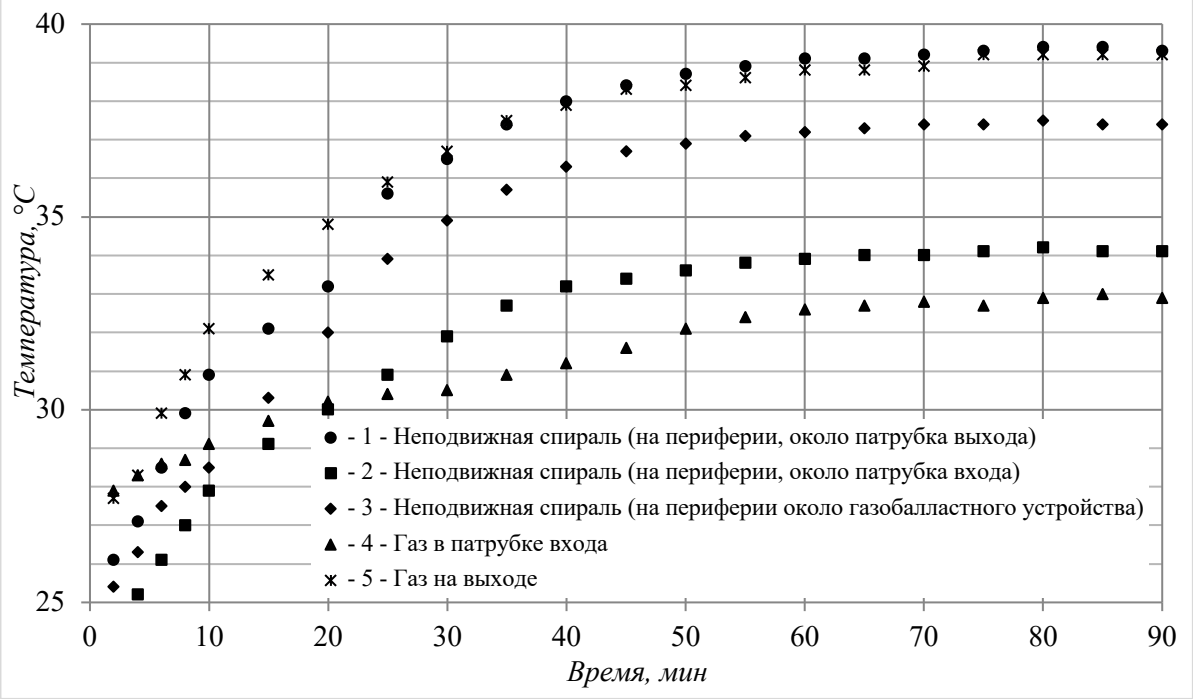


Рисунок 3 – Зависимость температуры неподвижной спирали и газа на входе и выходе от времени при P_{BX} = 1330 Па

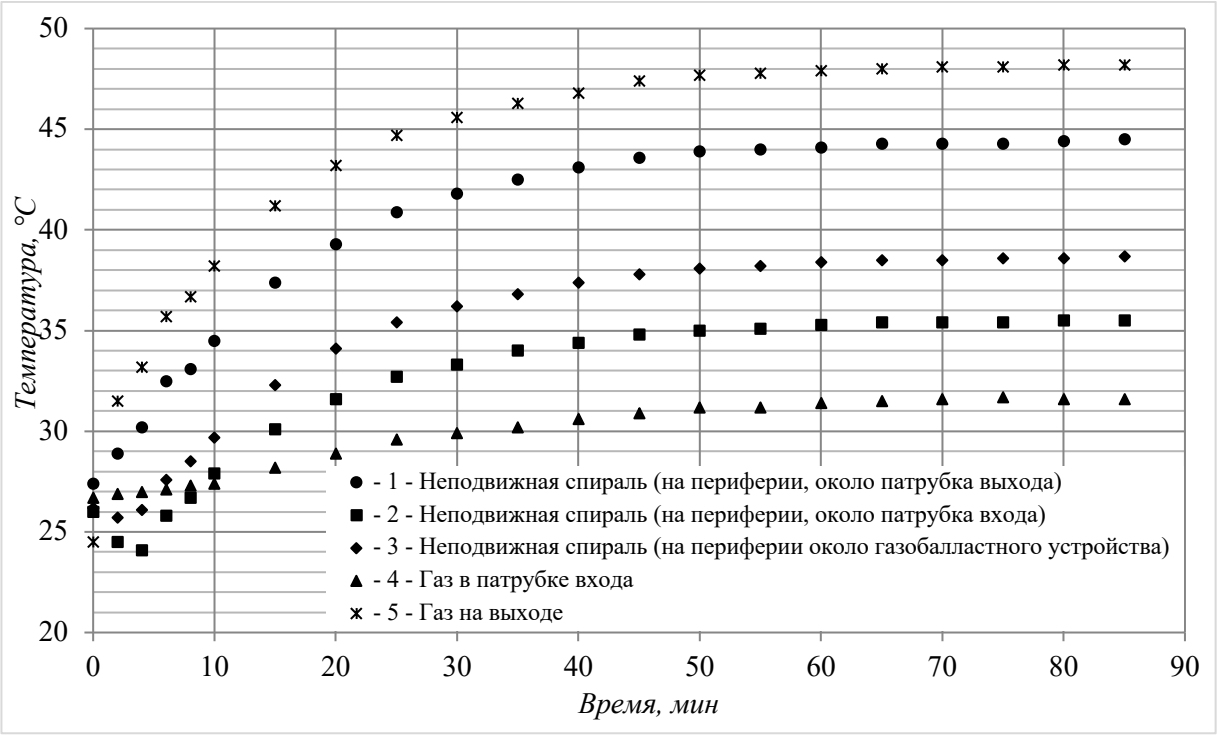


Рисунок 4 – Зависимость температуры неподвижной спирали и газа на входе и выходе от времени при P_{BX} = 13300Па

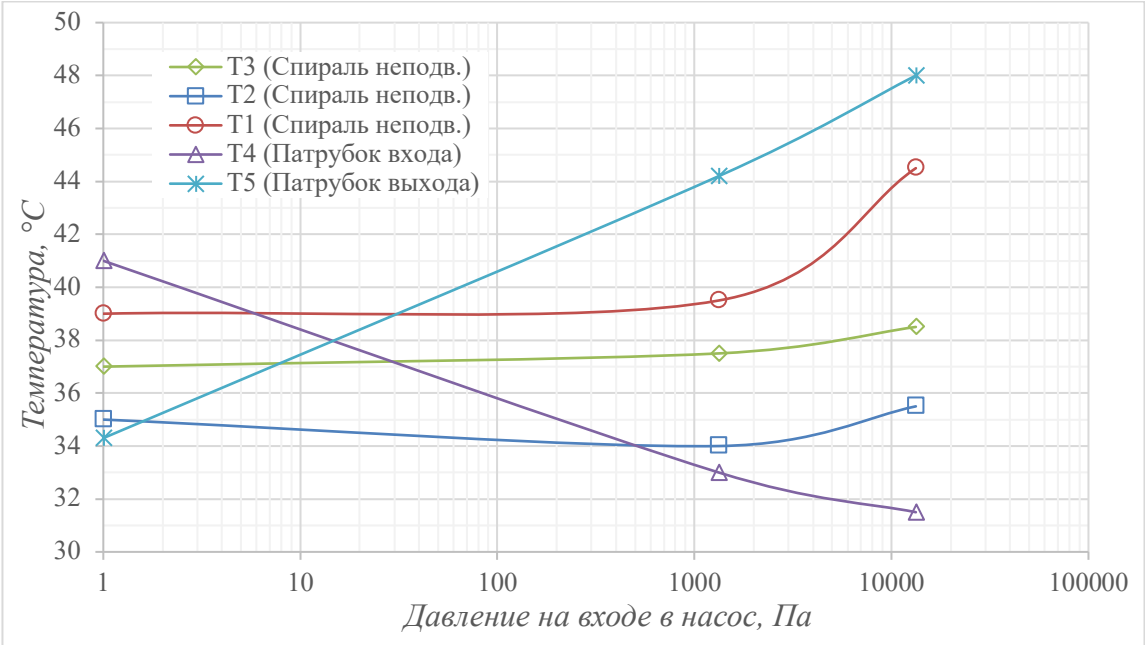


Рисунок 5 – Зависимость температуры неподвижной спирали и газа на входе и выходе от давления на входе в насос

3. Изменение температуры неподвижной спирали имеет минимум при давлении ~ 1330 Па (10 мм рт.ст.). С ростом давления на входе, как отмечено выше, повышается работа сжатия газа, следовательно повышается температура газа на выходе и температура самих спиралей. При этом при снижении давления на входе до предельного остаточного давления поток откачиваемого газа стремится

к нулю, таким образом отсутствует среда, которая бы отводила теплоту от элементов проточной части насоса в атмосферу при наличии внутреннего сжатия в насосе, что соответственно ведет к некоторому повышению температуры неподвижной и подвижной спиралей, что мы и наблюдаем с кривыми Т1-Т3. Аналогичную картину по тепловым полям корпуса насоса имеют и масляные пластинчато-роторные насосы.

4. При помощи термоиндикаторных этикеток было установлено, что максимальная температура подвижной спирали находится в интервале от 71 до 77 ˚С, что в среднем почти на 30 ˚С выше температуры поверхности насоса, это приводит к неравномерному изменению величин радиальных и торцевых зазоров.

Полученные данные могут быть использованы при математическом моделировании рабочего процесса спирального вакуумного насоса [7].

Литература:

[1] БЕСКОНТАКТНЫЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ Бурмистров А.В., Саликеев
С.И. Учебное пособие / Казань, 2010.

[2] ILMVAC GmbH Ilmenau Germany — Professional Vacuum Technology [Электронный ресурс] / ILMVAC GmbH. — Ilmenau: ILMVAC GmbH, 2008. — Режим доступа: http://www.ilmvac.com/, свободный.

[3] Dry Scroll Vacuum Pumps // Anest Iwata. URL: http://anestiwata.com/product-category/vacuum-pumps/.

[4] Райков А. А., Якупов Р. Р., Бурмистров А. В., Саликеев С. И. Силовые деформации рабочих элементов безмасляного спирального вакуумного насоса, Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, №1 (658), с. 57-63.

[5] Райков А. А., Якупов Р. Р., Саликеев С. И., Бурмистров А. В. Моделирование тепловых деформаций спиральных элементов безмасляного вакуумного насоса, Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015, № 3 (102), с. 92-102.

[6] Стенд исследовательских испытаний безмасляных спиральных вакуумных насосов / А. В. Бурмистров, А. А. Райков, С. И. Саликеев, А. В. Гаврилов, В. П. Матвеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 14 – С. 174–177 с.

[7] Burmistrov, A. Mathematical model of working process of oil free scroll vacuum pump : Influence of leakage and heat transfer on pumping characteristics / Burmistrov A., S. Salikeev, Raykov A., M. Fomina // Vakuum in Forschung und Praxis. - 2017. - Vol. 29. - Is. 6. – P. 28-31.

Секция 3

УДК 620.193.4

ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ДЕФЕКТОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ

Базуев М.А., Валеев С.И.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: vsi73@mail.ru

На сегодняшний день на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях эксплуатируется большое количество разнообразного технологического оборудования. Оно составляет большую часть комплексов всех технологических установок. Технологическое оборудование эксплуатируется в условиях совместного воздействия повышенных температур, давлений, взрывоопасных и агрессивных технологических сред, а также механических нагрузок разного характера [3,5,7,8].

Такие условия эксплуатации приводят к возникновению дефектов оборудования. В первую очередь встают вопросы коррозионной защиты оборудования. Это обусловлено растущим объемом переработки углеводородного сырья, а также мероприятиями, направленными на повышение эффективности применения и эксплуатации оборудования [1,7].

Установлено, что коррозионные разрушения оборудования обусловлены совокупным воздействием на металл агрессивных компонентов технологических сред и образующихся коррозионно-солевых отложений на всех этапах эксплуатации установок [2,5,6].

В связи с этим была рассмотрена следующая задача: определить скорость коррозии технологического оборудования и провести анализ влияния среды на её распространение.

В качестве объекта исследования был выбран кожухотрубчатый теплообменник со следующими параметрами:

Год ввода в эксплуатацию	1981
Рабочая среда:	
межтрубное пространство	керосин
трубное пространство	обессоленная нефть
Рабочее давление, МПА	
межтрубное пространство	1,2
трубное пространство	1,56
Рабочая температура, ˚С	
межтрубное пространство	200
трубное пространство	200

Материал:

Обечайка Ст3сп5

Днище корпуса Ст3сп5

Обечайка распределительной камеры Ст3сп5

Днище распределительной камеры Ст3сп5

Трубы Ст3сп5

По результатам ультразвуковой толщинометрии элементов теплообменного оборудования были получены следующие результаты.

Таблица 1 – Результаты ультразвуковой толщинометрии

№ эл-та	№ точки на элементе	Название элемента сосуда	Индекс элемента	Dн (наружный диаметр), мм	Дата проведения толщинометрии	Замеры УЗТ	Дата проведения толщинометрии	Замеры УЗТ
1	1	штуцер	А1	219	30.12.18	13,2	30.12.20	13,1
2	1	штуцер	А2	219	30.12.18	13,7	30.12.20	13,7
3	1	штуцер	Б1	219	30.12.18	10,2	30.12.20	10,0
4	1	штуцер	Б2	219	30.12.18	13,7	30.12.20	13,2
5	1	днище		600	30.12.18	10,2	30.12.20	10,0
5	2	днище		600	30.12.18	9,9	30.12.20	9,5
5	3	днище		600	30.12.18	10,4	30.12.20	9,9
5	4	днище		600	30.12.18	9,9	30.12.20	9,3
6	1	обе-чайка		600	30.12.18	11,8	30.12.20	11,3
6	2	обе-чайка		600	30.12.18	11,4	30.12.20	11,2
6	3	обе-чайка		600	30.12.18	12,0	30.12.20	11,4
6	4	обе-чайка		600	30.12.18	11,6	30.12.20	11,3
7	1	обе-чайка		600	30.12.18	9,7	30.12.20	9,0
7	2	обе-чайка		600	30.12.18	9,2	30.12.20	8,3
7	3	обе-чайка		600	30.12.18	9,5	30.12.20	8,7

7	4	обе-чайка		600	30.12.18	9,8	30.12.20	9,0
8	1	обе-чайка		600	30.12.18	9,4	30.12.20	8,6
8	2	обе-чайка		600	30.12.18	9,7	30.12.20	9,2
8	3	обе-чайка		600	30.12.18	9,4	30.12.20	8,7
8	4	обе-чайка		600	30.12.18	9,6	30.12.20	8,9
9	1	обе-чайка		600	30.12.18	9,7	30.12.20	9,0
9	2	обе-чайка		600	30.12.18	9,8	30.12.20	9,3
9	3	обе-чайка		600	30.12.18	9,1	30.12.20	8,5
9	4	обе-чайка		600	30.12.18	9,2	30.12.20	8,5
10	1	днище		600	30.12.18	9,1	30.12.20	8,8
10	2	днище		600	30.12.18	8,9	30.12.20	8,7
10	3	днище		600	30.12.18	9,2	30.12.20	8,8
10	4	днище		600	30.12.18	9,3	30.12.20	9,0

Расчет скорости коррозии проводился по формуле:

$$П_э = \frac{365 \sum(\Delta S_1 + \Delta S_2 + \cdots + \Delta S_n)}{n \cdot Т_э} \qquad (1)$$

где Пэ – скорость коррозии в контролируемой части сосуда или трубопровода в условиях эксплуатации, мм/год;

ΔS – разность толщин стенок за период контрольных измерений, мм;

Тэ – время эксплуатации между контрольными измерениями, сутки;

n – количество контрольных точек замера по каждой части сосуда.

Расчет показал, что скорость коррозии для обечайки теплообменного аппарата составляет 0,37 мм/год. Оно превышает значение 0,1 мм/год, которое принято на заводе, эксплуатирующем оборудование, в 3,7 раза.

Помимо замеров было проведено металлографическое исследование [5,6] фрагментов корпуса теплообменника, в котором методом ультразвуковой дефектоскопии был обнаружен трещиноподобный дефект.

Результаты заключения металлографического исследования показали следующее:

1. Протекание сероводородной коррозии под воздействием конденсата, содержащего водный раствор сероводорода, образующегося на внутренних стенках теплообменника в результате тепловых процессов.

2. В основном металле теплообменника были обнаружены неметаллические включения в количестве 3 балла, что согласно [4] недопустимо, т.к. они являются концентратором напряжений.

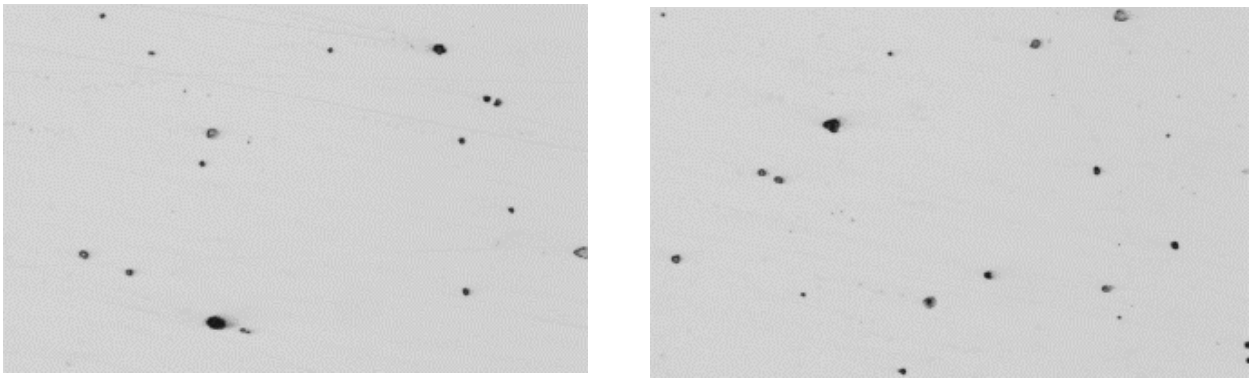


Рисунок 1 – Образец корпуса теплообменника с неметаллическими включениями (х100)

3. В кислой среде коррозионной системе образуются растворимые продукты взаимодействия сернистых соединений с металлом, разрушающие защитную пленку металла.

На основе выше представленной информации был сделан вывод, о том, что суммарное воздействие среды и технологических параметров играет ключевую роль в возникновении и скорости распространения коррозии.

Литература:

1. Бакаева Р.Д., Балдаев Л.Х., Ишмухаметов Д.З. Применение метода оценки коррозионной стойкости газотермических покрытий в условиях соляного тумана // Территория Нефтегаз.2016. №2. С. 72-75

2. В.В. Бурлов Современные подходы к комплексному решению проблем защиты от коррозии технологического оборудования и трубопроводов НПЗ [Электронный ресурс] // Химическая техника. 2020. – Режим доступа: https://chemtech.ru/sovremennye-podhody-k-kompleksnomu-resheniju-problem-zashhity-ot-korrozii-tehnologicheskogo-oborudovanija-i-truboprovodov-npz/, свободный.

3. Добротворский А.М., Копыльцов А.В., Добротворский М.А. Выявление причин отказов технологического оборудования нефтеперерабатывающих предприятий новыми физико-химическими методами [Электронный ресурс] // Химическая техника. 2017. – Режим доступа: https://chemtech.ru/vyjavlenie-prichin-

otkazov-technologicheskogo-oboredovanija-neftepererabatyvajushhih-predprijatij-novymi-fiziko-himicheskimi-metodami, свободный

4. ГОСТ 1778-70 Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений.

5. Валеев С.И. Прочность элементов оборудования длительное время находящегося в эксплуатации / С.И. Валеев, Н.В. Пластинкин // Фундаментальные основы механики. -2018.-№3.-С.129-130.

6. Губайдуллин И. И. Проблемы эксплуатации трубопроводов на предприятиях нефтегазового комплекса / И. И. Губайдуллин, С. И. Валеев, В. А. Булкин // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 20. – С. 50–51.

7. Некоторые аспекты обеспечения промышленной безопасности опасных объектов. Имитационное моделирование / В. А. Алексеев, С. И. Валеев, С. А. Вилохин [и др.] ; Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань : Фэн, 2020. – 128 с.

8. Монтаж, техническая диагностика и ремонт основного технологического оборудования химических производств и нефтегазопереработки / И.И. Поникаров [и др.]. -Казань: Изд-во Академии наук РТ,-2018.-798 с.

УДК 662.61

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЛВЖ НА ОТКРЫТОЙ ПЛОЩАДКЕ

Барышев Д.А., Вилохин С.А., Прусова И.А., Поникаров С.И.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: taber999.db@gmail.com

Ускорение темпов развития и расширение масштабов производственной деятельности нефтегазохимической отрасли в современных условиях обусловливает необходимость проведения анализа и оценки опасностей возможных аварий в результате образования токсичных и пожаровзрывоопасных облаков на опасных производственных объектах. Особую опасность представляют объекты использования ЛВЖ, так как при их выбросе происходит интенсивное парообразование с формированием протяженных взрывоопасных и токсичных зон.

Прогнозирование и моделирование процессов, возникающих при аварийной разгерметизации оборудования с опасными химическими веществами, стали важным моментом в предотвращении этих последствий и минимизации их воздействий. При определении опасных зон пожаров особое значение имеет температура пламени, так как воздействие на окружающие предметы осуществляется за счет излучения.

В данной работе приводятся результаты измерения температуры пламени со временем и высотой при горении свободно налитой жидкости на открытой площадке.

Для экспериментов выбрана открытая площадка с наличием травы. На расстоянии более 10 метров со всех сторон преграды отсутствуют. В эксперименте, при исследовании температурного профиля фронта пламени горения этилового спирта и ацетона, температура окружающей среды 18,6^{o}C, скорость ветра менялась от 0,3 до 1,5 м/с и фиксировалась, давление 755мм.рт.ст. Во втором эксперименте, температура окружающей среды 27,1^{o}C, скорость ветра менялась от 0,1 до 2,1 м/с и фиксировалась, давление 755мм.рт.ст., при горении использовался уайт-спирит.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из емкости 1 с габаритными размерами 0.5х0.5х0.05м изготовленного из горячекатаной стали. По периметру емкости устанавливаются пластины 2. Для исключения контакта с землей пластины были установлены на высоте (0.176 м; 0.257 м; 0.370 м). Они изготовлены из того же материала шириной 0.05 м и длиной 0.3 м.

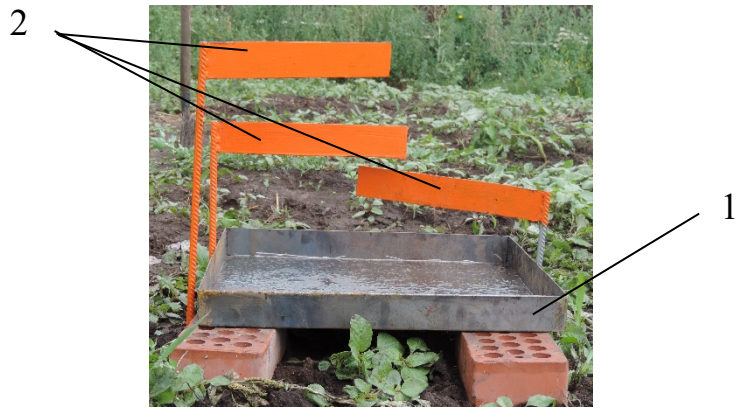


Рис.1- Схема экспериментальной установки: 1 – емкость; 2 – пластины

Учет погодных условий (скорости ветра, температуры воздуха) проводился с помощью метеостанции «АТЕ-1033», температура пластин замерялась тепловизором «DL700E+».

Температура внутри пламени определялась с помощью пластины 2. Было принято допущение, что температура пластин равна температуре пламени.

На первой стадии эксперимента заданное количество вещества выливалось в поддон и фиксировались значения температуры и влажности окружающей среды. Проводилось фотосъемка емкости с жидкостью для измерения по фотографии уровня зеркала жидкости. Мониторинг скорости ветра осуществлялся непрерывно в ходе проведения эксперимента.

На второй стадии производился поджог поверхности пролива от внешнего источника огня и исследовался профиль температуры при горении. Через равные промежутки времени (600 с) проводилась фотосъемка емкости. По фотографиям измерялось расстояния между зеркалом жидкости и уровнем верхнего среза емкости, в результате определялся уровень оставшейся жидкости и ее количество. Далее, по известным величинам, определялась скорость выгорания вещества.

Для всех веществ, участвующих в эксперименте, можно выделить три этапа горения. На первом этапе наблюдалось образование фронта пламени с постепенным увеличением температуры в пламени. На втором этапе исследовался установившейся процесс горения, характеризуемый равновесием между скоростью испарения и скоростью выгорания жидкости. На заключительном этапе проведения эксперимента наблюдалось резкое увеличение температуры в пламени вследствие кипения слоя жидкости.

Разработанная методика дает возможность определить скорость выгорания вещества и оценить динамику изменения температуры пламени по высоте и по времени.

На рисунках 2, 3 и 4 представлены результаты эксперимента по горению этилового спирта, ацетона и уайт-спирит на открытой площадке. Там же приведены результаты расчетов по методике.

При сравнении результатов видно, что значения температур близки до времени равного 1300 с для этилового спирта (180 с для ацетона). При проведении эксперимента в это время наступало бурное кипение жидкости, которое ранее не учитывалось в модели [2].

До начала кипения отклонения расчетных значений от экспериментальных составляют 7,6%, а после начала кипения– 24%.

Предложенная методика позволяет получить количественные значения для температуры внутри пламени при горении углеводородов на открытой площадке.

Полученные экспериментальные значения могут быть использованы для проверки математических моделей по расчету процессов горения жидких углеводородов и определения теплового потока от пламени при горении углеводородов.

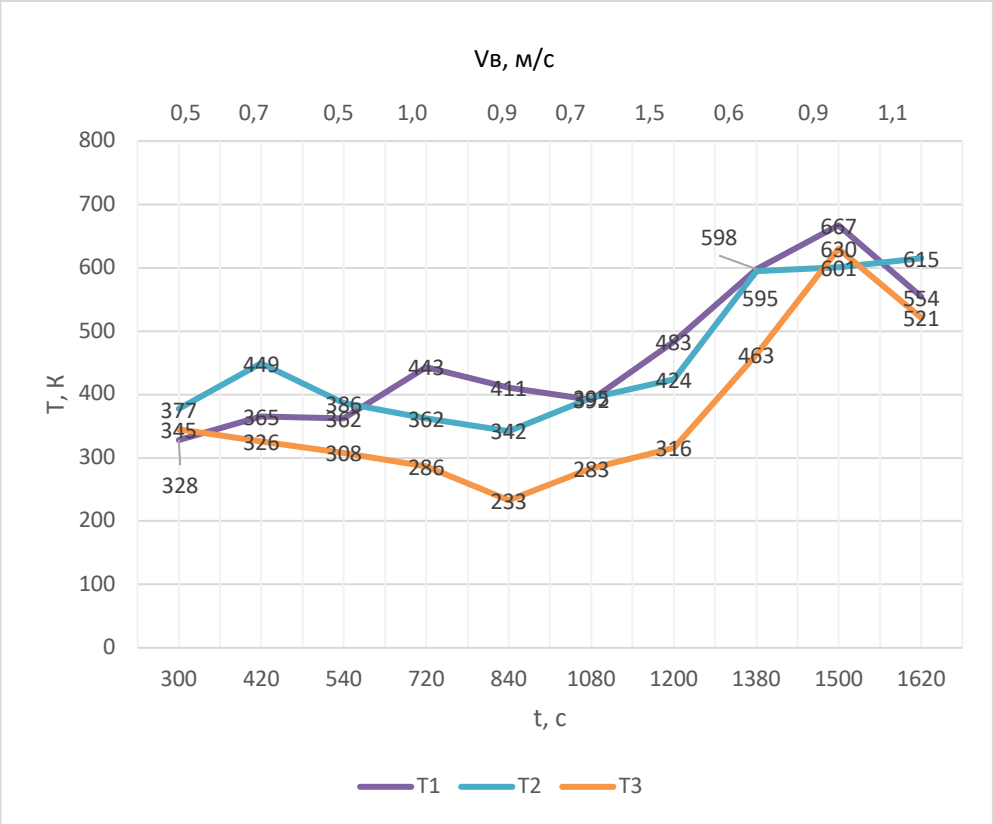


Рис. 2- Зависимость температуры пламени от времени в зависимости от высоты пластины для этилового спирта

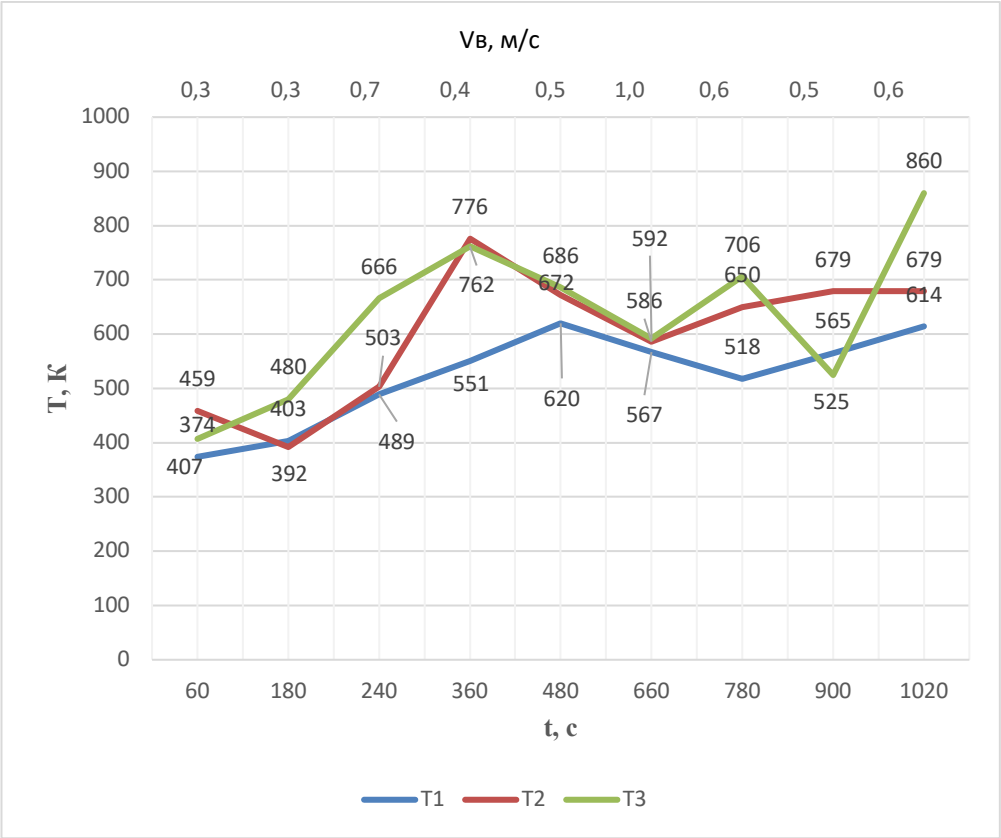


Рис. 3- Зависимость температуры пламени от времени в зависимости от высоты пластины для ацетона

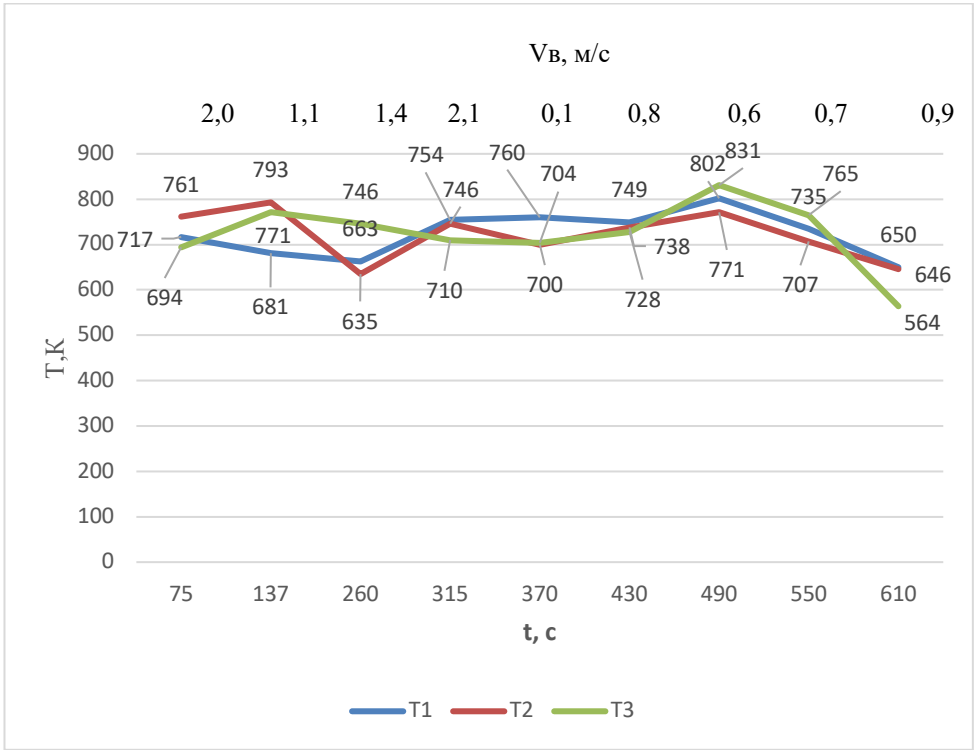


Рис.4- Зависимость температуры пламени от времени в зависимости от высоты пластины для уайт-спирит

Литература:

1. Маршал В. Основные опасности химических производств / В.Маршал. – Москва: Изд-во Мир, 1982. 672 с.

2. Прусова И.А., Вилохин С.А., Поникаров С.И., Математическое моделирование процесса горения сжиженного пропана на открытой площадке с учетом влияния скорости потока воздуха и размеров пролива / Вестник технологического университета. 2018, т.21, в.10, с.157-161

3. Прусова И.А., Вилохин С.А., Поникаров С.И., V Всероссийская студенческая научно-техническая конференция “Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология” (Казань, 23-25 мая 2018), Инновационно-издательский дом “Бутлеровское наследие”, Казань. С. 369-372.

4. Елизарьев А.Н., Ахтямов Р.Г., Хаертдинова Э.С, Сафугунова Г.Г. Оценка влияния скорости ветра на распространение пожара при горении нефти на водной поверхности / Нефтегазовое дело. – 2012, т.10, №1, с.90-93.

УДК 628.5

ПРИМЕНЕНИЕ СЕПАРАТОРА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЛЕТУЧИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Биккулов Р.Я., Иванов А.П., Ибатуллина А.И., Дмитриева О.С.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: ja_deva@mail.ru

Химическая промышленность сталкивается с постоянными проблемами загрязнения атмосферы летучими органическими соединениями, создавая тем самым угрозу для здоровья человека. С целью улучшения условий труда рабочего персонала и снижения больших выбросов мелкодисперсных частиц в окружающую среду требуется очистка воздуха от аэрозолей и пыли, а также применение средств индивидуальной защиты. Из-за экономических, а также экологических проблем установка классических сепарационных устройств не всегда возможна. Для улавливания мелкодисперсных частиц предлагается конструкция сепарационного устройства с элементами квадратной формы и круглыми отверстиями (рис. 1).

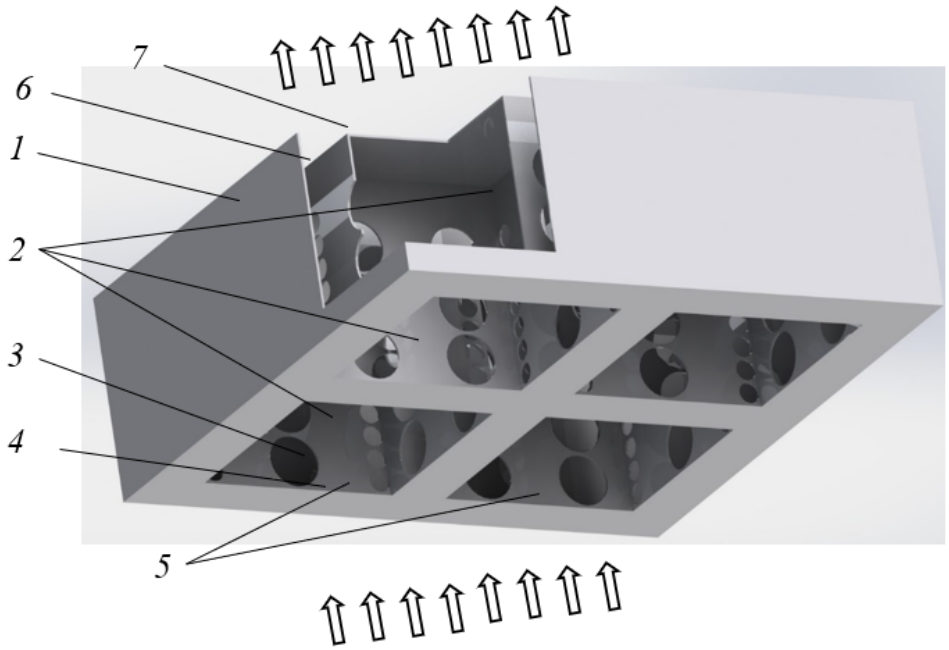


Рисунок 1 – Вид с разрезом сепарационного устройства [1]: *1* – корпус; *2* – сепарационные элементы; *3,4* – отверстия для выхода газа; *5* – вход в устройство; *6* – сепарационная зона устройства; *7* – выход из устройства

В корпусе проделаны четыре квадратных отверстия, образующих сепарационные элементы, в стенках которых проделано несколько рядов круглых отверстий. При этом часть отверстий, расположенных ближе к центральной части стенки, имеет больший диаметр относительно боковых отверстий. Между

внутренними стенками корпуса устройства и наружными стенками сепарационных элементов квадратной формы располагается сепарационная зона устройства, в которой образуется множество вихрей при выходе газа из круглых отверстий.

Отработанный газовый поток входит в устройство через проделанные квадратные отверстия, после чего в равных долях постепенно отклоняется в сторону круглых отверстий. Далее за счет сужения проходного сечения отверстий образуются струйки газа с высокими скоростями относительно тех, которые были до сужений. При выходе газа из круглых отверстий каждая струйка делится на два равных потока, приобретая вихревое движение по высоте сепарационной зоны устройства. При вращении отработанного газового потока с диспергированными в нем мелкодисперсными частицами в сепарационной зоне возникают центробежные силы высоких значений, под действием которых частицы отбрасываются из завихренной структуры в сторону внутренней стенки корпуса устройства, прилипая к ней за счет своих физико-химических свойств или попадая в застойные зоны между двумя соседними вихрями. Область контакта газового потока с стенками устройства сведена к минимуму, что позволяет обеспечить низкие потери давления.

Таким образом, по мере движения газового потока по сепарационной зоне мелкодисперсные частицы отбрасываются в разные стороны, очищенный газ выходит из устройства через выходное отверстие сепарационной зоны. Применение устройства снизит долю выброса загрязняющих веществ в атмосферу и нагрузку на окружающую среду.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-2710.2021.4

Литература:

1. Биккулов Р.Я., Дмитриева О.С., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р. Очистка воздушных потоков от мелкодисперсных частиц в окрасочных камерах. Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 12. С. 10-14.

УДК 669.046.521

ВЛИЯНИЕ НА СТРУКТУРУ СТАЛИ ЦЕРИЯ В БЕСКРЕМИНИСТЫХ МОДИФИКАТОРАХ

Борисов А.А.
Нижегородский государственный университет им. Р.Е. Алексеева,
E-mail: borisov.rsm@gmail.com

РЗМ обладают значительным сходством с азотом, соизмеримо с нитридообразующими элементами, такими как цирконий и титан. При добавлении РЗМ в жидкий металл они в первую очередь образуют прочные связи с серой и кислородом, к слову, даже титан и цирконий не обладают таким высоким сродством с серой и кислородом, это позволяет РЗМ активно участвовать в образовании нитридов, в особенности там, где имеется область высоких температур.

С фосфором РЗМ так же образует ряд соединений, позволяя устранить отрицательное влияние некоторых фосфоросодержащих фаз, но такое может быть реализовано только с высокой концентрацией РЗМ в металле [4]. При модифицировании с технологически разумного содержания РЗМ (0,1-0,2%) в легированные стали, взаимодействие РЗМ с фосфором является спорным моментом.

Примеси цветных металлов РЗМ так же связывает в прочные химические соединения с высокими температурами плавления тем самым устраняется низко и высокотемпературная хрупкость.

Существуют данные которые показывают что в условиях открытой плавки раскисли тельная способность РЗМ не реализуется в той степени как показывают расчеты, по этому реальная технология должна строится исходя из взаимодействия РЗМ с серой [4].

С серой РЗМ образует прочные соединения с высокой температурой плавления. При рабочих концентрациях РЗМ и ЩЗМ могут образовывать сульфидную фазу, способную к выделению из металла. Чем меньше с течением времени становится серы в металле, тем больше вероятность изменения сульфидной фазы с РЗМ от R_2S_3 до RS [4].

Изменение свободной энергии реакции образования оксидов и сульфидов РЗМ отличается незначительно. Небольшое различие в величинах свободных энергий и подобие кристаллических решеток полуторных оксидов и сульфидов предопределяет возможность образования оксисульфидов типа R2O2S. В образовании этого соединения прослеживается преимущественное участие кислорода. Переход от оксидов к сульфидам через оксисульфид определяется соотношением кислорода к сере в металле. При вводе РЗМ в расплав, содержащий растворенные кислород и серу, могут протекать реакции последовательно и параллельно с образованием оксидов, сульфидов и оксисульфидов [4].

Используя РЗМ добавки можно выделить характерный максимум, после которого положительные свойства стали станут понижаться[4]. Таким образом количество РЗМ для каждой марки стали должно быть разное, и определяться экспериментально. Различное действие РЗМ на структуру и свойства одних и тех же сплавов и марок стали при сопоставлении отдельных исследований связано с рядом факторов: несовершенство способов ввода РЗМ и колебаниями их усвоения, отсутствие контроля за концентрацией алюминия, кислорода, серы, РЗМ и их соотношением, взаимное влияние РЗМ, а также влияние РЗМ на другие элементы и прочие.

Оптимальное количество РЗМ обеспечивающий высокий уровень механических свойств стали колеблется в пределах 0,1-0,2% говорится в работе[6]. Проанализировав работу [3], в которой указывается что для среднеуглеродистой стали рекомендуемое количество РЗМ считается 0,3%. Для среднеуглеродистой стали Я. Е. Гольдштейн [4] предлагает добавлять 0,15-0,2% ферроцерия, 0,2-0,3% силикокальция и 0,03-0,05% алюминия.

В Работе Эдзима [5] в стали в которой содержание серы было до 0,008%, с увеличением отношения R/S до 3 ударная вязкость повышается (Рисунок 5).

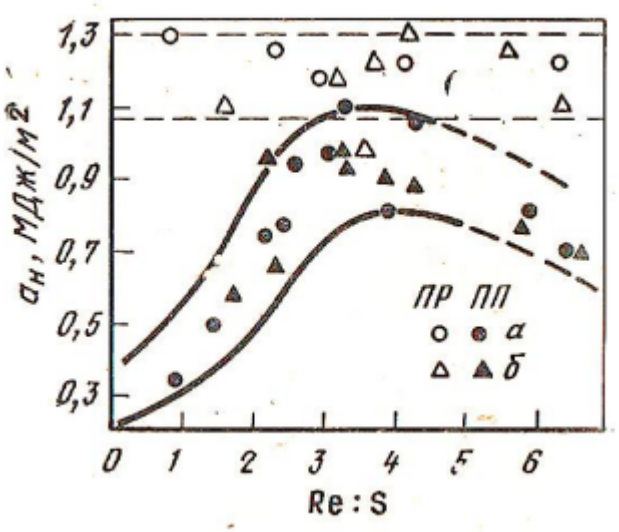


Рисунок 1 – Зависимость ударной вязкости в зависимости R/S

Исходя из рисунка 1, порог хладноломкости с увеличением R/S сдвигается в сторону низких температур с минимумом в точке 3

Используемый модификатор

Положительно можно оценить использование в комплексной добавке Ce, считая, что при совместном вводе будет проявляться положительное его действие, как микролегирующего элемента. Церий будет легировать границы и само зерно металла при упрочнении перлитной составляющей. На рис.2 представлены микроструктуры сталей до и после модифицирования.

Таблица 1 Химический состав лигатуры АКЦе

№ п/п.	Содержание элементов, % мас.	Требования ТУ, % мас., не менее.	Результаты анализа, % масс.	
1	Al	20	33	
2	Ca	3,0	4,0	
3	Fe	5,0	5,0	
4	Ce	сумма 20	16,4	сумма 32,6
5	La		8,8	
6	Nd		5,9	
7	Pr		1,5	
8	Ni	остальное	остальное	

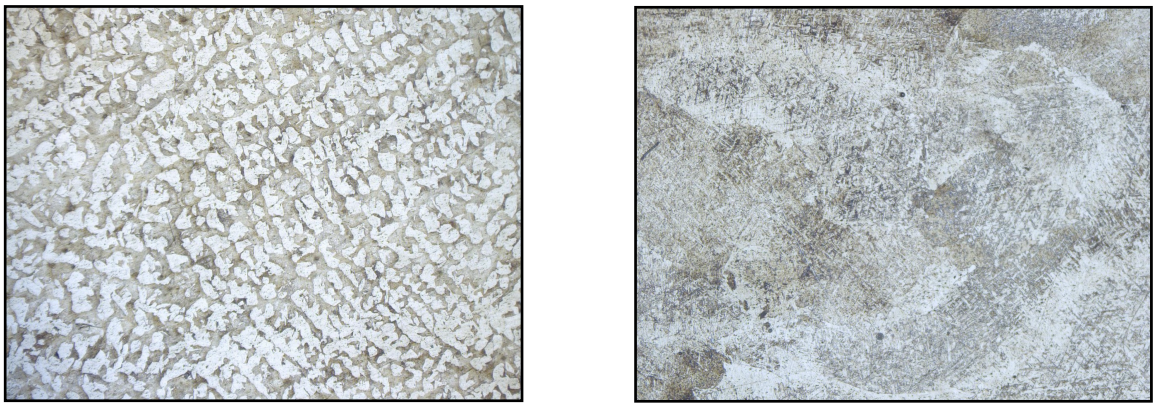


Рис.2. Микроструктура стали 08ГДНФЛ :
а) 08ГДНФЛ до модифицирования; б) 08ГДНФЛ после модифицирования;

Литература:

1. Рябчиков И.В. Модификаторы и технологии внепечной обработки железоуглеродистых сплавов. – М.: ЭКОМЕТ, 2008. – 400 с.

2. Рябчиков И.В. Ферросплавы с редкоземельными и щелочноземельными металлами/ И.В. Рябчиков, В.Г. Мизин, Н.П. Лякишев, А.С. Дубровин. М.: Металлургия, 1983. – 272 с.

3. Горелов В.Г., Романенко Д.Г., Крючков О.Б., Булгаков Г.В. Эффективность микролегирования конструкционных сталей присадка бескремнистой лигатуры//Металлургия машиностроения. 2004. №5. С. 14–16.

4. Гольдштейн Я.Е. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали / Я.Е. Гольдштейн, В.Г. Мизин. М.: Металлургия, 1986. – 384 с.

5. ЭдзимаА.,Судзуки К., Харада Н. и др. – ―Тецу–то-хагане‖, 1975, т. 61, №13. –с. 2784- 2793.

6. Савицкий Е.М. Редкоземельные элементы в сталях и сплавах. М., Металлургиздат, 1959, - с. 31-49.

УДК 004.056.53

ВЛИЯНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ НА БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИМИ ПРОИЗВОДСТВАМИ

Брянцева Е.А., Пикулин Ю.Г.
Московский политехнический университет,
E-mail: elenaboltyonkova0098@gmail.com

Внедрение информационных технологий (ИТ) на химические производства оказывает существенное влияние на производительность труда и значительно уменьшает трудоемкость управления. Примером реализации ИТ являются автоматизированные системы управления (АСУ) на промышленных объектах Российской Федерации. Однако вместе с этим параллельно порождаются новые угрозы информационной безопасности (ИБ).

Практика внедрения ИТ без увязки с обеспечением ИБ существенно повышает вероятность реализации уязвимостей в АСУ, что может привести к негативным последствиям, в том числе с нанесением ущерба экологии. К таким примерам относятся:

сбои в системе пожаротушения, следствием которых является бездействие средств пожаротушения и оповещения;

крупномасштабное отключение электроэнергии вследствие кибератаки, направленной на автоматическую систему контроля ГЭС «Гури» (Венесуэла, 2019 г.) [1];

обнаружение сложной, агрессивной вредоносной программы (Stuxnet), нацеленной на иранскую атомную электростанцию в Бушере или установку по обогащению урана в Натанзе (Иран, 2019 г.) [1];

активное распространение в сети Интернет информации о реализации угроз в отношении промышленных объектах, о совершении атак, направленную на «отказ в обслуживании» оборудования (особенно в 2022 г.).

На основе годовых отчетов Ростехнадзора за 2015-2020 годы 25% аварий были связаны с нарушениями требований организации производства опасных работ персоналом.

Решение задачи по защите окружающей среды в частности находится на стыке трех областей научных знаний: техносферная безопасность, область безопасности информации и теория надежности.

В связи с тем, что безопасность систем управления химическими производствами в частности напрямую зависит от состояния информационной безопасности на данных объектах было принято решение о рассмотрении вопроса влияния различных значений информационной энтропии в АСУ на состояние защищенности таких объектов в контексте экологической безопасности.

Основным показателем качества в настоящей работе выступает энтропия информации, так как она является характеристикой данных, обрабатываемых в АСУ, и активно используется для решения задач защиты информации в подобных системах [2]. В частности исследование значений информационной энтропии осуществляется для оценки стойкости паролей и алгоритмов в системах.

Например, для обеспечения защиты информации от несанкционированного действия в АСУ важна целостность хранящихся в таких системах файлов. В то же время записи в подобных файлах могут быть изменены случайно или преднамеренно или перезаписаны, но для этого необходимо подтверждение действий, например, в виде ввода пароля в систему компетентного сотрудника.

При этом пароль представляется возможным подобрать путем подбора или с помощью специального программного обеспечения. Этим объясняется необходимость усиления парольной защиты, ужесточения требований сложности к ним, особенно на объектах КИИ за счет организационных и технических мер.

Под информационной энтропией понимается мера неопределённости некоторой системы, непредсказуемость появления какого-либо символа первичного алфавита.

Информационная энтропия рассчитывается по формуле Хартли:

$$i = log_2 N, \quad (1)$$

где N – мощность алфавита, i – количество информации в каждом символе сообщения.

Для различных алфавитов информационная энтропия согласно формуле 1 равна:

для русского языка – $i_{RUS} = \log_2 33$,

для английского языка – $i_{ENG} = \log_2 26$,

для арабского языка – $i_{ARA} = \log_2 28$,

для грузинского языка – $i_{GEO} = \log_2 33$,

соответственно, $i_{RUS} =$ 5,044 бит, $i_{ENG} =$ 4,7 бит, $i_{ARA} =$ 4,807 бит, $i_{GEO} =$ 5,044 бит.

При сочетании в паролях исключительно арабских цифр (0-9) значение информационной энтропии (i_f): $i_f = log_2 10$, $i_f = 3{,}322$ бит.

Применение всего алфавита из кодировки ASCII информационная энтропия принимает значение: $i_{ASCII} = log_2 256$, $i_{ASCII} = 8$ бит.

Время полного перебора всех возможных паролей заданного алфавита при скорости перебора 10.000.000 паролей в секунду представлено в таблице 1.

Таблица 1. Время полного перебора всех возможных паролей заданного алфавита при заданной скорости перебора

Алфавит	**6 символов**	**8 символов**	**10 символов**	**12 символов**	**Энтропия**
26 (латиница, один регистр)	31 сек.	5 ч. 50 мин.	163.5 сут.	303 года	4,7
52 (латиница, переменный регистр)	33 мин.	62 сут.	458 лет	1.239.463 лет	5,7
62 (латиница, переменный регистр, цифры)	95 мин.	252,5 сут.	2.661 год	10.230.425 лет	5,954
68 (латиница, переменный регистр, цифры, знаки препинания)	2 ч. 45 мин	529 сут.	6.703 года	30.995.621 лет	6,087
80 (латиница, переменный регистр, цифры, знаки препинания, скобки, некоторые другие символы)	7,5 ч.	5 лет 4 мес.	34.048 лет	217.908.031 лет	6,322
146 (русский язык, латиница, переменный регистр, цифры, знаки препинания, скобки, некоторые другие символы)	>30 сут.	>15 лет.	>50.000 лет	>250.000.000 лет	7,19
256 (кодировка ASCII)	>30 сут.	>15 лет.	>50.000 лет	>250.000.000 лет	8

Однако речь идет про полный перебор паролей. Стоит учитывать, что атаки по маске/правилам/словарям/гибридные и, конечно же, по радужным таблицам осуществляют вскрытие пароля намного быстрее. При этом стоит отметить, что увеличивать длину пароля также стоит, например, увеличив пароля на 2 символа (с 10 до 12), задача подбора пароля усложняется в 300-500 раз. Однако необходимо увеличивать пароля комбинацией разных символов, а не добавление

в качестве продолжения нескольких словарных/алфавитных (словосочетаний) единиц.

Не стоит игнорировать возможность использования нетрадиционных раскладок языка на клавиатуре и специальных символов, соблюдая при этом стойкость пароля. Такой подход обеспечит защиту в том числе от криптографических атак. При этом существует дополнительный организационный метод защиты паролей как плановая смена паролей по графику[3].

Справедливо сделать вывод, что использование расширенного алфавита в контексте парольной защиты, рассмотренном ранее, является оптимальным, удобным и наиболее безопасным. Таким образом, использование стойкой парольной защиты повышает безопасность обработки данных в том числе на объектах КИИ.

Однако использование сложных паролей приводит к проблеме хранению пароля в памяти и перенос его значения на носитель, доступ к которому может получить злоумышленник или который может быть потерян. Для решения данной проблемы предлагается использовать генерацию парольных значений, вывод полученных значений в виде штрих-кодов на бумажный носитель и для авторизации использовать считыватель штрих-кодов. Схема применения предложенного способа не требует значительных затрат, но значительно увеличит уровень защиты информации в АСУ, данная схема показана на рисунке 1.



Рис. 1. Схема использования повышенной парольной защиты в АСУ ТП

Таким образом, по итогу выполнения статистического анализа значений информационной энтропии в АСУ экологически значимыми объектами справедливо сделать вывод о повышении безопасности систем управления экологически значимыми объектами Российской Федерации с ростом значений энтропии информации. При этом были разработаны предложения по качественному

использованию гарантированной парольной защиты с обеспечением удобства и оперативности его использования с наименьшими затратами на его реализацию.

Литература:

1. Самые громкие кибератаки на критические инфраструктуры. [Электронный ресурс]. https://habr.com/ru/company/panda/blog/316500

2. Энтропия и ее использование для решения задач информационной безопасности. [Электронный ресурс]. http://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/163

3. Сен Н. Д., Котляров В. П., Григорьев Я. Ю. Применение оценок на основе энтропии для сравнения криптостойкости алгоритмов шифрования // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 2. С. 105–106.

УДК 658.382.3

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ И ОХРАНОЙ ТРУДА: СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Гадельшина Д.Н., Исянова Г.Р., Хайруллина Л.И., Тучкова О.А.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: Ihda79@mail.ru

На предприятиях довольно часто происходит объединение должностей специалистов в области охраны труда и промышленной безопасности. Как правило, эти обязанности возлагаются на одного человека. Тождественны ли эти понятия? А вопросы производственного контроля? Имеются ли отличия в организации этого процесса в области охраны труда по сравнению с промышленной безопасностью? Сравнительному анализу этих понятий и посвящена данная статья.

Как известно, основная цель охраны труда – это сохранение жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности путем создания безопасных условий для работника. Цель мероприятий в области промышленной безопасности можно обозначить как снижение риска аварий на опасных производственных объектах. Но и в том, и в другом случае роль человеческого фактора очень значительна.

Для химических и нефтехимических производств характерен высокий риск для жизни сотрудников и безопасность персонала обеспечивается, прежде всего отлаженной работой служб по координации деятельности в области промышленной безопасности и охраны труда. При этом необходимо отметить тот факт, что систему управления охраной труда внедряют не только на опасных производствах, но и в офисах. На основании этого можно сделать вывод о том, что охрана труда может существовать без промышленной безопасности, а вот существование промышленной безопасности без охраны труда невозможно.

Охрана труда предполагает такие виды работ разработка локальных документов; планирование мероприятий по улучшению условий труда, добровольное и обязательное страхование работников, принятие организационных мер по безопасному течению технологического процесса. Промышленная безопасность в большей степени ориентирована на технические аспекты производственного процесса. Организации, которые эксплуатируют опасные производственные объекты, обязаны помимо неукоснительного соблюдения нормативных требований обеспечивать непрерывную работу приборов и систем контроля, проводить диагностику и экспертизу зданий, сооружений, устройств.

Основные нормативно-правовые акты, которые используются в области охраны труда и промышленной безопасности, различаются между собой. Например, основной закон, который регулирует охрану труда, представлен

в X разделе Трудового кодекса РФ, в области промышленной безопасности – это Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ. Хотя в этих и сопутствующих им документах нередко встречаются и очень похожие моменты. Например, если рассматривать законодательство в области промышленной безопасности, то на опасном промышленном объекте к работе допускается привлечение персонала с соответствующей квалификацией и без медицинских противопоказаний. Просматривается аналогия с охраной труда сразу в двух направлениях: обучение работника и медицинское освидетельствование. Для человека, который не ориентируется в этих областях глубоко, понятия «охрана труда» и «промышленная безопасность» покажутся идентичными.

Появились и действуют в этих областях два профессиональных стандарта: это специалист по охране труда (утв. приказом Минтруда России от 22.04.2021 г. № 274н) и специалист в сфере промышленной безопасности (утв. приказом Минтруда России 16.12.2020 г. № 911н). Трудовое законодательство не запрещает совмещать эти два стандарта, однако не все так просто. Специалист в области промышленной безопасности должен иметь высшее техническое образование по профилю производственного объекта, на котором он работает. В то время как для совмещения должности специалиста по охране труда достаточно пройти профессиональную переподготовку.

Отличаются между собой и надзорные органы управления. Охраной труда ведают Государственная инспекция труда и Минтруд России, промышленной безопасностью – Ростехнадзор.

Таким образом, правильнее было бы называть совмещенную должность на крупном промышленном предприятии «специалистом по промышленной безопасности и охране труда».

Не менее важным вопросом на любом предприятии являются также процессы производственного контроля. В области охраны труда – это контроль за соблюдением санитарных правил, гигиенических нормативов и выполнением санитарно-противоэпидемических мероприятий. В области промышленной безопасности – это соблюдение требований промышленной безопасности, контроль, направленный на предотвращение аварии. Производственный контроль на предприятиях организуют согласно Положения о производственном контроле, который определяет всю процедуру производственного контроля [1, 2]. И на опасном производственном объекте, и в обычной организации производственный контроль должен проводиться службой производственного контроля или сотрудником, который назначен приказом руководителя. В основе производственного контроля в организациях и на предприятиях лежат программы, утвержденные руководителем организации, предпринимателем или специально

уполномоченным работником, составленные в произвольной форме перед началом производственной деятельности.

Для достижения высокого уровня охраны труда и промышленной безопасности необходима организация не только эффективного производственного контроля за соблюдением требований охраны труда и промышленной безопасности, но и разработка и внедрение Систем управления охраной труда промышленной безопасностью – СУОТ и СУПБ соответственно [3, 4]. Обе системы, обеспечивающие безопасность производства являются составной частью административной системы управления. Под Системой управления промышленной безопасностью понимается структурированная совокупность управленческих решений, норм и процедур, посредством которых осуществляется и развивается деятельность по предотвращению рисков и соблюдению требований промышленной безопасности, Система управления охраной труда – комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, устанавливающих политику и цели в области охраны труда у конкретного работодателя и процедуры по достижению этих целей.

Таким образом, охрана труда и промышленная безопасность – это два разных механизма, которые обеспечивают безопасность персонала при повседневной деятельности предприятия. В настоящее время все очевиднее тот факт, что происходит глубокая трансформация этих сфер в связи с внедрением рис-ориентированного подхода, внедрением элементов цифровизации, поощрением инновационной деятельности предприятий, предоставлении им самостоятельности в определении и реализации мер по охране труда и промышленной безопасности. Наблюдаются и некоторые негативные явления в этих сферах: отсутствие четких и конкретных планов мероприятий, сокращение служб охраны труда или должности специалиста по охране труда, незначительность санкций за нарушение законодательства в области труда и промышленной безопасности и некоторые другие. Многочисленными исследованиями обосновано и доказано, что профессиональные и компетентные специалисты – важный компонент систем управления охраной труда и промышленной безопасностью, если они обладают высокой профессиональной квалификацией, психологической устойчивостью, способностями быстрой адаптации к меняющимся условиям и изменениям, способностью принимать и действовать в рамках имеющейся и реализующейся культуры безопасности, соответствующей современным реалиям.

Объединять эти сферы или оставлять отдельными единицами – прерогатива работодателя. Специалисты в этих областях однозначно должны быть высококвалифицированными и уметь работать с большим количеством документов.

Литература:

1. Санитарные правила СП 1.1.1058-01 «Организация и проведение производственного контроля за соблюдением санитарных правил и выполнением санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий». – URL: https://docs.cntd.ru/document/901793598/titles/3NFB6K8 (дата обращения: 29.03.2022).

2. Постановление Правительства РФ от 18.12.2020 г. № 2168 «Об организации и осуществлении производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности». – URL: https://base.garant.ru/400120660 (дата обращения: 29.03.2022).

3. Приказ Минтруда РФ от 29.10.2021 № 776Н. «Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда». – URL: https://docs.cntd.ru/document/727092790 (дата обращения: 29.03.2022).

4. Постановление Правительства РФ от 17.08.2020 № 1243 «Об утверждении требований к документационному обеспечению систем управления промышленной безопасностью». – URL: https://docs.cntd.ru/document/565557776 (дата обращения: 29.03.2022).

УДК 658.589

МОДЕРНИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КЛЕЕВЫХ СМЕСЕЙ

Дусчанов М.Э., Буланкин М.В., Шильникова Н.В., Гимранов Ф.М.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: snv-knitu@yandex.ru

Применение современного оборудования в производстве клеевых смесей является в настоящее время необходимостью, связанной с обеспечением безопасности технологического процесса и выпуском конкурентно способной продукции. Клеевые композиции используют для покрытия поверхностей, на которых они образуют защитное и декоративное покрытие с определенными качествами, для их производства существует много технологических схем, где применяется однотипное оборудование. При этом, актуальна проблема замены технически устаревшего оборудования на современные модели, с целью повышения качества выпускаемой продукции и безопасности производства.

Одним из способов решения указанной проблемы является модернизация технологического процесса, путем частичной замены (обновления) оборудования или их отдельных элементов [1,2]. Такие действия направлены на повышение показателей точности, скорости выхода конечной продукции, снижения энергопотребления, расширения номенклатуры выпускаемых клеев.

Так, очень востребовано производство жидких клеев и клеящих пленок марок (88, КНО, 4НБ-ув и продукта 3В) для металлических поверхностей в авиационной, машиностроительной и легкой отраслях промышленности. Клеевые соединения герметичны и позволяют повысить надежность уплотнений отдельных узлов и элементов конструкций. Склеивающие субстанции представляют собой многокомпонентную смесь, сцепление поверхностей обеспечивается межмолекулярным взаимодействием (адгезией) клея и соединяемого материала. Изделия, склеенные клеями 88-НП-32, 88-НП-43 предназначены для работы в среде воздуха при температуре от минус 40°С до плюс 90°С. Крепление этими клеями стойко к воздействию пресной и морской воды в естественных условиях. Клей 4НБ-ув предназначен для склеивания вулканизированных резин и резинотканевых материалов.

Качество производимых клеевых смесей зависит от соблюдения технологических особенностей [3], от работы применяемого оборудования (вальцы, смесители, мешалки, емкости, трубопроводы, насосы, мерники и др.). Основными требованиями, предъявляемыми к оборудованию, являются безопасность, надежность и удобство эксплуатации. Обеспечение этих требований для устаревшего оборудования не всегда возможно, следовательно, нужна модернизация

технологического оборудования или его составляющих, т.е. усовершенствование, отвечающее современным требованиям.

Таблица 1. Направления модернизации технологического оборудования.

№	Основные направления
1	Усовершенствование конструкций действующих аппаратов и установок, повышающих их режимные характеристики и технические возможности.
2	Механизация и автоматизация для повышения производительности.
3	Перевод оборудования на программное управление.
4	Повышение точности, расширение технологических возможностей и изменение технологического назначения применяемого оборудования.

Решению о модернизации предшествует анализ работы каждого отдельного участка и выявление проблемных мест, оценивается возможность проведения поэтапной модернизации. Проводят полную диагностику оборудования и определяют повреждения или поломки. При необходимости проводят замену определенных деталей, а в профилактических целях чистку всех механизмов от загрязнения и ржавчины. Увеличение долговечности и надёжности оборудования возможно за счёт повышения износостойкости ответственных деталей, улучшения условий смазки, усиления слабых звеньев, установки защитных устройств [4], новых систем автоматического управления.

С целью совершенствования процесса производства клеев предложена замена реактора смесителя на модель из нержавеющей стали с улучшенными техническими характеристиками. Предложенный реактор смеситель предназначен для приготовления продукта путем смешения компонентов в лакокрасочном производстве. Его используют для работы под давлением и вакуумом в широком спектре температур (от -80 до + 350 °С), ёмкость от 50 л до 50 м^3, при этом важно, чтобы все технологические соединения и резьбовые адаптеры легко разбирались и заменялись. Механическая прочность обеспечивает долгий срок службы. Работа с реактором из нержавеющей стали является безопасной, т.к. исключается возможность механического повреждения, что важно при работе с агрессивными и взрывоопасными средами.

Увеличение производительности реакторов смесителей, мешалок возможно за счёт повышения мощности приводов и частоты вращения, числа ходов. Для этого производится замена двигателя и изменение кинематики отдельных механизмов, а также за счёт механизации и автоматизации таких процессов, как крепление и снятие детали, смена скоростей, холостой ход и др.

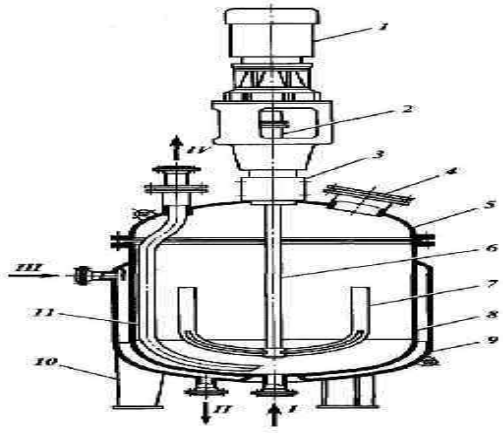


Рис. 1. Технологическая схема реактора нержавеющей стали. 1 - мотор редуктор; 2 - муфта; 3 - уплотнение; 4 -люк; 5 - крышка; 6 - вал 7 - перемешивающее устройство; 8 – корпус; 9 – рубашка; 10 – опора; 11 - труба перемешивания.

Таблица 2. Технические характеристики FYG100

Модель	FYG100
Диаметр, мм	1400
Бак давления, МПа	0,25-0,5
Объём, м ^{3}	0,63
Мощность двигателя, квт	2
Частота вращения, об/мин	85
Рабочее давление, МПа	0,30

С целью дальнейшей модернизации технологического оборудования рекомендовано применение новых типов мерников. Металлические мерники предназначены для измерения объема жидкости и растворов с температурой от -25°С до +35°С. Состоят из резервуара, измерительной горловины с водомерной трубкой, измерительной шкалы и ампулы уровня для контроля установки мерника в вертикальное положение. Мерники вместимостью 20 и 50 дм^3 устанавливаются на раме и снабжены сливными кранами. Измерительная шкала и сливные краны после поверки мерника пломбируются доверительными пломбами. В состав мерников с шифром «01П» входит пеногаситель, который герметично крепится на горловине мерника. Принцип его работы заключается в следующем: мерник устанавливается в вертикальное положение, которое контролируется ампулой уровня; в предварительно смоченный мерник рабочая жидкость подается в горловину или в приемное отверстие пеногасителя.

Таким образом, рассмотренные способы модернизации реакторов смесителей и мерников в производстве клеевых смесей позволят повысить качество выпускаемой продукции и безопасность технологического процесса.

Литература:

1. Ефимчук И.В., Яшина Н.И. Проблемы высокотехнологичной модернизации российской экономики // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2010, № 3(2), С. 460–464.

2. Мельников В.П., Рогожин К.Л., Схиртладзе А.Г. Ключевые проблемы и решения технологической модернизации России. // Ежегодник. Вып.7 .-М.: 2013,-4.2-С.61-70.

3.. Линдерс М., Джонсон Ф., Флинн А., Фирон Г. Управление качеством продукции // учебник - 13-е изд. - М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2012, - 754 с.

4. Дубровина Н.А. Структурные факторы динамики модернизации машиностроения России // Финансы и кредит. 2014, № 3. С. 21.

УДК 614.8

ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА РИСКА АВАРИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКИ

Каюмов Т. И., Галеев А. Д.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: timkaym@mail.ru

Введение. Технологические установки и объекты нефтегазопереработки (НГП) относятся к сложным технологическим системам, которые предназначены для реализации процессов переработки углеводородного сырья в товарные продукты или полуфабрикаты, идущие на дальнейшую переработку.

Для предприятий нефтехимической и нефтеперерабатывающей отраслей промышленности характерны аварийные ситуации, такие как полное или частичное разрушение технологических аппаратов и установок, пожар пролива, образование токсичных облаков, взрыв топливовоздушной смеси и иные опасные ситуации.

Для снижения числа аварий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслей промышленности, в первую очередь, необходимо знать первоисточник – причину, в результате которой произошло чрезвычайное происшествие. Для этой цели был проведен анализ чрезвычайных происшествий случившихся на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности в период с 2000 по 2020 гг.

Адаптация этих методов к условиям НГП и возможность их использования при анализе риска установок и объектов нефтегазопереработки - актуальная проблема в настоящее время.

Основная часть. Риск эксплуатации промышленных предприятий, как правило, связан с бесконтрольным высвобождением энергии или утечками взрывопожароопасных или токсических веществ. Причем реальную опасность для окружающих представляет не все предприятие, а отдельные его структурные подразделения (установки, цехи, производства, склады и т. д.) [1]

Особенность установок нефтегазопереработки определяется высокими взрывопожароопасными свойствами технологических сред. Анализ оборудования установок НГП, как элементов сложной технологической системы, по содержанию взрывопожароопасных веществ, количеству каждого вида оборудования на установках, частоте и характерам отказов и неполадок позволил условно поделить его на следующие виды: колонные аппараты, резервуары и емкости, теплообменное оборудование, нагревательные печи, насосно-компрессорное оборудование, технологические трубопроводы, установки отчистки. Учитывая специфику установок нефтегазоепереработки и современные методы анализа риска

опасных производственных объектов, которые использовались для решения подобных проблем в других отраслях промышленности, предлагаются следующие основные этапы анализа риска эксплуатации установок нефтегазопереработки.

На первом этапе проводится идентификации опасности данного объекта, под которой понимается процесс ее выявления с учетом особенностей промышленного объекта и определения характеристик, в результате чего составляется перечень нежелательных событий, приводящих к аварии.

По результатам анализа количества отказов и неполадок выявляется оборудование, которое имеет наибольшее количество отказов, способных привести к аварийной ситуации. На основе распределения веществ в каждом элементе оборудования и с учетом их физико-химических свойств необходимо провести экспресс-оценку параметров возможного взрыва, пожара, характеристику токсического заражения с определением зон поражения и количеством возможных жертв. Экспресс-оценку можно провести по известным методикам [1-3], которые позволяют в короткие сроки с достаточной точностью для данного этапа определить возможные последствия аварийной ситуации на установках нефтегазопереработки, на основании чего принять решение о дальнейшем более детальном проведении анализа риска.

В случае принятия решения об относительной безопасности промышленного объекта и нецелесообразности проведения дальнейшего анализа риска разрабатываются организационные мероприятия по поддержанию существующего уровня безопасности данного объекта (периодическая подготовка и аттестация персонала, своевременный и качественный ремонт оборудования, ведение технологического режима в пределах регламентированных параметров и т. д.).

При необходимости проведения дальнейшего анализа риска проводится его оценка, которая состоит из анализа частоты возникновения аварийной ситуации и последствий аварийной ситуации (второй этап). Анализ частоты заключается в определении вероятности возникновения конкретной опасности, при этом используются качественные (логические методы, экспертные оценки) и количественные (использующие статистические данные по аварийности и надежности технологической системы, соответствующие типу объекта или виду деятельности) методы оценки. [4]

На основе перечня наиболее «энергоемкого» и «проблемного» оборудования производится анализ неполадок и отказов оборудования и анализ аварий, ранее произошедших на данном или подобных объектах [5]. Результатом анализа неполадок и аварий является выявление причины возникновения аварийных ситуации и их последствий. На основе этого выявляются причинно-следственные связи отдельных событий, приводящих к аварийной ситуации, и сценарии возможных аварийных ситуаций. Количественные характеристики отказов

и неполадок оборудования (вероятность отказа, интенсивность потока отказов, средняя наработка на отказ) определяется по известным математическим зависимостям, принятым в теории надежности, для каждого вида отказа или неполадки.

По известным сценариям возникновения и развития аварийных ситуаций с учетом технологических связей отдельных элементов технологической схемы и количественных характеристик отказов и неполадок строятся логико-графические схемы развития аварийных ситуаций для наиболее «энергоемкого» и «проблемного» оборудования, перечень которого выявлен ранее. Результатом данного этапа анализа риска - оценки вероятности возникновения аварийной ситуации - являются количественные показатели, полученные с помощью логико-графических схем [6].

Недостатком данного этапа является наличие неопределенности, обусловленной изменчивостью свойств (например, количество горючего вещества в резервуаре в момент аварии, координаты подвижного объекта, температура атмосферного воздуха, скорость ветра и т. д.) и скудностью и неточностью знаний, например, физико-химических свойств горючего вещества, констант модельных уравнений т. д.

Третий этап анализа риска эксплуатации оборудования - анализ последствий – включает оценку воздействия взрыва, пожара на людей, имущество и окружающую среду. Для прогнозирования последствий необходимо оценить физические эффекты нежелательных событий (пожара, взрыва, токсического выброса). Анализ последствий от аварийных событий проводится на основе ранее проведенного распределения веществ по технологическим блокам и по отдельным видам оборудования с учетом технологических процессов и физико-химических свойств технологической среды. [7-9]. Кроме этого, необходимо учесть вариант разгерметизации оборудования в результате появления дефектов в оборудовании (трещины, разгерметизация запорной арматуры, действие коррозии). Для этого необходимо определить количество выброшенного вещества и площадь разлива жидких их углеводородов.

Недостатком данного этапа является невозможность анализа состояния конкретной установки, а также большое влияние человеческого фактора (действие персонала, качество контроля при запуске и т. д.)

Заключение. Результатом анализа риска является разработка мероприятий, направленных на повышение надежности оборудования, оснащение системами противоаварийной защиты (ПАЗ), совершенствование управление технологическим процессом и снижение потенциальной опасности объекта.

Анализ результатов расследования причин аварий за последние двадцать лет (2000–2020 гг.) показывает, что неудовлетворительное состояние технических устройств является основной причиной. Немалая часть аварий на НПЗ

происходит из-за нарушения правил техники безопасности и пожарной безопасности. Также частой причиной возгораний являются образование парогазового облака, разлив нефтепродукта в результате нарушения герметичности оборудования.

Проанализировав аварии на объектах НГП РФ считаю целесообразным сделать больший уклон на анализ состояния оборудования при вводе его в эксплуатацию как после ремонта, так и на первоначальном запуске. Т.к. большая часть аварийных ситуаций происходит непосредственно при запуске оборудования. [6]

Оснащение установок НГП системами ПАЗ, которые предназначены для контроля достижения значений технологических параметров до критических и своевременного перевода системы в безаварийное состояние, является в настоящее время обязательным условием при проектировании, строительстве и реконструкции установок.

Литература:

1. "Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах" Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору приказ от 11 апреля 2016 г. N 144

2. Пожарная безопасность. Общие требования: ГОСТ 12.1.00491 ССБТ. - Введ. 01.07.92. М.: Государственный комитет по стандартам, 1992.

3. Руководство по безопасности "Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей" утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31 марта 2016 г. N 137

4. Абросимов А. А. Экология переработки углеводородных систем. М.: Химия, 2002.

5. Лебедева М. И., Богданов А. В., Колесников Ю. Ю. Аналитический обзор статистики по опасным событиям на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». 2013.

6. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2016 году http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/

7. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2017 году

8. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2019 году

9. Хафизов И. Ф., Краснов А. В., Халитова Р. М. Основные причины аварий установок первичной переработки нефти и меры их предотвращений // Актуальные проблемы науки и техники – 2015: матер. VIII Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых. 2015

10. Статья Хусниярова М.Х. «Анализ риска эксплуатации оборудования» http://www.dissers.ru/books/1/8649-2.php

УДК 661.152.33

АНАЛИЗ ЭНЕРГОИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ СЛОЖНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Звончевский А.Г., Шелгинский А.Я.
Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт,
Email: universe@mpei.ac.ru

В работе проведён термодинамический анализ эффективности теплотехнологических процессов производства сложных минеральных удобрений (аммофоса). Отмечено, что рассматриваемая технология производства сложных минеральных удобрений является наиболее распространенной [1], поскольку требует минимальных затрат материально-технического и временного характера, по сравнению с альтернативными технологическими схемами. Кроме того, предприятие по производству аммофоса, функционирующее на базе двухэтапной системы нейтрализации с разнесенной системой грануляции и сушки, позволяет значительно повысить производственные мощности и таким образом увеличить объемы реализуемой продукции. На примере одной технологической линии по производству аммофоса, производительностью 27,5 т/ч по готовому продукту, проведён анализ теплоиспользования в элементах технологической системы. Теплотехнологическая схема производства представлена на рисунке 1.

Технологически, данное производство работает следующим образом: исходное сырье из хранилища подают в группу нейтрализаторов, где осуществляется нейтрализация кислот газообразным аммиаком. Затем кислая пульпа самотеком направляется на вторую стадию нейтрализации в аммонизатор-гранулятор (АГ), где происходит смешение обратного потока ретура с пульпой, образуя укрупненные гранулы аммофоса. Далее гранулы аммофоса проходят стадию сушки, охлаждаются, классифицируются по фракционной составляющей и транспортируются на склад готовой продукции.

Анализ термодинамической эффективности проводился на основе метода термодинамических потенциалов [2]. Максимальная полученная энергия при соответствующих условиях протекающего процесса определяется, кДж/кг:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = \Delta H - T\int_{T_1}^{T_2} C_P dT / T, \qquad (1)$$

где ΔH – изменение энтальпии в ходе процесса, кДж/кг;

T – температура, К;

ΔS – изменение энтропии, кДж/кг·К.

C_p – удельная изобарная теплоемкость, кДж/кг·К.

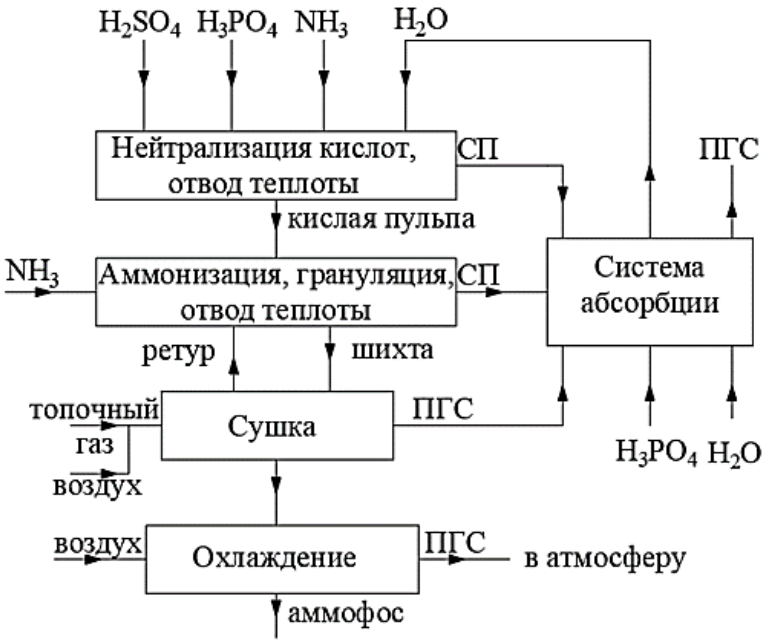


Рисунок 1. Теплотехнологическая схема производства аммофоса.

Изменение температуры учитывалось в соответствии с уравнением Аррениуса:

$$2{,}3 \cdot \lg K_2 / K_1 = E / R \cdot \left(1/T_1 - 1/T_2\right), \tag{2}$$

где K_1 и K_2 – константы скорости реакций при температурах T_1 и T_2;

E – энергия активации реагирующих веществ, Дж/моль;

R – газовая постоянная, Дж/моль·К.

Для определения термодинамической эффективности обратимого процесса использовались функциональные эксергетические зависимости:

$$\Delta E = \Delta H - T_0 \Delta S \tag{3}$$

Эксергетический баланс системы определяется общим уравнением:

$$E_{вх} = E_{вых} + \Delta E_{вт} + \sum \Delta E_{вн} + L + \Delta E \ , \tag{4}$$

где $E_{вх}$ – эксергия вещества, поступающего в систему;

$E_{вых}$ – эксергия веществ, отводимых из системы;

$\Delta E_{вт}$ – приращение эксергии системы;

$E_{вн}$ – приращение эксергии внешнего источника теплоты, участвующего в теплообмене с окружающей средой;

L – механическая или электрическая работа, совершаемая системой;

ΔE – внутренние потери эксергии в результате необратимости процессов, происходящих в системе.

Критерий термодинамической эффективности теплотехнологических процессов, протекающих в элементах технологической системы, определяется:

$$\eta = \left(\sum E_1 + \sum E_3\right) / \left(\Delta E + \sum E_2\right), \tag{5}$$

где $\sum E_1$ – сумма эксергетических потоков, выработанных и используемых за пределами системы;

$\sum E_2$ – сумма эксергетических потоков, потребляемых системой от сторонних источников энергии;

$\sum E_3$ – сумма эксергетических потоков, используемых внутри системы;

ΔE – разность эксергетических потоков на входе и на выходе системы;

Таким образом, теоретическая величина критерия термодинамической эффективности предприятия по производству аммофоса составила 11%. По результатам данного расчета удалось определить источники нерационального использования тепловой энергии, что в целом показывает относительно низкую энергоэффективность использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Также, определен температурный уровень имеющихся источников вторичных энергоресурсов (ВЭР) и на их основе предложены технические решения, позволяющие повысить общую энергоэффективность теплотехнологических процессов в производстве аммофоса. В частности, предложено использовать теплоту парогазовой смеси (ПГС) после отделения сушки для нагрева воздуха, что позволяет сократить потребление природного газа на 4,6 млн $м^3$/год на одной технологической линии.

Литература:

1. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ИТС 2-2019. Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот – 2 изд. – М.: Бюро НДТ, 2019. – 818 с

2. Трубаев П.А. Термодинамический и эксергетический анализ теплотехнологических систем: Учеб. пособие / П.А. Трубаев, П.В. Беседин, Е.А. Зайцев. – Белгород: БГТУ им. В.Г.Шухова, 2009. – 104 с.

УДК 661.152.33

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ПЫЛЕГАЗООЧИСТКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ ВЭР ТЕХНОЛОГИЙ В ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

Звончевский А.Г., Шелгинский А.Я.
Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт,
Email: universe@mpei.ac.ru

В работе анализируются наиболее эффективные методы и аппараты газоочистки для химических производств [1, 2] на основе технико-экономического анализа, рассматриваются инновационные и перспективные обеспыливающие системы, предназначенные для обеспечения нормальной функциональности разработанных энергоэффективных систем. Реализация современных пылеулавливающих установок позволит использовать тепловой потенциал вторичных энергоресурсов (ВЭР) в энерготехнологической системе производства сложных минеральных удобрений для достижения лучших технико-экономических показателей. На примере одной технологической линии производства аммофоса показано, что практически 9 МВт тепловой энергии попросту выбрасывается в окружающую среду (ОС) через систему абсорбции. В качестве тепловых ВЭР выступает соковый пар и парогазовая смесь (ПГС) после систем нейтрализации и сушки. Как выяснилось, прямое использование ПГС в теплоиспользующем оборудовании приведет к преждевременному отказу основного оборудования реализуемого мероприятия из-за высокой степени запыленности газового потока. Целесообразность реализации разработанного мероприятия по использованию запыленной ПГС потребовало дополнительного технико-экономического обоснования (ТЭО).

На основе теоретических расчетов, эксплуатационного опыта, сопоставления технико-экономических критериев и технологических требований к системе газоочистки и к энергоносителю [3, 4], предложены наиболее предпочтительные установки и рассчитаны высокоэффективные комбинированные системы сухой очистки ПГС от пыли, учитывающие особенности физико-химического состава и аэромеханических свойств энергоносителя. Согласно расчету, при реализации системы пылеулавливания эффективностью 99,79% капитальные затраты составят 133 млн. рублей. При этом, основную долю эксплуатационных затрат составляет потребляемая электроэнергия в количестве 2,4 ГВт·ч/год, что в денежном выражении составляет около 13 млн. руб./год. Годовой экономический эффект при реализации низкопотенциальной тепловой энергии ПГС для подогрева воздуха, идущего в печь и на смешение с продуктами горения печи, составляет

3828 т.у.т или около 40 млн. руб./год. Кроме того, за счет понижения температуры ПГС перед системой абсорбции, повышаются технологические показатели за счет улучшения протекающих физико-химических процессов и интенсификации абсорбции кислотных паров в орошаемую воду, что в конечном итоге, снижает выбросы вредных соединений с кислотными парами и снижает тепловое загрязнение окружающей среды. Полученные результаты в данной работе позволили сформировать перечень методических рекомендаций при выборе газоочистных сооружений и систем с целью реализации разработанных научно-технических решений по энергосбережению на основе эффективного использования тепловых ВЭР технологий.

Литература:

1. Коузов П.А. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности / П.А. Коузов, А.Д. Мальгин, Г.М. Скрябин – СПб.: Химия, 1993. – 320 с.
2. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. ИТС 15-2021. Утилизация и обезвреживание отходов (кроме термических способов). – М.: Бюро НДТ, 2021. – 222 с.
3. Самохвалов Н.М. Очистка промышленных газов от пыли: монография / Н.М. Самохвалов, В.В. Виноградов, Ю.А. Зыкова – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. – 170 с.
4. Зыков Е.Г. Совершенствование процесса обеспыливания газов при модернизации промышленных систем пыле- и золоулавливания с инерционными аппаратами: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук – Томск. политехн. ун-т, Томск. – 2005. – 22 с.

УДК 621.928.6

ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ЧАСТИЦ СИЛИКАГЕЛЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ КЛАССИФИКАТОРЕ

Зинуров В.Э., Дмитриев А.В.
Казанский государственный энергетический университет,
E-mail: vadd_93@mail.ru

Важной задачей при получении промышленного сыпучего материала на основе силикагеля является его фракционирование на определенные гранулометрические фракции. Следует отметить, что промышленный силикагель используется на предприятиях нефтехимического направления в качестве катализатора и адсорбента. На текущий момент времени необходимо получение порошка с граничным зерном равным 40 мкм. Данная проблема является актуальной для предприятия «Салаватский катализаторный завод».

В общем случае фракционирование частиц осуществляется с помощью различных аппаратов: гравитационные камеры, инерционные аппараты, электростатические аппараты, грохоты, сита [1]. При размере частиц менее 50 мкм рекомендуется применять центробежные классификаторы. Однако, недостатком большинства данных аппаратов является низкая селективность [2].

С целью увеличения селективности фракционирования частиц силикагеля предлагается применять центробежный классификатор, представленный на рисунке 1.

Принцип действия единичного центробежного классификатора - сепаратора можно описать следующим образом (рис. 1). Газовый поток с диспергированными в нем частицами силикагеля различной дисперсностью входит в центробежный классификатор через входную часть трубы *1*. Далее запыленный поток движется по внутренней трубе и устремляется в прямоугольные щели *4*, которые проделаны в осесимметричном направлении, и в нижнее отверстие, которое проделано во внутренней трубе. При движении запыленного потока по внутренней трубе и при его повороте в сторону прямоугольных щелей *4* часть крупных частиц силикагеля выпадает из потока за счет сил инерции и через нижнее отверстие ссыпается в бункер. При прохождении основной части запыленного потока через прямоугольные щели каждая отдельная струя газа делилась на две равные части, одна из которых двигалась в правую сторону межтрубного пространства, другая в левую сторону. За счет цилиндрической формы внешнего корпуса центробежного классификатора все струйки газа приобретали вращательное движение и двигались как отдельные вихри в верхнюю часть устройства по межтрубному пространству. Следует отметить, что размеры цилиндрических труб и положения прямоугольных щелей подобраны так, что в межтрубном

пространстве образовывались относительно устойчивые вихри. При этом каждый вихрь имел общие точки соприкосновения с соседними вихрями, вектора скорости в них были сонаправлены, что вызывало эффект «взаимоподдержания», т.е. вероятность разрушения структуры вихря по высоте устройства уменьшалась.

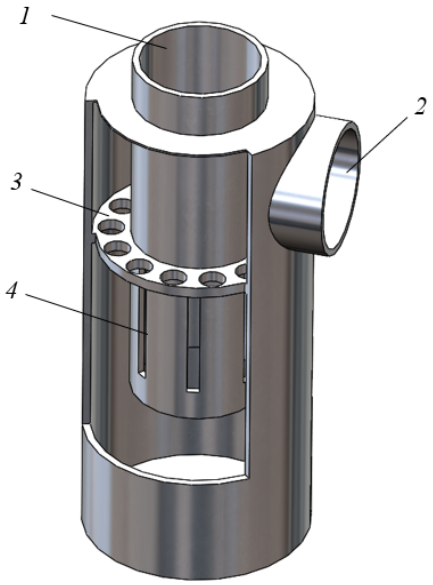


Рис. 1. Центробежный классификатор: *1* – входное отверстие, *2* – выходные отверстие, *3* – пластина с круглыми отверстиями, *4* – прямоугольные щели

Также наличие круглых отверстий в пластине *3* корректирует и упорядочивает структуру вихрей. При вращении запыленного газа возникали центробежные силы, под действием которых частицы выбивались из структурированного потока и оседали в бункере. Далее поток с мелкодисперсной фракцией выходил из центробежного классификатора через боковое выходное отверстие *2*.

В докладе показано, что в ходе численного моделирования получены зависимости эффективности центробежного классификатора от размера частицы, которые описываются сигмоидными функциями. При этом крупность граничного зерна варьировалась от 40 до 50 мкм в зависимости от входной скорости газового потока от 4 до 16 м/с. При численном моделировании плотность частиц силикагеля задавалась равной 1075 кг/м^3. Относительная скорость частиц задавалась равной 0 м/с.

Достоинствами центробежного классификатора являются низкие потери давления, легкость в применении, простота сборки, высокая селективность и низкие капитальные затраты.

Работа выполнена при финансовой поддержке Стипендии Президента РФ СП-3577.2022.1.

Литература:

1. Зинуров, В. Э. Разработка классификатора с соосно расположенными трубами для разделения сыпучего материала на основе силикагеля / В. Э. Зинуров, И. Н. Мадышев, А. Р. Ивахненко, И. В. Петрова // Ползуновский вестник. – 2021. – № 2. – С. 205-211.

2. Зинуров, В.Э. Численное моделирование газодинамики в центробежном классификаторе / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, Н. Ф. Сахибгареев, Д. Н. Латыпов, М. Г. Гарипов // Вестник технологического университета. - 2021. – Т. 24. - № 12. – С. 128-132.

3. Zinurov, V.E. Effect of Design Parameters of Classifier with Coaxial Pipes on Efficiency of Fractionation of Finely Divided Bulk Material / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. N. Madyshev, O. S. Dmitrieva // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 57. – No 7-8. – P. 531-537. – DOI 10.1007/s10556-021-00971-4.

4. Zinurov, V.E. Classification of bulk material from the gas flow in a device with coaxially arranged pipes / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, M. A. Ruzanova, O. S. Dmitrieva // MATEC Web of Conferences. – 2020. – V. 193. – P. 01056.

УДК 504.53.062.4

РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ В ЯМАЛО-НЕНЕЦКОМ АВТОНОМНОМ ОКРУГЕ

Краевой К.А., Озерова Н.В.
Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт,
E-mail: Kraevoyka@yandex.ru.

По данным Росстата РФ за 2021 год площадь нарушенных земель в Ямало-Ненецком автономном Округе (ЯНАО) составила 0,1 миллионов га [1].

Также в докладе федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии РФ за 2020 год сообщается, что наибольшие площади нарушенных земель в Российской Федерации расположены на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (105,4 тыс. га) [2]. Исходя из этих данных, можно сделать вывод, что за год не осуществлялись работы по рекультивации всех загрязненных земель.

На территории ЯНАО сосредоточены крупнейшие в России запасы углеводородного сырья, поэтому нефте- и газодобывающие отрасли являются ключевыми в экономике региона.

Рекультивация нефтезагрязненных земель в ЯНАО имеет определенные особенности. В силу климатических условий многолетней мерзлоты почва крайне долго самовосстанавливается в данном регионе.

Нами был проведен комплексный анализ состояния почв и растительности на участках разливов месторождения нефти в пределах Комсомольского нефтяного месторождения, находящегося в эксплуатации «РН-Пурнефтегаз» Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа.

Общая площадь месторождения составляет 1368,91 км^2. Суммарная площадь загрязненных участков месторождения 0,016476 км^2, что составляет 1,6476га.

Из данных таблиц 1 и 2 видно, что отношение углерода к азоту (C/N), определяющее обогащенность органическим веществом, больше в 3-5 раз на загрязненных участках почвы. Отношения C к N показывает обогащенность азотом и указывает на его способность к трансформации. Крайне низкая обеспеченность азотом, отмеченная в исследованных почвах, является одной из причин неактивной и медленной трансформации углеводородов нефти в них [3].

Нами было предложено провести комплексную рекультивацию, состоящую из трех этапов: подготовительного, технического и биологического.

Таблица 1. Содержание компонентов гумуса фоновой почвы

Глубина, см	$C_{общ.}$,%	C/N	Сумма гуминовых кислот, кДа	Сумма фульво-вых кислот, кДа
Фон 1. Участок 1. (Незагрязненный участок земли)				
0(3)-5	20,07	28,6	12,6	14,6
5-10	0,48	16,4	13,2	30,4
10-30	0,29	18,2	15,7	56,4

Таблица 2. Содержание компонентов гумуса нефтезагрязненных почв 2022 г.

Глубина, см	$C_{общ.}$, %	C/N	Сумма гуминовых кислот, кДа	Сумма фульво-вых кислот, кДа
2022 г., Участок 1. (Нефтезагрязненный участок земли)				
0-10	5,84	61,2	3,3	5,4
10-20	4,76	104,5	4,9	9,2

Подготовительный этап рекультивации включает:

- описание рельефа поверхности нефтезагрязнённого участка (обводненность, формы рельефа, уклоны и т.д.),

- отбор проб с нефтезагрязнённого участка согласно существующим ГОСТам и нормативам по отбору проб для определения количества нефтепродуктов и солей на данном участке;

- фотосъемка участка до рекультивации (с учетом характерных для данного участка привязок);

- определение кислотности, характера загрязнения, степени замазученности участка, вероятность динамики площади разлива и т.д.

Технический этап рекультивации включает:

- сбор и откачку остатков сырой нефти с поверхности;

- срезание и удаление верхнего загрязненного слоя почвы;

- вспашку и нанесение слоя торфа на поверхность.

Биологический этап рекультивации включает:

- обработку поверхности почвы специальными микробиологическими препаратами, ускоряющими процесс биодеструкции нефти в почве;

- посев смеси многолетних трав и внесение минеральных удобрений.

В качестве многолетних трав при рекультивационных работах использовали доступные семена злаковых растений бореальных видов, таких как овсяница луговая (устойчива к загрязнению почв нефтепродуктами) и клевер луговой. Травы являются сенокосными и пастбищными, поедаются оленями, лошадьми,

крупным рогатым скотом. Использование этих видов многолетних трав позволяет получить задернение нарушенных земель хорошего качества.

Был произведен сравнительный расчет стоимости причиненного вреда почве по установленной методике [4]. Ущерб, причиненный почве составил 1213,31 млн. руб.

Стоимость предполагаемых работ по рекультивации почвенных покровов состоит из затрат на проведение подготовительного, технического и биологического этапов и составляет соответственно:

стоимость подготовительного этапа: 1 047504 руб.;

стоимость технического этапа: 2103914,685 руб.;

стоимость биологического этапа: 813042,9223 руб.

Таким образом итоговая стоимость рекультивации: 3946461,607 руб.

Эколого-экономический расчет показал, что рекультивация нефтезагрязненной земли на Комсомольском нефтяном месторождении выгодна. Экологический эффект достигается за счет улучшения экологической обстановки на рекультивируемой территории и как следствие этого снижение заболеваемости населения, повышение качества сельскохозяйственной продукции, питьевой воды и воздуха. Кроме того, посадка многолетних трав, в частности клевера и овсяницы луговой, способствует поглощению углекислого газа, который выделяется в больших объемах от технологических процессов предприятий нефтегазовых промышленностей.

Экономический эффект проявляется в возможности получения доходов от использования восстановленных земель.

Полный экономический результат рекультивации является многоцелевым и межотраслевым мероприятием, определяется с учетом всех положительных воздействий, достигаемых в разных сферах:

- социально-экологические результаты - создание благоприятных условий обитания в районе размещения объектов рекультивации. Это сказывается, как правило, на сокращении заболеваемости населения, увеличении производительности труда, улучшении условий отдыха и получении, таким образом, дополнительной продукции;

- природоохранные результаты - сокращение ущерба, причиняемого нарушенными землями окружающей среде.

Литература:

1. Данные Росстата за 2021 год. https://www.fedstat.ru/indicator/38129

2. Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2020 году, М: Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии, 2021 - 197 с.

3. Орлова Е.Е., Бакина Л.Г., Дзиов К.Х., Ершов Н.Н. Влияние нефтяного загрязнения дерново-подзолистых почв на экологическую устойчивость их гумуса // Гумус и почвообразование. Сб. науч. тр. СПбГА, СПб, 1999, с.30-35.

4. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 8 июля 2010 г. №238 (с изменениями на 18 ноября 2021 года) «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды».

УДК 622.692.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ И ОПТИМИЗАЦИИ УСЛОВИЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТИ

Курасов О.А.
Томский политехнический университет,
E-mail: olegakurasov@gmail.com

Моделирование задач анализа процессов и оптимизации условий транспортировки и переработки нефти особенно актуальны в трубопроводном транспорте, и, в частности, в нефтегазовой промышленности. Математическое моделирование позволяет рассчитывать технологические параметры нефтяного оборудования без проведения промышленных экспериментов.

В работе предлагается метод расчетного определения показателей риска и вероятности возникновения инцидентов на нефтеперерабатывающих предприятиях и сооружениях магистральных нефтепроводов при их эксплуатации в штатных и аварийных ситуациях.

Общая постановка задачи исследования сводится к сопротивлению некоторому будущему механизму отказа. Существует большое разнообразие доступных методов смягчения негативных последствий и методов их контроля, которые позволяют прогнозировать технические условия при проектировании, эксплуатации и техническом обслуживании ОПО [1].

Основным показателем является вероятность безотказной работы, которая может быть определена по формуле (1):

$$P(\tau) = e^{-\lambda\tau}, \quad (1)$$

где λ = интенсивность отказов; τ = время.

Основной статистической характеристикой аварийности на НП является интенсивность аварий (2):

$$\lambda = \frac{N}{L \cdot \tau}, \quad (2)$$

где L = протяженность НП; τ = время.

Риски $R(\tau)$, сформированные на этой стадии жизненного цикла τ, оцениваются в соответствии с вероятностью P(τ) отказов, аварийных или катастрофических ситуаций и ущербам $U(\tau)$ как (3) [2]:

$$R(\tau) = P(\tau) \cdot U(\tau). \quad (3)$$

Функция риска лучше подходит для оценки безопасности оборудования, поскольку она содержит оценки потенциальных потерь.

Вероятностные характеристики, представленные «деревьями событий» и «деревьями отказов» необходимы для определения надежности $P_{QR}(\tau)$.

Разработка сценариев чрезвычайных ситуаций позволяет получить исходные данные о потенциальных воздействиях и неблагоприятных факторах, а также служит основой для комплексной оценки поврежденности ОПО. Чтобы определить возможные сценарии возникновения и развития опасных ситуаций для НП, необходимо учитывать следующие типы аварий: пожар-вспышка, пожар пролива, факел и взрыв [3].

Анализ отказов в основном представляет собой дедуктивный эмпирический подход, направленный на определение причины или сочетания причин событий.

Технический риск определяется как (4):

$$R_T(\tau) = 1 - P_{QR}(\tau). \quad (4)$$

Надежность $P_{QR}(\tau)$ может включать в себя долговечность, безотказность, устойчивость, сохраняемость или их различные комбинации, в зависимости от назначения и условий эксплуатации объекта.

В настоящий момент параметры ущерба $U(\tau)$, в основном экономические, которые соответствуют рассматриваемым условиям (отказы, аварии и катастрофы), устанавливаются в контексте анализа надежности $P_{QT}(\tau)$ и техногенного риска $R_t(\tau)$.

Выполнение комплекса этих работ позволит не только увеличить сроки эксплуатации существующих объектов, но и проектировать перспективные объекты транспорта нефти с высоким уровнем надежности и поддерживать его на разных стадиях их жизненного цикла.

Литература:

1. Курасов, О. А. Обоснование параметров безопасности опасных производственных объектов по критериям риска. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. – С. 39-42.

2. Kurasov, O. A. Safety management of hazardous production facilities based on the analysis of hazardous processes in the natural and technogenic sphere. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. – P. 177.

3. Бурков, П. В. Структура основных расчетов для определения и управления сроком безопасной эксплуатации промышленных объектов газотранспортного сектора с учетом рисков и предельных состояний. Ижевск: Издательский дом "Удмуртский университет", 2021. – С. 29-34.

УДК 629.039.58

КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЩИМ ГАЗОМ

Мингазутдинов И.Н., Поникарова И.Н.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

Основным фактором, влияющим на надежность нефтегазового оборудования и трубопроводов, является воздействие на внутреннюю поверхность металла перекачиваемых и перерабатываемых углеводородных сред. Известно, что они содержат коррозионноактивные компоненты. Для справки, ежегодно в Российской Федерации происходит более 70 тысяч аварий, связанных с трубопроводным транспортом, из них только 10% не являются следствием коррозионных повреждений.

Из-за высокой коррозионной активности сероводорода, содержащегося в попутном нефтяном газе, происходит снижение ресурса оборудования нефтегазового комплекса. Многолетняя статистика показывает, что одной из основных причин аварий является внутренняя коррозия. Наиболее агрессивным газом считается содержащий сероводород (H_2S) с содержанием 0,025% по объему и более. Наряду с другими факторами, такими как высокое давление, присутствие воды и кислорода может способствовать коррозии даже при более низких концентрациях [1].

Большинство сернистых нефтей и природных газов, содержащих сероводород, способны вызывать коррозию технологического оборудования на определенных стадиях технологического цикла их переработки. Коррозия соединениями серы при высоких температурах протекает по химическому механизму коррозии, а при низких температурах в присутствии влаги — по электрохимическому механизму.



Рисунок 1 — Коррозия нефтегазового трубопровода.

Наиболее агрессивным коррозионно-активным агентом при переработке нефти и газа является сероводород, как растворенный в сырой нефти или газе, так и выделяющийся при разложении других соединений серы. Сероводород действует на сталь при высоких температурах, вызывая химическую коррозию оборудования (змеевиков печи, нижней части атмосферного колонны и др.), по реакции:

$$Fe + H_2S \rightarrow FeS + H_2 \quad (1)$$

Помимо этого процесса быстрого окисления стали сероводородом может происходить взаимодействие его с карбидом железа, входящим в структуру конструкционных сталей, по схеме:

$$Fe_3C + H_2S \rightarrow FeS + CH_4 + \mathrm{H_2} \quad (2)$$

Под влиянием высоких температур происходит термическая диссоциация сероводорода, в результате которой образуется активная элементарная сера:

$$H_2S \rightarrow H_2 + S \quad (3)$$

С повышением температуры степень диссоциации сероводорода и давление паров серы увеличиваются, что приводит к резкому увеличению скорости коррозии металла.

При температурах ниже 260ºС скорость коррозии настолько мала, что практически не фиксируется. Высокотемпературная сероводородная коррозия не наблюдается даже при парциальном давлении сероводорода ниже 6 Па.

В смесях сероводорода с водородом, широко применяемых в процессах нефтепереработки, вблизи равновесных значений концентраций H_2S и H_2 температурная зависимость сероводородной коррозии имеет экстремальный характер (рис. 2)

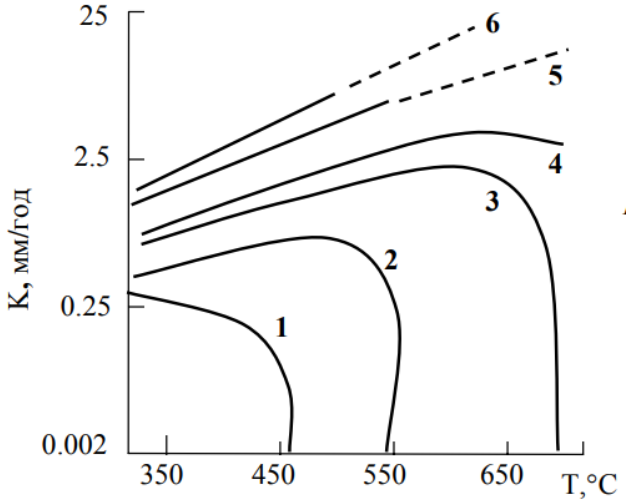


Рисунок 2 – Зависимость скорости коррозии стали в смеси H_2S+H_2 от температуры при парциальном давлении H_2S, кПа

В последние годы увеличились объемы переработки нефтегазового сырья с высоким содержанием сероводорода. В связи с этим наблюдается глобальный рост электрохимической коррозии сероводорода в системе подготовки сырья и при переработке нефти и газа. Сероводородная коррозия поражает трубопроводы и резервуары, танкеры и резервуары, оборудование для переработки и обессеривания первичной нефти, гидрогенизации нефтепродуктов, газофракционирования и гидрокрекинга сернистых нефтей, оборудование для компримирования и перекачки природного газа и др.

Средняя температура оказывает существенное влияние на скорость коррозии сероводорода. В природном газе, содержащем сероводород, температурная зависимость скорости электрохимической коррозии имеет максимум 40°С. Снижение скорости электрохимической коррозии при температурах выше 40°С связано со снижением относительной влажности газа и повышением защитных свойств пленок продуктов коррозии, образующихся на поверхности стали. В жидкой фазе скорость коррозии непрерывно возрастает с повышением температуры, причем более интенсивно в интервале температур от 30 до 60°С [4].

Особой спецификой отличается коррозионное растрескивание в присутствии сероводородсодержащих сред. В отличие от коррозионного растрескивания в средах без сероводорода, которое начинается с поверхности, сероводородное коррозионное растрескивание может начинаться и внутри металла вдалеке от поверхности. Поэтому для начала разрушения при сероводородном коррозионном растрескивании необязательно наличие на поверхности дефектов или зарождение трещин.

Сероводородное коррозионное растрескивание происходит в результате наводороживания металла при катодной реакции. Водород, адсорбированный на поверхности стали, частично рекомбинирует в молекулы и удаляется из сферы реакции, а частично диффундирует в металл.

Механизм стимулирующего действия сероводорода на гидрирование в условиях низкотемпературной сероводородной коррозии связан с каталитическим ингибированием реакции рекомбинации атомов водорода и, тем самым, с увеличением их концентрации на поверхности катода. Проникновению водорода в металл может способствовать ослабление связи между поверхностными атомами в результате адсорбции H_2S и HS - поверхностью металла, которые характеризуются высокой абсорбционной и каталитической активностью в процессе ионизации металла. катодное восстановление ионов H^+.

Борьба с коррозией – это не только продление срока службы нефтегазопромыслового оборудования, снижение эксплуатационных затрат на его ремонт, улучшение технико-экономических показателей добычи и подготовки нефти на промыслах. В конечном счете – это охрана окружающей среды, водоемов и рек

от загрязнения нефтью, газом и сопутствующими отходами при добыче нефти, например, сточной водой [2].

При решении вопросов выбора метода защиты от коррозии необходимо учитывать и наличие в добываемой продукции скважин химических реагентов, применяемых для интенсификации добычи нефти и газа.

Для повышения коррозионной стойкости и защиты от коррозии сернистыми соединениями высокотемпературного технологического оборудования применяют следующие мероприятия: применение легированных сталей, применение покрытий и очистка сырья от сероводорода.

Хром является основным легирующим элементом, повышающим стойкость стали к сероводородной коррозии при высоких температурах. На хромистой стали образуется прочно связанная с основным металлом пленка, состоящая из смешанных сульфидов железа и хрома типа шпинели и обладающая высокими защитными свойствами [3].

Для экономии легированных сталей применяют также биметаллический прокат с основным слоем из углеродистой или низколегированной стали и покровным слоем из хромистой или хромоникелевой стали.

Очистку нефтепродуктов от серы проводят методом гидрирования с последующей доочисткой поглотителями (например, моноэтаноламином и др.).

Литература:

1. Хохлачева, Н. М. Коррозия металлов и средства защиты от коррозии. Учебное пособие / Н.М. Хохлачева, Е.В. Ряховская, Т.Г. Романова. - М.: ИНФРА-М, 2016. - 118 с.

2. Федорченко, В. И. Коррозия металлов / В.И. Федорченко. - М.: Бибком, 2009. - 655 с.

3. Семенова, И.В. Коррозия и защита от коррозии 2010: Учебное пособие / И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Хорошилов. - М.: Физматлит, 2010. – 416 с.

4. Шевченко, А.А. Химическое сопротивление неметаллических материалов и защита от коррозии / А.А. Шевченко. - М.: КолосС, 2006. - 248 с.

УДК 628.334.51

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ДЕЭМУЛЬСАЦИИ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ СЕПАРАТОРЕ

Моисеева К.С.
Казанский государственный энергетический университет,
E-mail: samasaka@yandex.ru

Неотъемлемой задачей большинства нефтехимических промышленных предприятий является интенсификация деэмульсации водонефтяной эмульсии. В общем виде водонефтяная эмульсия представляет собой дисперсную среду, которая состоит из двух несмешивающихся флюидов: воды и нефти. Разделение водонефтяной эмульсии осуществляется по средствам термических, химических, электрических и механических методов [1]. К наиболее простым относят механические методы, которые включают следующие процессы: отстаивание, центрифугирование и фильтрацию. Наиболее распространенным аппаратом для деэмульсации водонефтяной эмульсии является сепаратор. Как правило, недостатком сепараторов является длительность процесса разделения водонефтяной эмульсии. При увеличении производительности снижается эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии [2].

В работе предлагается увеличить эффективность сепаратора с помощью использования двутавровых вставок внутри аппарата (рис. 1). Данное устройство состоит из несколько двутавровых вставок, которые закреплены со всех сторон стенками [3].



Рис. 1. Сепаратор с двутавровыми вставками внутри аппарата

Принцип работы сепаратора с двутавровыми вставки внутри аппарата заключается в возникновении центробежные сил, которые появляются при огибании водонефтяной эмульсией двутавровых вставок при своем движении. Центробежные силы позволяют разделять две несмешивающиеся жидкости [4].

При экспериментальных исследованиях сепаратора с двутавровыми вставками внутри аппарата оценивалась эффективность деэмульсации водонефтяной

эмульсии. В качестве двух жидкостей использовалась вода и нефть, разбавленное в пропорции 0,67:0,33 по объему соответственно. При проведении экспериментов определялись плотности исходной эмульсии, легкой и тяжелой фаз. Для этого были использованы ареометры АНТ-1 830-890, АНТ-1 890-950 и АНТ-1 950-1010.

В докладе показано, что эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии при ее скорости движения равной от 1,43 до 1,8 м/с составляет около 90 %. В то же время в рассматриваемом диапазоне скоростей от 2 до 2,5 м/с составляет 68%.

Литература:

1. Зинуров, В. Э. Исследование процесса деэмульсации водонефтяной эмульсии в отстойнике с гофрированными пластинами / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, В. В. Харьков, А. Р. Галимова // Вестник технологического университета. - 2020. – Т. 23. - № 7. – С. 61-64.

2. Dmitriev, A. V. Removal of moisture from contaminated transformer oil in rectangular separators / A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, D. Vinh, O. S. Dmitrieva // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 110. – P. 01026.

3. Зинуров, В. Э. Интенсификация очистки сточных вод ТЭС от нефтепродуктов в отстойниках / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, И. И. Шарипов, С. В. Данг, В. В. Харьков // Вестник технологического университета. - 2020. – Т. 23. - № 6. – С. 64-67.

4. Zinurov, V. E. The experimental study of increasing the efficiency of emulsion separation / V. E. Zinurov, I. I. Sharipov, O. S. Dmitrieva, I. N. Madyshev // E3S Web of Conferences. - EDP Sciences. – 2020. – V. 157. – P. 06001.

УДК 621.791.052.7

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ НА НАПРЯЖЕНИЯ В ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧКАХ

Москалев Л.Н., Поникаров С.И.
«Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
E-mail: lejnya@yandex.ru

Практически во всех отраслях промышленности применяется хладостойкая низколегированная сталь различных марок, например 09Г2С, 10Г2С1, 10Г2, 16ГС и т.д. Такое применение обусловлено легкой свариваемостью всеми видами сварки, хорошей обработкой резанием, повышенными прочностью и выносливостью и иными другими достоинствами. Из этих марок стали изготавливают различное оборудование: емкостное, теплообменное, реакторы, трубы и т. п. [1]

При конструировании оборудования для нефтяной, газовой, химической, энергетической отраслей промышленности широко применяются сварные соединения пересекающихся тонкостенных оболочек, в виде двух цилиндров. Эти соединения, в частности, штуцеры и люки с обечайками сосудами, имеют различные конструктивные исполнения [2, 3], зависящие от многих факторов: назначение, характер нагружений, размер и форма, место расположения отверстий под штуцер или люк, расстояние от этих отверстий до ближайших концентраторов напряжений. Концентратором напряжений является любое место с резким изменением формы тела, следовательно возможно снижение прочности конструкции приводящее к разрушению [4, 5]. Поэтому, на опасных производственных объектах, особое внимание уделяется прочности оборудования, в которых обращаются опасные химические вещества, повышенные давления более 0,7атм. [6].

Особый интерес этого исследования заключается в определении эквивалентных напряжений при одновременном воздействии избыточного давления в аппарате и высокой температуры в месте соединения штуцера и корпуса [7, 8]. Известно, что одновременные нагружения избыточным давлением и резко поднимающейся температурой штуцера, могут быть в различных ситуациях:

1. Пожар в зоне соединения штуцера и обечайки сосуда;
2. Попадание штуцерного узла в струю горящей среды при аварии.

В настоящее время существует множество исследований, разработана нормативно – техническая документации и предложены методы определения напряжений в месте пересечения двух цилиндров при постоянном давлении [9-12].

Таким образом, новизной этих исследований является расчет прочности сварного соединения узла штуцер-обечайка из хладостойкой стали при одновременном воздействии давления и нестационарного нагрева МКЭ.

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) узла соединения штуцеров различных диаметров с обечайкой внутренними диаметрами D = 800мм. и 1600мм., проводился при постоянном допустимым давлением для определенной марки стали, а также с изменениями геометрических параметров и температур штуцеров. Расчет проводился по третьей теории прочности, которая имеется в базе данных программного комплекса ANSYS R17.0 (учебная версия). Построение сеточной модели этого штуцерного узла приведено в источнике [8].

Геометрическая модель рассматриваемого соединения представлена на рис. 1.

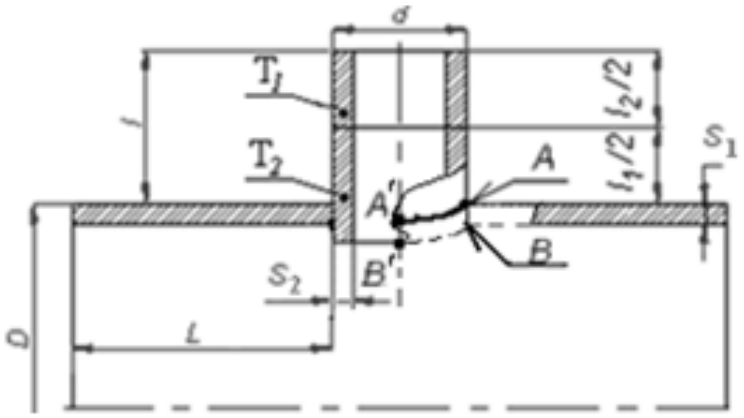


Рис.1 Геометрия узла штуцер-обечайка

Задавались начальная и конечная температуры рабочей среды, рабочее давление внутри аппарата, непревышающее значение время расчета нагрузок на узел от 0 до 300 секунд, свойства стали.

Следовательно, основной задачей этого исследования, является выявление и анализ эквивалентных напряжений в месте соединения штуцера с обечайкой при изменении температуры газа и температуры T_1 патрубка $l_2/2$ (рис.1). То есть нагрев соединения узла штуцер-обечайка осуществлялся теплопроводностью от второй половины патрубка ($l_2/2$) к первой половине патрубка ($l_1/2$) при этом избыточное давление в штуцере не превышало допустимое давление в сосуде.

Анализ эквивалентных напряжений в месте соединения штуцера с обечайкой показал появления пиковых концентраций эквивалентных напряжений, которые могут оказать негативные последствия на целостность конструкции. Эти концентрации происходят при растяжении / сжатии стали под действием давления и / или резким ростом температуры конструкции. Очевидно, что превышения эквивалентных напряжений выше допустимых напряжений может привести к разрушению сосуда.

Также по результатам численных экспериментов было замечено, что при увеличении толщины стенки штуцера, по отношению к обечайке аппарата,

значения эквивалентных напряжений на пересечении патрубков уменьшаются, но незначительно.

1. В течение 200 секунд после начала эксперимента эквивалентные напряжения стремительно возрастают до «пиков», которые являются негативными с точки зрения прочности. После прохождения этих пиков кривые напряжений начинают снижаться;

2. Замечено, что эквивалентные напряжения напрямую зависят от толщин стенок штуцера и обечайки. При увеличении толщины стенки штуцера по отношению к стенке обечайки значения эквивалентных напряжений на пересечении этих оболочек значительно уменьшаются.

3. Для снижения (или предотвращения) пиковых значений эквивалентных напряжений в конструкциях штуцер-обечайка рекомендуем, отношение толщины стенки обечайки к толщине стенки штуцера (S_1/S_2) принимать меньше 1.

Литература:

1. Лащинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: справочник / А.А. Лащинский, А.Р. Толчинский. – 3-е изд., стер. – Москва: Альянс, 2008. – 752 с.

2. ГОСТ 34233.3-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и наружном давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер.

3. РД 26-18-8-89. Сварные соединения приварки люков, штуцеров и муфт. Основные типы, конструктивные типы и размеры.

4. Федосеев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.

5. СТО 02494680-0046-2005 «Соединения сварные стальных конструкций. Общие требования при проектировании, изготовлении и монтаже. Приказ ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова» от 27.01.2005г.

6. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности и опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением» утв. Приказом Федеральной службы по экологическому и, технологическому и атомному надзору от 15.12.2020г. №536.

7. Нгуен Ван Ань, Москалев Л.Н., Поникаров С.И., Влияние нестационарного нагрева на прочность штуцерных узлов из стали 09Г2С / Черные металлы.. 2021, в.8, с.38-42.

8. Скопинский, В.Н. Новый критерий определения предельной нагрузки в сосудах давления с патрубками / В.Н. Скопинский, Н.А. Берков, Н.В. Вожова // Машиностроение и инженерное образование, 2011, Т.51, №3, с. 50-57.

9. Скопинский, В.Н. Напряжения в тройниковых соединениях трубопроводов при комбинированном нагружении / В. Н. Скопинский, Н. А. Берков, А. Б.Сметанкин // Машиностроение и инженерное образование, 2007, Т.47, №2, с. 34-45

10. R. Gwaltney, C. Experimental Stress Analysis of Cylinder-to-Cylinder Shell Models and Comparisons With Theoretical Predictions / C. Gwaltney, J. M. Corum, S. E. Bolt, J. W. Bryson J. Pres. // Journal of Pressure Vessel Technology. 1976. - Vol. 98. - No. 4, - Pp. 283-290..

11. Xue, L. Parametric FEA study of burst pressure of cylindrical shell intersections / L. Xue, G.E.O. Widera, Z. Sang // Journal of Pressure Vessel Technology. - 2010. - Vol. 132. - №3. - Pp. 31203-31209.

12. Нгуен В.А. Компьютерное моделирование температурных напряжений в технологических сосудах в местах врезки штуцкеров в SOLIDWORKS / Нгуен В.А., Л.Н. Москалев, И.Н. Поникарова, С.И. Поникаров // Вестник Технологического университета, 2019. Т.22, №7, с.144.

УДК 614.84

ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ЦЕХА

Мотыгуллина З.Ш., Шильникова Н.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: snv-knitu@yandex.ru

Электромеханический цех на предприятии обычно имеет несколько участков различных видов деятельности, включающих производство трубопроводной арматуры, предоставление услуг по монтажу и ремонту механизмов, техническому обслуживанию станков и прочего оборудования. Также изготавливаются крепежные изделия, пружины, выполняются прессование, штамповка, профилирование, готовые металлические изделия и проектирование производственных помещений с размещением оборудования. В процессе работы в цехе возможно возникновение пожароопасных ситуаций, поэтому актуально изучение эффективных способов защиты от возгораний.

В электромеханическом цехе в основном станочное оборудование и при обработке деталей возможно возгорание от выделяющейся горючей пыли. Также электромеханический цех является электроопасным, поскольку при обработке деталей на станках образуется токопроводящая пыль, оседающая на электрооборудовании, что может привести к короткому замыканию.

Согласно [1] короткое замыкание - случайный или преднамеренно созданный проводящий путь между двумя или более проводящими частями, вызывающий уменьшение разности электрических потенциалов между этими проводящими частями до нуля или значения, близкого к нулю.

В цехе станочное оборудование имеет индивидуальный электропривод с дистанционным управлением на основе магнитных пускателей и другой аппаратуры. Так, на токарно-винторезных станках 1Д 63А установлено два электродвигателя мощностью 10 и 0,1 кВт, на токарно-винторезных станках 1К-62 того же типа - три мощностью 10, 11 и 0,125 кВт. Вертикально - сверлильный станок оснащен электродвигателями 5,2 и 0,1 кВт, настольно-сверлильный - двигателем мощностью 0,65 кВт. Электрооборудование 2 и 3 категории надежности. Поскольку привод станочного оборудования осуществляется от электродвигателя, важным является надежность работы и пожарная безопасность при его эксплуатации.

Причины пожаров электрооборудования в сочетании горючих материалов изоляции, конструкций и источников зажигания, таких как электрические искры, дуги, нагретые части оболочки, при аварийных режимах работы [2].

Одними из распространенных причин пожаров - электротехнические, по статистике - это каждый пятый пожар и в основном от проводов и кабелей. Выбор марок проводов, шнуров и кабелей связан с назначением и рабочим напряжением, способом прокладки, условиями электробезопасности и пожарной безопасности при эксплуатации сети.

Причинами загораний электродвигателей, генераторов, трансформаторов являются перегрев от: коротких замыканий в обмотках при межвитковом пробое изоляции, коротких замыканий на корпус при пробое электроизоляции обмоток, токовой перегрузки обмоток, искрения в контактных кольцах, коллекторе. Причиной загораний комплектующих элементов может быть перегрев от коротких замыканий, который может возникнуть в результате: электрического пробоя диэлектрика в конструкции комплектующего элемента, приводящего к токовой перегрузке. Также и при снижении изоляционных свойств конструкционных материалов от старения; ухудшения отвода тепла при неправильной установке и эксплуатации; повышенного рассеяния мощности из-за изменения электрического режима при отказе «прилегающих» комплектующих элементов; образования электрических цепей, не предусмотренных конструкцией. Причинами загораний в электронагревательных приборах, аппаратах, установках являются их перегрев от замыкания нагревательных элементов и загорание от электронагревательных приборов, аппаратов, установок.

Проведенный анализ указанных причин показал, что короткое замыкание, является следствием первичных физических явлений, приводящих к мгновенному снижению сопротивления изоляции между токопроводящими жилами разных потенциалов, поэтому эти явления считаются первичными причинами пожара [2].

Во избежание пожаров электрические сети и электрооборудование должны отвечать требованиям правил технической эксплуатации электроустановок.

Во взрывоопасных зонах остальных классов допускают применять провода и кабели с алюминиевыми жилами, если соединения и оконцевания производятся пайкой, сваркой или опрессовкой, если у машин, аппаратов есть вводные устройства и контактные зажимы, для соединения проводов и кабелей с алюминиевыми жилами. Запрещается в пожаро - и взрывоопасных применение проводов и кабелей с полиэтиленовой изоляцией и оболочкой.

В целях безопасности электрические машины с частями, нормально искрящими по условиям работы (электродвигатели с контактными кольцами), располагают на расстоянии не менее 1 м от мест размещения горючих веществ или отделяют несгораемым экраном. Для механизмов в пожароопасных зонах, допускается применение электродвигателей с меньшей степенью защиты оболочки при условиях: электродвигатели должны устанавливаться вне пожароопасных

зон; привод механизма должен осуществляться при помощи вала, пропущенного через стену, с устройством в ней сальникового уплотнения.

Таблица 1. Минимальные допустимые степени защиты оболочек электрических машин в зависимости от класса пожароопасной зоны.

Вид установки и условия работы	Степень защиты оболочки для пожароопасной зоны класса			
	П-I	П-II	П-IIа	П-III
Стационарно установленные машины, искрящие или с искрящими частями по условиям работы	IP44	IP54*	IP44	IP44
Стационарно установленные машины, не искрящие и без искрящих частей по условиям работы	IP44	IP44	IP44	IP44
Машины с частями, искрящими и не искрящими по условиям работы, на передвижных механизмах и установках (краны, тельферы, электротележки, т.п.)	IP44	IP54*	IP44	IP44

* До освоения электропромышленностью машин со степенью защиты оболочки IP54 могут применяться машины со степенью защиты оболочки IP44.

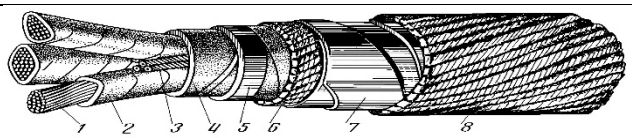


Рис. 1. Силовой кабель: 1 - токоведущие жилы; 2 - фазная изоляция (пропитанная маслом бумага, теплостойкая резина); 3 – джутовый заполнитель; 4 - поясная изоляция (пропитанная маслом бумага, теплостойкая резина); 5 - защитная свинцовая или алюминиевая оболочка; 6 - джутовая прослойка; 7 - стальная ленточная броня; 8 - джутовый покров.

По условиям пожаро - и взрывобезопасности [3] во взрывоопасных зонах В-I и В-Iа должны использовать провода и кабели только с медными жилами.

Также специально разрабатываются перечни операций технического обслуживания, графики плановых технических осмотров, проверок, испытаний оборудования. Для исключения возникновения неполадок и увеличения срока службы электродвигателей необходимо регулярное техническое обслуживание двигателей.

Таблица 2. Перечень необходимых профилактических мероприятий

Мероприятия	Цели
Осмотр	Для обеспечения надёжной и бесперебойной работы.
Обслуживание	Своевременное техническое обслуживание.
Неисправности	Проведение ремонта или замена электродвигателя.
Проверка заземления	Осмотр заземляющей шины или провода, их крепление к электрической машине.
Проверка контактных соединений	Осмотр соединения выводных концов электродвигателя, подводящих питание от сети.

Для исключения перегрева проводников, искрения и образования электрических дуг в машинах и аппарата, электрооборудование для пожароопасных электроустановок выбирается строго в соответствии с требованиями ПУЭ (правила устройства электроустановок).

Для поддержки КПД электродвигателя на заданном уровне в течение расчетного срока службы проводится раз в 6 месяцев осмотр и проверка электродвигателей, их деталей. В профилактических целях, для исключения загрязнения корпуса и обмотки электрической машины предусмотрена очистка от пыли обдувом поверхности сжатым воздухом при давлении не более 0,2 МПа (2 атм) от компрессора. Незначительные загрязнения удаляют сухим обтирочным материалом, следы от масла стирают обтирочным материалом.

Защиту работников [4] от воздействия напряжений прикосновения и токов можно обеспечить конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты, либо за счет снижения тока, протекающего через тело человека, или за счет сокращения времени его воздействия. Для контроля знаний обслуживающего персонала по вопросам пожарной безопасности проводится их периодическая проверка. Эффективным является внедрение оперативных планов ликвидации возгораний (карточек тушения пожара), применение их сокращает время ликвидации пожара и исключает неправильные действия работников. Индивидуальная карточка разрабатывается для каждого элемента оборудования или группе оборудования в одной ячейке, шкафу и т.п., где приводятся рекомендации по мерам, необходимым при возгорании, а также способы и средства ликвидации возгорания.

Таким образом, пожарная безопасность в электромеханическом цехе обеспечивается надежностью оборудования, его элементов и подготовленностью персонала к работам, обеспечивающим безопасность, оперативность по выявлению и устранению предпосылок пожароопасных
ситуаций.

Литература:

1. ГОСТ 30331.1-2013 (акт. текста 01.01.21.г.) электроустановки низковольтные.

2. Черкасов В.Н. Пожарная безопасность электроустановок: учебник / В.Н. Черкасов, В.И. Зыков;. - 5-е изд. - М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. - 391 с.

3. Грунин В.К., Рысев П.В., Федоров В.К. Пожарная безопасность электроустановок: учеб. пособие - Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. - 139 с.

4. Приказ Минтруда России от 15.12.2020 N 903н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок».

УДК 628.34

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ВОДО-МАСЛЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ НА НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

Исхакова Р. Я., Нургалиев А. И.
Казанский государственный энергетический университет,
E-mail: artur_nurgaliev022@mail.ru

Водомасляные эмульсии (ВМЭ), без применения которых не обходится ни одно промышленное производство, при неправильной эксплуатации и утилизации являются одной из серьезных причин ухудшения состояния окружающей природной среды и несут потенциальную угрозу здоровью человека. В промышленности ВМЭ образуютсяв результате деятельности нефтехимических и химических предприятий, мойки автотранспорта, с ливневыми сточными водами (СВ), а также применения смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и моющих растворов в металлообработке [1].

В результате неправильного хранения и утилизации, а также мойки поверхностей деталей и узлов различных агрегатов сточные воды попадают ВМЭ, СОЖ, а также нефтепродукты, что приводит к дальнейшему загрязнению подземных вод и поверхностных водоемов. Поэтому вопрос очистки сточных вод от ВМЭ является в настоящий день актуальным.

Способы очистки отработанных ВМЭ делятся на: реагентные (обработка минеральными солями и кислотами, коагулянтами и флокулянтами); физико-химические (электрокоагуляция, ультрафильтрация, адсорбция и пр).

Метод деэмульгирования ВМЭ путем коагуляции дисперсной фазы неорганическими электролитами хорошо практикуется в очистке сточных вод. Для очистки масло-эмульсионных сточных вод могут быть использованы NaCl, H_2S0_4, $FsS0_4$, $Fe_2(S0_4)_3$, $FeCl_3$, CaO, $A1_2(S0_4)_3$. Под действием электролитов происходит снижение не только электрокинетического потенциала масляных эмульсий, но и разрушение структурно-механического барьера. [3]

Для оценки стабильности ВМЭ проведено экспериментальное исследование [2], в котором использовали отработанное моторное масло с плотностью – 857 г/дм^3. Были приготовлены 4 модельных раствора известной концентрации, в которых в воду приливали отработанное моторное масло и далее интенсивно перемешивали в течение 10 минут. Далее эмульсии перемещали в мерный цилиндр и определяли время расслоения на две макрофазы, записывая объем воды и эмульсии через каждые 3 минуты до остановки процесса расслоения. Результаты исследований представлены в табл.

Номер пробы	1	2	3	4
Концентрация масла, г /дм^3	1,75	1,31	0,87	0,44
Полное время расслаивания, ч	20 мин	30 мин	15 часов	24 часа.

По результатам исследований установлено, что все пробы подвергались расслоению с низкой скоростью. Расслоение на две макрофазы протекает не полностью, капли масла задерживаются на стенках цилиндра, а также происходит окрашивание воды в желто-коричневый цвет, что связано с попаданием в отработанное моторное масло капель бензина, сажи, серы и прочих соединений. Проведенный эксперимент свидетельствует о необходимости разработки новых деэмульгаторов, которые позволят ускорить процесс разделения ВМЭ и повысить эффективность процесса очистки сточных вод.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №18–79–10136 https://rscf.ru/project/18-79-10136/

Литература:

1. Фазуллин Динар Дильшатович. Переработка отработанных стальных водомасляных эмульсий с получением ингибирующей композиции:
дис. Кандидат наук: 02.00.13

2. Эмульсии: получение, свойства, разрушение: Метод. указ. к лаб. работам /Самар. гос. техн. ун-т; / Л. В. Кольцов, М. А. Лосева. Самара, 2017. 18 с. Илл.

3. Позднышев Л.Г. Очистка маслосодержащих сточных вод машиностроительных предприятий: Автореф. Дис. канд. техн. наук. -Нижний Новгород, 1992. 20с.

УДК 629.039.58

ПРОГИБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Приточкин В.С., Поникаров С.И.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: vadik.pritochkin@yandex.ru

Все более растущие потребности промышленных регионов в доступных энергетических ресурсах обуславливают развитие магистральных трубопроводных систем транспорта нефти и газа. Удаленность мест добычи ресурсов от конечного потребителя создают предпосылки развития трубопроводного транспорта. Объективными же особенностями газопроводной сети России являются сложные природно-климатические условия эксплуатации, оказывающие негативное воздействие на функционирование газопроводов, что увеличивает риск экологической и технической безопасности. В процессе эксплуатации газопроводов в результате действия нагрузок, не предусмотренных проектом, могут возникать различные, в том числе и существенные, отклонения напряженно деформированного состояния (НДС) от проектного, что может приводить к авариям [1]

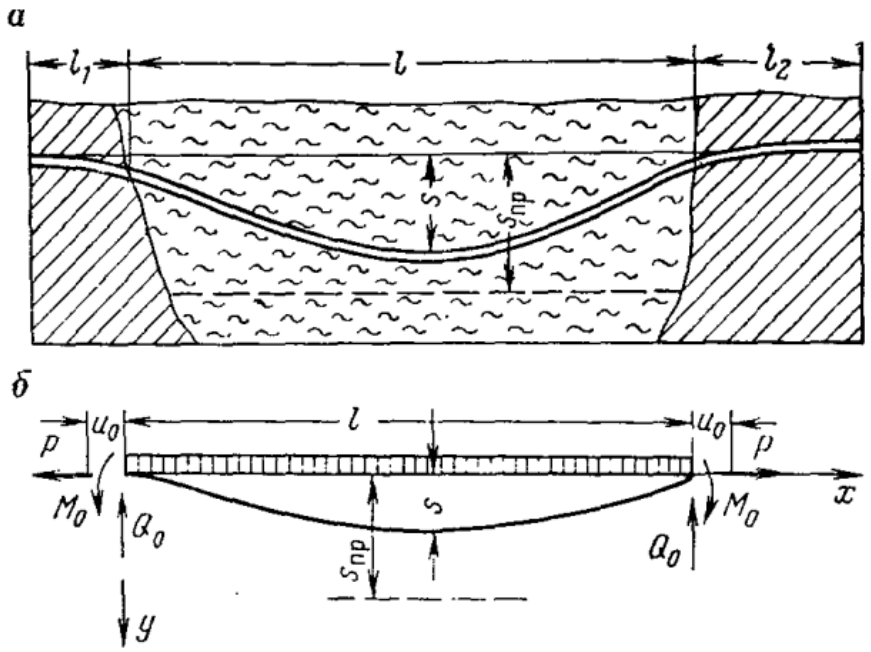


Рис.1

В настоящее время одной из самых широко распространенных систем конечно-элементного анализа является ANSYS. Данный программный продукт широко в сфере автоматических инженерных расчётов, решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций. Из механики грунтов известно, что полностью водонасыщенный грунт можно рассматривать как двухфазную систему, уплотняемость которой определяется отфильтровыванием

воды из пор скелета грунта под воздействием уплотняющей нагрузки [2]. При этом, если рассматривать участок подземного прямолинейного газопровода, уложенного в сухой грунт, то в этом случае вертикальное перемещение (осадка) происходит в результате уплотнения грунта под трубой. Осадка в этом случае несущественна, так как давление на грунт, определяемое массой трубы, не превышает 0,5 Н/см2 , и учитывать ее влияние на изменение положения газопровода по сравнению с первоначальным его положением нет необходимости. Если же поместить газопровод в слабый водонасыщенный грунт или на периодически затапливаемую территорию, то осадка грунта определяется в предположении уплотнения грунта под трубой, уплотняемость которого определяется отфильтровыванием воды из пор грунта под воздействием нагрузки. Предельная осадка газопровода Snp (рис. 2, показана пунктирной линией) называется стабилизированной. Если бы слабый грунт равномерно распределялся по всей длине газопровода, то и осадка была

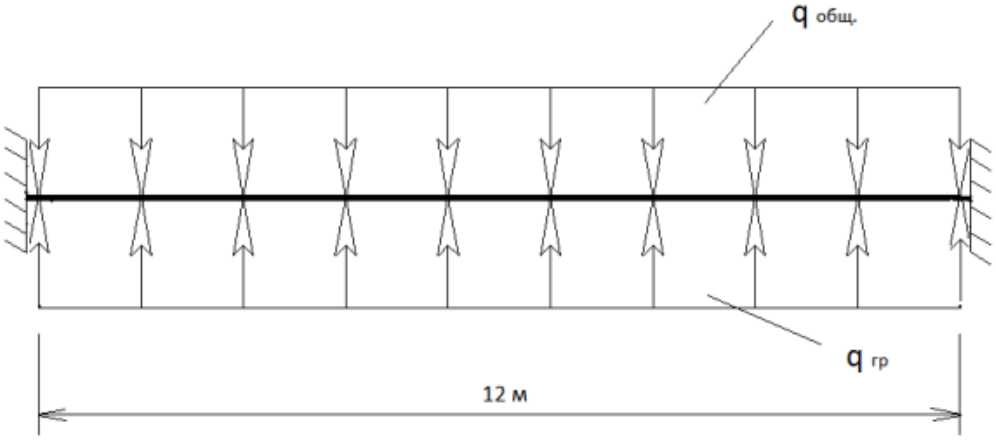


Рис.2

бы по всей длине одинакова. Однако на практике наиболее характерно чередование слабых грунтов и грунтов, обладающих достаточно большой несущей способностью. На последних, как уже отмечалось, осадка практически равна нулю. В середине участка слабого грунта осадка могла бы достичь предельного значения Snp. Газопровод на участке l изгибается, как показано на рисунке 2 а. Поскольку удлинение труб возможно только вследствие их растяжения на участке l и прилегающих к нему участках l1 и l2, то в трубах появляется растягивающая продольная сила P (рисунок 2 б) и участок l начинает работать как жесткая нить. Реакции в жесткой заделке Q0 и возникающие от них опрокидывающие моменты M0 взаимно компенсируются. Действительная осадка S оказывается существенно меньше Snp [2]. В трубах появляются напряжения от продольной силы, изгиба под действием давления вышележащего грунта, веса самой трубы с изоляцией и перекачиваемого продукта, действующего внутреннего давления и температурного перепада стенок трубы.

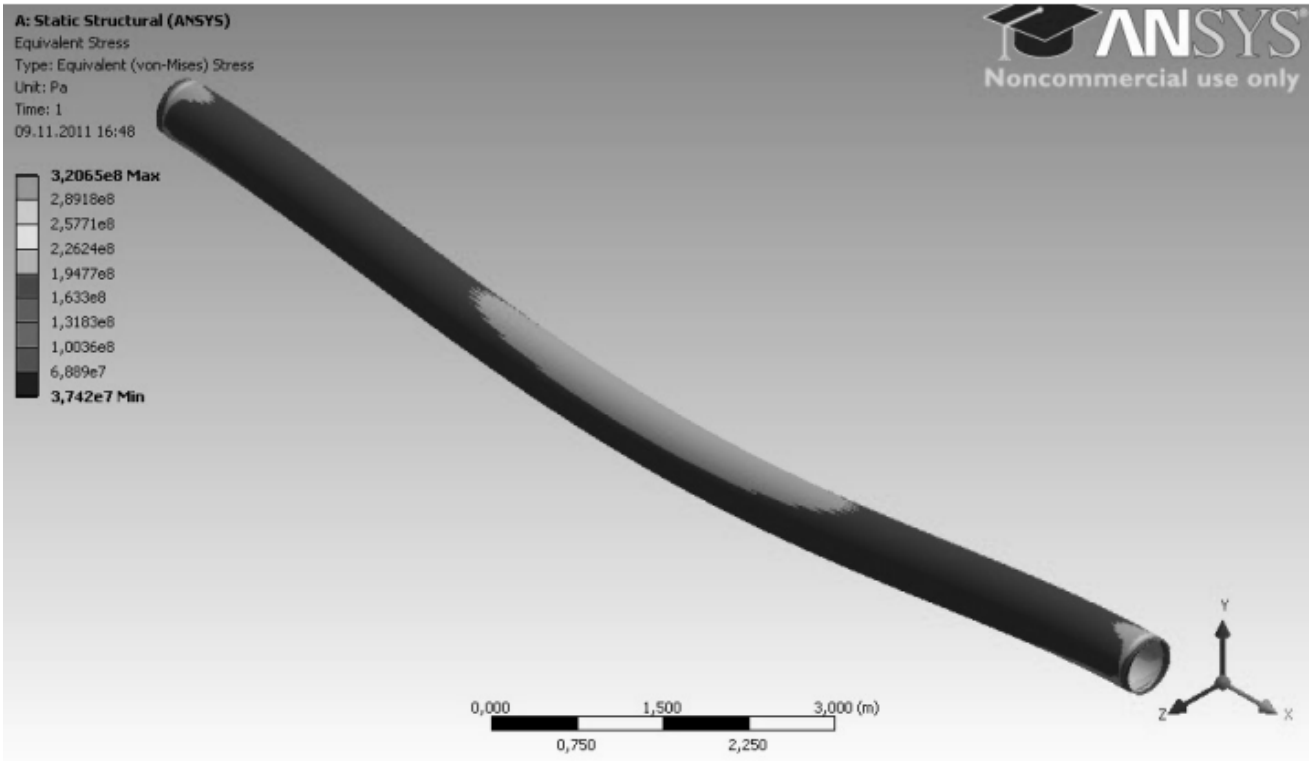


Рис.3 Эпюра эквивалентных напряжений, возникающих в газопроводе при осадке обводненного грунта



Рис.4 Деформации, возникающие в газопроводе при осадке обводненного грунта

Для исследования НДС и получения эпюр и установления диапазона изменения численных характеристик процессов, влияющих на деформацию, проводится расчет напряжений (на прочность), возникающих при осадке газопровода, с помощью программного продукта ANSYS, была создана трехмерная объемная модель участка газопровода (трубы) со следующими параметрами:

- наружный диаметр – 530 мм;
- толщина стенки трубы – 11 мм;
- длина – 12 м;
- рабочее давление – 9,0 МПа.

Газопровод изготовлен из стали 17Г1С со следующими механическими характеристиками: - предел кратковременной прочности σв – 490 МПа; - предел текучести для остаточной деформации σт – 350 МПа [3]. На газопровод, кроме рабочего давления, действуют следующие нагрузки: - распределенная нагрузка от веса самой трубы с изоляцией, перекачиваемого газа и давления вышележащего грунта – q общ (масса трубы 3,1 т); - распределенная нагрузка от давление грунта снизу на газопровод – q гр. Расчет нагрузок, действующих на газопровод, рассчитываются согласно [4]. Расчетная схема представлена на рис. 3. Принимаемые допущения соответствуют наиболее простому из возможных вариантов взаимодействию трубы и контактирующего с ней грунта: - жесткая заделка по краям введена в схему для предотвращения перемещений по оси X в начале и конце участка трубы, с системе ANSYS это реализовано в виде приложения граничных условий к торцам трубы; - давление грунта на трубу снизу принято 20% от действующей нагрузки сверху [5,6];

- не учитывается изменение геометрии трубы вследствие изменения температуры. Полученная эпюра эквивалентных напряжений Мизеса представлена на рис. 3. Из эпюр видно, что максимальные эквивалентные напряжения возникают на середине участка трубопровода и достигают 320 МПа. Также высоконагруженными являются концевые участки газопровода в местах приложения граничных условий по торцу трубы. Из-за деформации магистральных газопроводов происходит прогиб, и следствием этого возникают дефектные участки трубопровода в разных точках пикета.

На примере данных Ростехнадзора приведу примеры из реальных обследований участков ООО «Газпром трансгаз Нижжний Новгород»

Дата происшествия:	**03.03.2018**
	ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород»
Ведомственная принадлежность	ПАО «Газпром»
Место аварии:	2445 км магистрального газопровода «Ямбург-Тула-1» введен в эксплуатацию в 1988 г.
Вид аварии:	Выброс опасного вещества; разрушение с возгоранием газа

Краткое описание аварии:

В режиме эксплуатации произошло разрушение участка газопровода «Ямбург-Тула 1» Пильнинского ЛПУ диаметром 1400 мм по кольцевому сварному соединению с возгоранием газа. В результате разрушения образовался котлован диаметром 41 м и глубиной 9,5 м.

Последствия аварии:
(в т.ч. наличие пострадавших, ущерб)

Пострадавших нет.

Экономический ущерб – 12 608 тыс. руб.

Экологический ущерб – 16 тыс. руб.

Причины аварии:

Технические причины аварии:

Развитие трещины в околошовной зоне сварного соединения произошло в следствии дефектов – концентраторов напряжения, образовавшихся по причине нарушения технологии сварки в сочетании с повышенными нагрузками на трубопровод в районе подводного перехода из-за изменения русла реки Сура.



Мероприятия по локализации и устранению причин аварии:

Выполнить внутритрубную диагностику с применением комбинации инспекционных снарядов с магнитным, геометрическим и инерционными разрешением;

по результатам диагностики провести шурфовое обследование дефектов и аномалий, принять решение о дальнейшей эксплуатации участка газопровода;

провести экспертизу промышленной безопасности перехода через р. Сура и участков протяженностью не менее 1000 м от места пересечения после восстановительного ремонта и получения результатов обследования;

дополнить существующую нормативную документацию критериями оценки аномалий сварных соединений, обнаруженных по результатам внутритрубной диагностики.



Извлеченные уроки:

Необходимо совершенствовать контроль исполнения работ по техническим исследованиям трубопроводов привлекаемых экспертных организаций с детальным анализом заключений экспертизы промышленной безопасности.

Литература:

1. Алексеев В.А., и др. Некоторые аспекты обеспечения промышленной безопасности опасных объектов.-Казань: Из-во АН РТ, 2019,160 с.

2. *Бородавкин П.П.* Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство). – М.: Недра, 1982, 384 с.

3. Марочник стали и сплавов URL: http://www.splav.kharkov.com (дата обращения 5.08.2012).

4. СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы. - М: ГУП ЦПП, 1997.

5. *Димов Л.А.* Деформационная способность грунтов и расчет подземных МГ // Газовая промышленность – 2008 №2 – С.82-85.

6. СП 33.13330.2012 Расчет на прочность стальных трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП2.04.12-86 (с Изменением N 1)

УДК 621.01

РАСЧЕТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ КОРПУСОВ АППАРАТОВ С НЕКРУГЛОСТЬЮ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Сабитов М.Х., Хисматуллин И.И., Фахретдинов М.Ф.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: mh_post@mail.ru

Задачам оценки устойчивости тонкостенных оболочек посвящен большой объем отечественных и зарубежных публикаций. Большинство авторов сходятся во мнении, что использования классической теории упругости для решения таких задач недостаточно, поэтому при обосновании методов расчета для инженерной практики упор всегда делается на экспериментальные исследования. Развитие вычислительных технологий, в частности программных продуктов на основе метода конечных элементов, дают возможность на сегодняшний день обойти некоторые ограничения классических теорий и взглянуть на проблему устойчивости оболочек с других сторон.

В настоящей работе предлагается при оценке устойчивости не рассматривать корпус аппарата как совокупность оболочек идеальной формы, а представить исходную модель корпуса аппарата с учетом определенной некруглости поперечного сечения. Такое предположение является обоснованным по следующим соображениям. Существующая технология изготовления обечаек стальных сварных аппаратов предполагает использование холодной либо горячей вальцовки плоских листовых заготовок с последующим соединением краев вальцованного листа стыковой сваркой. Несколько обечаек могут соединяться между собой кольцевыми стыковыми швами, формируя цилиндрический корпус аппарата. Вполне очевидно, что при такой технологии изготовления неизбежны определенные отклонения поперечного сечения корпуса от круглой формы.

Отклонение поперечного сечения обечайки от круглой формы принято характеризовать относительной нормативной овальностью корпуса a, % [1], вычисляемой по формуле

$$a=\frac{2(D_{max}-D_{min})}{D_{max}+D_{min}}100, \qquad (1)$$

где D_{max}, D_{min} – соответственно наибольший и наименьший диаметры корпуса, измеряемые в одном поперечном сечении. Величина овальности корпусов аппаратов, работающих под вакуумом, не должна превышать 0,5%. Стандартом [1] также нормируются такие отклонения как смещение, увод (угловатость) стыковых сварных швов.

Моделирование и расчетное исследование обечаек с начальной некруглостью поперечного сечения проводится в программном комплексе ANSYS.

Критическая внешняя нагрузка, при которой обечайка теряет устойчивость, определяется из упруго-пластического решения с заданием диаграммы деформирования стали. Диаграмма деформирования задается моделью упругого идеально-пластичного материала. Такая модель позволяет в первом приближении исключить фактор упрочнения материала в пластической области, что существенно упрощает анализ.

Для моделирования поперечного сечения обечайки с начальным искажением формы принимается, что изменение радиального отклонения ω срединной окружности обечайки от идеальной формы в зависимости от кольцевого угла φ определяется зависимостью

$$\omega=\omega_0 cos(n\varphi), \tag{2}$$

где ω_0 – максимальное радиальное смещение в рассматриваемом сечении. Изменение радиуса точек срединной поверхности обечайки вдоль оси задается выражением

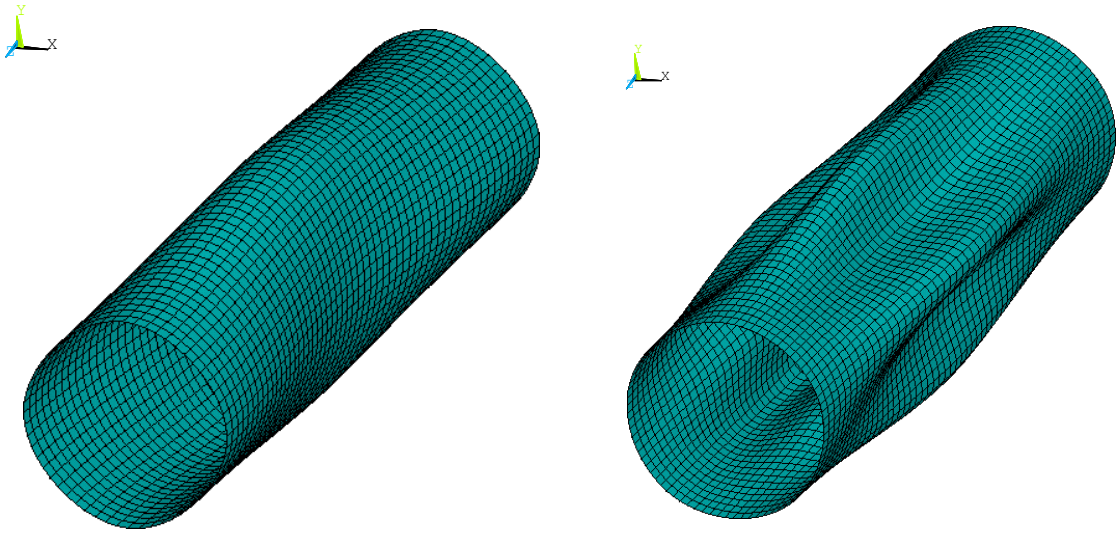
$$R=R_0+\omega cos\left(2\pi\frac{z}{L}\right), \tag{3}$$

где $R_0=0{,}5D$ – радиус срединной поверхности идеальной цилиндрической обечайки без отклонений в геометрии; ω – радиальное отклонение в текущей точке; z – текущая осевая координата; $z_{min}=0$; $z_{max}=L$; L – длина обечайки.

При $n = 2$ получаем овальную форму поперечного сечения обечайки, характеризуемую параметром овальности a (формула 1). При $n > 2$ получаем соответственно поперечное сечение с тремя, четырьмя, пятью и т. д. волнами, что соответствует формам потери устойчивости коротких цилиндрических оболочек, нагружаемых равномерным наружным давлением.

Примеры расчетных моделей с двумя и пятью волнами в средней части обечайки показаны на рис.1.

Пошаговое нагружение модели внешней нагрузкой приводит к соответствующим смещениям точек срединной поверхности обечайки. Смещения точек срединной поверхности вызывают увеличение деформаций и напряжений в теле и соответственно внутренней энергии деформации. В определенный момент условие равенства работы внешних сил и внутренней энергии тела нарушается. Значение внешней нагрузки, при которой нарушается указанное равенство, принимается за значение критической нагрузки.



а б

Рис. 1. Модель цилидрической обечайки с искажением формы: а – $n = 2$; б – $n = 5$

Результаты расчета методом конечных элементов для случая нагружения цилиндрической обечайки равномерным наружным давлением сравнивались с решением по известной формуле Мизеса [2] (формула достаточно распространена в литературе, ввиду громоздкости здесь ее не приводим). Результаты решения для двух значений $s/D = 0{,}005$ и $0{,}01$ (кривые 1, 2) представлены на рис. 2. Исходная овальность обечаек в расчете принималась $a = 0{,}5\%$. Пунктирные кривые со штрихом в обозначении – решение по формуле Мизеса.

Параметр $\Theta = \frac{p_{cr}}{p_0}$, где p_{cr} – критическое наружное давление; $p_0 = \frac{2\sigma_T s}{(D+s)}$ – предельная нагрузка цилиндра из условия прочности; σ_T – предел текучести стали; D – внутренний диаметр обечайки; s – толщина стенки.

Сравнение показывает, что характер кривых, получаемых методом конечных элементов, близок к решению Мизеса, однако в области малых значений L/D решение Мизеса может превысить предельное давление из условия прочности.

Критическая нагрузка, вычисленная методом конечных элементов, во всем диапазоне длин обечаек получается несколько ниже, чем по формуле Мизеса. Это связано с тем, что при выводе формулы Мизеса рассматривалась идеальная оболочка без начальных искажений формы. Ступенька на расчетной кривой в области отношения $L/D \approx 5$ характеризует границу между «короткими» и «длинными» оболочками, когда при меньших значениях L/D образуется более двух волн ($n > 2$).

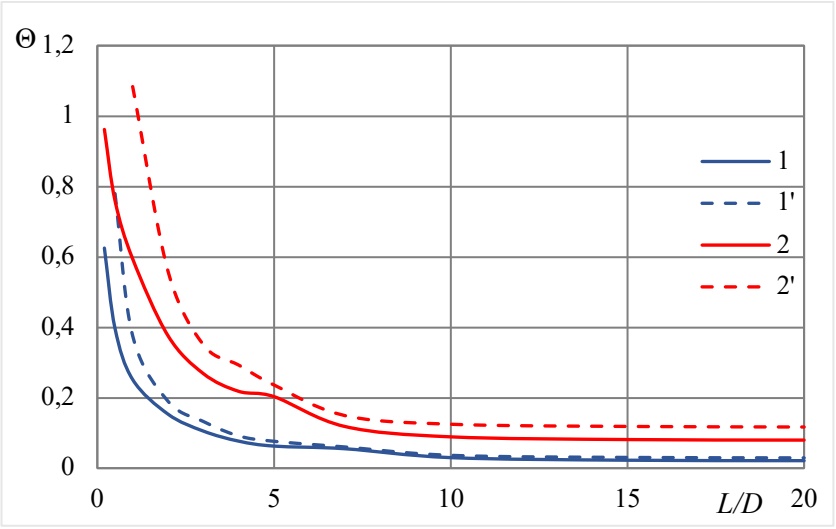


Рис. 2. Результат решения

Предложенная модель вполне применима для определения критического наружного давления цилиндрических обечаек, имеющих искажение формы поперечного сечения. В случае принятия в расчете минимальных значений механических параметров материала и величин отклонений диаметра, увеличенных на величину погрешности измерения линейных размеров, следует ожидать результат решения с погрешностью в сторону безопасности, что немаловажно при принятии решения о возможности эксплуатации оборудования.

Литература:

1. ГОСТ 34347-2017. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018. – 103 с.

2. von Mises, R. Der Kritische Aussendruck für Allseits Belastete Zylindrische Rohre, Fest zum 70, Geburtstag von Prof. Dr. A. Stodola, Zurich, pp.418-430, 1929.

УДК 547.313. 621.64

ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРУБЧАТЫХ И АВТОКЛАВНЫХ РЕАКТОРОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ БУТЕНА-1

Салахов Р.М., Шильникова Н.В., Хайруллин Р.З.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: snv-knitu@yandex.ru

Технологический процесс производства бутена-1 сопряжен с разной степени опасностями, связанными со свойствами исходных горючих материалов, побочных легковоспламеняющихся продуктов, режимами работы технологического оборудования. В этой связи изучение вопросов повышения безопасности при эксплуатации применяемого оборудования актуальная задача.

В производстве полиэтилена низкого давления для выпуска определенных марок, для изготовления труб и других изделий используют бутен-1. Получают его на установке в цехе сомономеров завода по производству и переработке полиэтилена низкого давления. Бутен-1 получают по непрерывной схеме каталитическим методом димеризации этилена с использованием гомогенной металлорганической каталитической системы на основе тетрабутоксититана и алкилпроизводных алюминия с выделением бутена-1 из реакционной смеси методом ректификации. В качестве побочных продуктов получают его изомеры, бутаны, гексены, олигомеры и др. В производстве используют газообразный бутен-1, а его смесь с воздухом взрывоопасна [1, 2], поэтому необходимо соблюдение требований взрыво- и пожаробезопасности.

Таблица 1. Характеристика опасных веществ, в производстве бутена-1

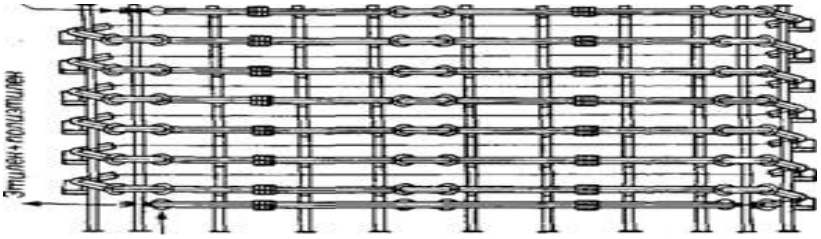
Наименование	Т само воспл. °С	Пределы взрываемости,% об.		Класс опасности	ПДК, кг/м^3
		НПВ	ВПВ		
Этилен, C_2H_4	427	2,8	36,35	4	100
Бутен-1, C_4H_8	384	1,6	10	4	100

Для предупреждения возникновения аварийных ситуаций предусмотрены мероприятия по предупреждению аварийных выбросов опасных веществ. Применяются средства контроля, автоматического регулирования технологических параметров, блокировок, сигнализации, противоаварийная защита. Однако, в практике известны аварийные ситуации и инциденты.

Таблица 2. Основные причины взрыво- и пожароопасности производства

№	Основные причины
1	Свойства воспламеняющихся газов (этилена, бутена-1 и др.) и легковоспламеняющихся жидкостей (гексеновой фракции).
2	Процесс протекает при повышенных давлениях 150-250 МПа и температурах 150-280 °С.
3	Выбросы опасных веществ, при разгерметизации технолог. системы.

В промышленности для полимеризации этилена используют трубчатые (до 55% ПЭВД) и автоклавные (до 45%) реакторы. Трубчатый реактор состоит из труб высокого давления, внутренний диаметр (для различных установок) от 34 до 68 мм, последовательно соединенных при помощи фланцев. Общая длина реактора - от сотен до тысячи и более метров. Трубы имеют наружные рубашки, где циркулирует теплоноситель - горячая вода под давлением.





Конструктивно - аппарат типа «труба в трубе».

Рис. 1. Полимеризация этилена в трубчатом реакторе.

Измерение давления реакционной массы проводится в начале, в конце и нескольких точках по длине реактора. В конце реактора установлен дросселирующий клапан, с помощью которого поддерживается необходимое реакционное давление и проводится выгрузка реакционной массы из реактора [3]. В реакторе по всей его длине расположены термопары для измерения температуры реакционной среды. Реакция полимеризации этилена относится к наиболее экзотермичным реакциям (теплота полимеризации 109 кДж/моль), поэтому существует в производстве полиэтилена проблема, связанная с отводом большого количества теплоты, выделяемой в процессе полимеризации.

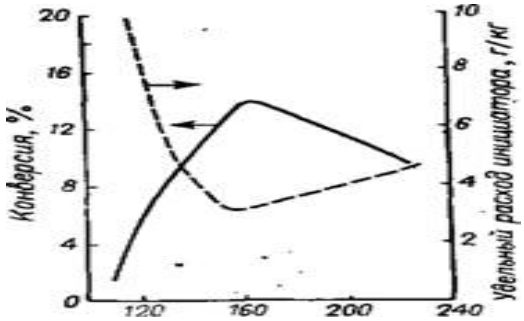


Рис. 2. Температура полимеризации, °С.

Способ отвода теплоты определяет конверсию этилена в полиэтилен, можно отводить теплоту через стенку реактора с помощью теплоносителя или нагревом в реакторе реакционной массы. Такие способы применяют отдельно или совмещают в зависимости от конструкции реактора. В трубчатых реакторах [3] при большой длине и малом диаметре труб, площадь поверхности теплопередачи велика и через стенку может отводиться до 35 % теплоты реакции. В реакторах автоклавного типа площадь теплопередающей поверхности невелика, теплота отводится за счет нагрева холодного этилена, подаваемого в реактор [4]. По принципу действия реакторы являются аппаратами смешения, они имеют несколько термопар для замера температуры реакционной массы, манометры для измерения давления на входе в реактор, предохранительные разрывные мембраны, штуцеры для вывода полимера.

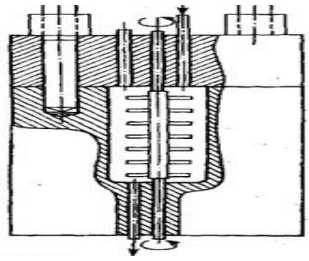


Рис.3. Реактор автоклавного типа.

В автоклавных реакторах - меньшая конверсия, чем в трубчатых, т.к. полимеризация в автоклавах протекает в адиабатических условиях и конверсия определяется возможностью отвода теплоты, затрачиваемой на разогрев реакционной смеси на выходе. В разработке технологии полимеризации этилена в автоклавном реакторе важным является проведение двухзонного процесса, путем установления перегородки, не позволяющей перемещаться реакционной смеси в осевом направлении. В каждую зону можно давать разные количества этилена и инициатора, поддерживая в них разную температуру и среднее время пребывания. Так, при давлении 150 МПа в верхней зоне и при температуре 180 °С, образующийся полимер имеет высокую молекулярную массу. В нижней зоне при температуре 280 °С, образуется полимер с низкой молекулярной массой. Смесь этих двух продуктов дает материал с полезными свойствами [4].

Для предупреждения развития возможных аварий технологическая линия производства бутена-1 разбита на автономные блоки запорно-отсечными устройствами. При этом, с целью противоаварийной устойчивости производства, отдельные технологические блоки также наличием запорной арматуры дополнительно делятся на блоки с минимальными энергетическими показателями взрывоопасности (отдельные единицы оборудования).

Однако, при высоком давлении и температуре выше 350 °С, происходит взрывное разложение этилена с образованием метана, водорода и углерода. В момент взрыва давление в замкнутом объеме может достичь 390-580 МПа, а температура 727-927 °С. Для предохранения оборудования от разрушения в случае разложения реакторы, а также и другие аппараты (компрессоры, отделители) снабжены предохранительными устройствами - разрывными мембранами и быстродействующими клапанами, сбрасывающими реакционную массу в атмосферу или в специальные резервуары.

В современных установках, например, типа «Полимир», благодаря выбранным оптимальным условиям (высокая скорость движения реакционной массы, гомогенность среды) полимеризация проводится без периодических сбросов давления. При этом достигается та же степень устойчивости, что и при работе со сбросами, но при более высокой конверсии и высоком качестве полиэтилена. Существенного повышения конверсии (до 30-35%) можно достичь в трубчатом реакторе с несколькими вводами холодного этилена по длине. В этом случае только часть этилена (от 15 до 50%) проходит подогреватель и вводится в начало реактора, а остальной этилен охлаждается и вводится через специальные боковые вводы (обычно 2-4) в зоны после достижения максимальной температуры по длине реактора.

Таким образом, для обеспечения безопасности эксплуатации оборудования в производстве бутена-1 необходимо строгое соблюдение установленных режимов технологического процесса. Обязательным является контроль герметизации применяемого оборудования, не допущение контакта с окислителями, наличия металлсодержащих примесей, случайных источников зажигания незначительной энергии. Важным условием является применение электрооборудования во взрывозащищенном исполнении, искробезопасных инструментов, сигнализаторов до взрывоопасной концентрации. Необходима установка систем водяного орошения аппаратов, порошкового или углекислотного пожаротушения, флегматизации азотом. Для повышения безопасности процесса рекомендуется применение современных установок и высоконадежной системы автоматической противоаварийной защиты.

Литература:

1. ГОСТ 31610.20– 1-2020 (ISO/IEC 80079-20-1:2017). Взрывоопасные среды.

2. Гасилов В.С., Чепегин И.В., Шильникова Н.В. Пожаровзрывозащита. Расчет количества воздуха и продуктов горения при пожаре. / Метод. указ. КГТУ, Казань, 2009 20 с.

3. Климов И.Г., Колягин В.В., Коваль Е.О., Максимова Н.В., Майер Э.А. Особенности производства ПЭВД в трубчатых реакторах при смешанном инициировании. / Хим. промышленность – 2009. Т. 86. - №8. – С. 407-413.

4. Садовский А.В., Суша Ю.И. Сравнительная характеристика автоклавных и трубчатых реакторов. /Инженерно-педагогическое образование в XX1 веке: Респ. науч-практ. конф. молод. ученых и студ. - Минск, БНТУ, 2019. С 296-297.

УДК 614.83, 66.011, 536.24

СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ТОКСИ-2.2 И ТОКСИ-3+

Сафина Р.Р., Старовойтова Е.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

Методики оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ (Токси-2 и Токси-3) предназначены для оценки зон распространения опасных веществ (ОВ) при промышленных авариях. Методика Токси-3 – дальнейшее развитие Методики оценки последствий химических аварий (Токси-1 и Токси-2), по сравнению с методикой Токси-2 в нее внесены существенные изменения и дополнения.

Методики позволяют определить [1, 2] количество поступивших в атмосферу ОВ при различных сценариях аварии; пространственно-временное поле концентраций ОВ в атмосфере; размеры зон химического заражения, соответствующие различной степени поражения; количество погибших/потерпевших по ингаляционной дозе, в том числе с учетом накопления токсодозы (с учетом пробит-функции); размеры зон дрейфа пожаровзрывоопасных облаков, в пределах которых сохраняется способность к воспламенению, и размеры зон распространения пламени (пожар-вспышки) или детонации, появления горячих продуктов; количество ОВ в облаке, ограниченном концентрационными пределами воспламенения.

Методика рекомендуется для использования [1] при разработке декларации безопасности опасных производственных объектов, на которых производятся, используются, транспортируются или хранятся ОВ; при разработке мероприятий по защите персонала и населения; при разработке планов локализации и ликвидации последствий аварий; сопровождаемых выбросом ОВ; при проектировании объектов, на которых производятся, используются, транспортируются или хранятся ОВ.

Методики распространяются на случаи выброса ОВ в атмосферу как в однофазном, так и в двухфазном состоянии. Границы зон химического заражения ОВ рассчитывают по летальной и пороговой токсодозам при ингаляционном воздействии на организм человека либо по пробит-функциям [3].

Рассмотрим основные расчетные соотношения методик Токси-2.2 и Токси-3+ [1, 2].

Для сценария полного разрушения оборудования, содержащего опасное вещество в жидком состоянии, характеристики выброса рассчитываются по нижеприведенным формулам для методики Токси-2, которые применимы и для Токси-3. Однако имеются отличия, начиная с формулы 7.

Общая масса ОХВ Q_3 (кг) в оборудовании:

$$Q_3 = Q_3^{\text{г}} + Q_3^{\text{ж}} + Q_3^{\text{и}} + Q^{\text{г}} . \quad (1)$$

Площадь поверхности пролива принимается равной площади обвалования, а при отсутствии обвалования или незначительной массе выброса определяется по формуле

$$F = \frac{Q^{ж} - Q_{з}^{г} - Q_{з}^{ж}}{0{,}05 * \rho_{ж}}; \quad (2)$$

$F_{конт}$ – площадь контакта с твердой поверхностью, м^2, эта площадь включает как боковую поверхность обвалования, так и подстилающую поверхность; при проливе на неограниченную поверхность $F_{конт} = F$; $T_П$, $\lambda_П$, $C_П$, $\rho_П$ – соответственно температура, теплопроводность, теплоемкость и плотность подстилающей поверхности; $t_{кип}$ – время, в течение которого ОХВ поступает в первичное облако из-за интенсивного кипения жидкого ОХВ за счет подвода тепла от подстилающей поверхности:

$$\sqrt{t_{кип}} = \min\left\{\frac{T_n - T_{кип} + |T_n - T_{кип}|}{\Delta H_{кип}} \sqrt{\frac{\lambda_n C_n \rho_n}{\pi} * \frac{1}{\sqrt{\mu} 10^{-6}(5{,}83 + 4{,}1U)\rho_н} * \frac{F_{конт}}{F}}, \sqrt{\frac{2\sqrt{F}}{U}}\right\}, \quad (3)$$

$\rho_н$ – давление насыщенного пара, Па;

$$\rho_н = 760 \exp\left(\Delta H_{кип} \mu \left(\frac{1}{T_{кип} + 273{,}15} - \frac{1}{T_{возд} + 273{,}15}\right)/R\right). \quad (4)$$

В формуле для расчета расхода ОХВ во вторичном облаке, образующемся при испарении ОХВ, используется эффективная скорость движения первичного облака в i-м сценарии непосредственно на месте выброса

$$q_з^{и} = F\sqrt{\mu} 10^{-6}(5{,}83 + 4{,}1\mu_{0\,эффз}^{и})\rho_н. \quad (5)$$

Эффективная скорость движения первичного облака $\mu_{эффi}$ (м/с):

$$\mu_{эффi} = \frac{\Gamma\left(\frac{1+\alpha_в}{\beta}\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right)} \mu_{10} \left(\frac{S_{zi}}{z_{10}}\right)^{\alpha}, \quad (6)$$

где β – вспомогательный коэффициент; $\beta = 1 + \alpha_в$; $\alpha_в$ – показатель степенной зависимости скорости ветра от высоты; $\Gamma(a) = \int_0^{+\infty} x^{a-1} e^{-x} dx$ – гамма-функция (Г-функция, интеграл Эйлера второго рода) при а >0; S_{zi} – вертикальная дисперсия при рассеянии первичного облака, м; z_{10} – стандартная высота, на которой задается скорость ветра, принимается равной 10 м; μ_{10} – скорость ветра на высоте z_{10}, м/с.

Эффективная скорость движения вторичного облака определяется аналогично (формула (6)).

Формула для расчета размера первичного облака по методике Токси-2 определяется по формуле:

$$R_З = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}} * \frac{Q_З}{\rho_{выб}}. \quad (7)$$

$R_З$ - радиус первичного облака опасного вещества в начальный момент времени (на месте выброса) в i-ом сценарии, м; $\rho_{выб}$ - плотность опасного вещества в первичном облаке в начальный момент (на месте выброса) времени в i-м сценарии, кг/м^3.

Начальный размер вторичного облака ОХВ по методике Токси-2 при испарении из пролива, м:

$$R_з^и = 0{,}5\sqrt{F}. \quad (8)$$

$R_3^и$ – радиус вторичного облака опасного вещества в i-ом сценарии, м.

Формула для расчета первичного облака по методике Токси-3, при отсутствии данных о начальных размерах первичного и вторичного облаков рекомендуется для первичного облака принимать начальный радиус R_3 равным высоте H_3 (формула (9)), а полуширину $B_3^и$ вторичного облака – полуширине пролива (формулы (10)), $H_3^и$ - высота вторичного облака определяется (по формуле (11)):

$$R_з = H_з = \sqrt[3]{\frac{Q_з}{\pi\rho_{выб}}}; \quad (9)$$

$$B_з^и = 0{,}5\sqrt{F}; \quad (10)$$

$$H_з^и = \frac{q_з^и}{2u_{0\ эффз}^и B_з^и \rho_з^и}. \quad (11)$$

Максимальная концентрация при прохождении первичного облака наблюдается на оси y = 0, z = 0 в центре облака и вычисляется по формуле:

$$c_i\left(x, 0{,}0, t = \frac{x}{u}\right) = \frac{2Q_i}{\frac{8}{3}\pi R_i^3 + (2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} G_0(x). \quad (12)$$

где σ_x, σ_y, σ_z – величины дисперсий вдоль осей x, y, z; G_0 - вспомогательная величина при расчете значений концентрации и токсодозы.

Как видно из формулы (12) концентрация зависит от величин дисперсии. Также следует отметить, что в методике Токси-2.2 рассматривается концентрация при прохождении первичного облака и вторичного облака.

Концентрация при прохождении вторичного облака, образующегося при истечении жидкого ОХВ из разрушенного оборудования, рассчитывается по формуле:

$$c_i^ж(x,y,z,t) = \begin{cases} \dfrac{q_i^ж}{U(2\pi(R_i^ж)^2 + 2\pi\sigma_y\sigma_z} G_н(x,y,z), x \le x_{гр}(t_i^ж) при > \dfrac{x}{U} \\ 0, x \le x_{гр}(t_i^ж) при \le \dfrac{x}{U} или\ t \ge \dfrac{x}{U} + \ t_i^ж \\ \dfrac{q_i^ж q_i^ж}{2\pi(R_i^ж)^2 t_i^ж U + (2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} G_з(x,y,z,t), x > x_{гр}(t_i^ж) \end{cases}. \quad (13)$$

$q_i^{ж}$ - расход аммиака во вторичном облаке, образующемся при истечении жидкого аммиака из разрушенного оборудования в i-м сценарии, кг/с; U - скорость ветра на высоте 10 м, м/с; $R_i^{ж}$ - начальный размер вторичного облака аммиака, образующегося при истечении жидкого аммиака из разрушенного оборудования в i-м сценарии, м; $G_н$ - вспомогательная величина при расчете рассеяния непрерывного выброса; $G_з$ - вспомогательная величина при расчете рассеяния залпового выброса; $t_i^{ж}$ - длительность истечения жидкого аммиака из разрушенного оборудования в i-м сценарии, с.

При сравнении двух методик выявлены как ряд похожих моментов, так и ряд отличий. Преимуществом модели Токси-3+ является то, что можно определить величину риска, также можно найти количество пострадавших. Методика Токси-3+ позволяет получить результаты с учетом таких процессов как: 1) рассеяние облака в вертикальном направлении за счет атмосферной турбулентности; 2) процесс гравитационного растекания; 3) движение облака при переменной по высоте скорости ветра; изменение температуры облака за счет подсасывания свежего воздуха. 4) теплообмен облака газа с подстилающей поверхностью; 5) изменение температуры облака за счет подсасывания свежего воздуха.

Отличие между двумя методиками состоит в том, что модель рассеяния «Токси-3+» это интегральная модель, а методика «Токси-2», это модель, основанная на модели распределения Гаусса. Стандартная методика, построенная на Гауссовской модели, не может с высокой точностью, дать информацию по рассеянию «тяжелого газа», как залпового, так и от продолжительного выброса [3 ÷8]. Это касается как выбросов малой массы и большой массы. Методика «Токси-3+» дает положительный результат только при длительном выбросе.

Литература:

1. Методика оценки последствий аварий (Методика ТОКСИ в Редакции 2.2.) в сб. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сб. документов. – Сер. 27. – Вып. 2. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: ФГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности», 2005. – 208 с.

2. Методическое пособие по расчету последствий возможных аварий и оценке риска на опасных производственных объектах с использованием программного комплекса Токси+^{RISK}.

3. Старовойтова, Е.В. Оценка последствий аварийного выброса сжиженного аммиака с использованием вероятностного критерия поражения / Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 17. – С. 259-261.

4. Некоторые аспекты обеспечения промышленной безопасности опасных объектов. Имитационное моделирование / В. А. Алексеев, С. И. Валеев, С. А. Вилохин [и др.] ; Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань : Фэн, 2020. – 128 с. – ISBN 978-5-9690-0792-5.

5. Галеев, А.Д. Численный анализ аварий на объектах использования сжиженных газов / Галеев А.Д., Гасилов В.С., Поникаров С.И., Старовойтова Е.В. // Безопасность жизнедеятельности. –2006. – № 12. – С. 30-37.

6. Старовойтова, Е.В. Оценка последствий аварийного выброса сжиженного аммиака с использованием программы FLUENT / Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 12. – С. 47-51.

7. Старовойтова, Е.В. Численный анализ процесса парообразования при кипении аварийного пролива сжиженного газа / Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20. – № 2. – С. 24-28.

8. Галеев, А.Д. Динамика формирования взрывоопасного облака при аварийном выбросе смеси сжиженных углеводородных газов в атмосферу / Галеев А.Д., Старовойтова Е.В., Поникаров С.И. // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 3. – С. 130-135.

УДК 66.094.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ С СОДЕРЖАНИЕМ ЖЕЛЕЗА В РАМКАХ ПРОЦЕССА СКВО

Соловьёва А.О., Усманов Р.А., Аетов А.У., Мазанов С.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: alinasoloveva161@mail.ru

В современном мире в результате резкого увеличения потребления пресной воды возникает проблема загрязнения водоемов различными органическими и неорганическими веществами, сбрасываемыми, как правило, промышленными предприятиями. Одним из возможных способов решения данной проблемы является утилизация промышленных сточных вод, в процессе сверхкритического водного окисления (СКВО), позволяющем полностью нейтрализовать воздействие вредных веществ.

Описание процесса СКВО сточных вод.

В сверхкритическом флюидном (СКФ) состоянии вода обладает высокой растворяющей способностью, в результате чего способна полностью растворить в себе компоненты сточных вод. В СКФ условиях реакция окисления растворенных в сверхкритической воде соединений протекает значительно интенсивнее и длится всего несколько секунд или минут. При этом органическая составляющая превращается в углекислый газ и воду, а нерастворимые неорганические соединения выпадают в осадок и могут быть легко отделены [1].

Для интенсификации реакции СКВО возможно применение катализаторов. В реакциях окисления органических веществ высокую активность проявляют Fe-содержащие катализаторы, что делает их привлекательными для проведения процессов очистки сточных вод [2]. Также они обладают высокой селективностью по отношению к выходу тех или иных продуктов реакции, имеют термическую стабильность и устойчивость к процессу дезактивации, относительно невысокую себестоимость по сравнению с другими катализаторами, применяемыми в подобных процессах [3].

На кафедре «Теоретических основ теплотехники» ФГБОУ ВО «КНИТУ» была спроектирована и собрана экспериментальная установка проточного типа для проведения реакции СКВО сточных вод с использованием катализаторов [4]. В качестве катализаторов были использованы Fe-содержащие катализаторы. На рисунке 1 представлена принципиальная схема проточной установки.

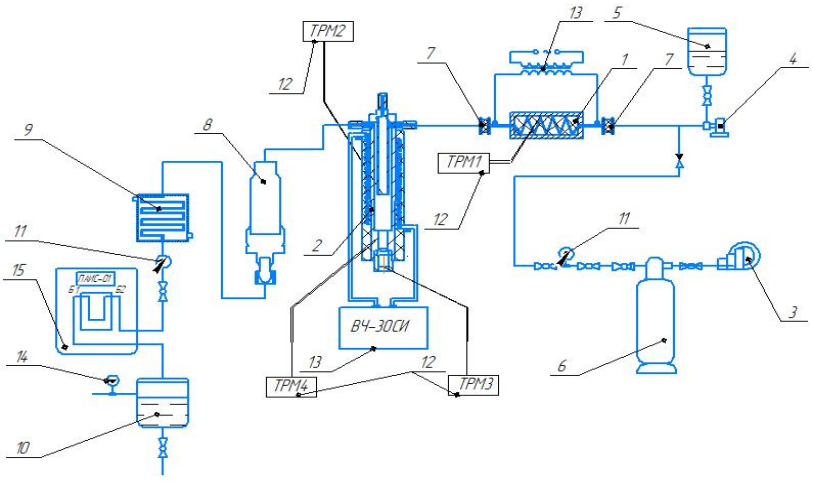


Рисунок 1 – Принципиальная схема проточной установки очистки стоков в СКФ условиях: 1 – теплообменник для нагрева сточных вод; 2 – реактор с индукционным нагревом; 3 – компрессор воздушный; 4 – насос высокого давления; 5 – емкость для загрузки неочищенных стоков; 6 – ресивер; 7 – токоизолирующий элемент; 8 – каталитический участок; 9 – холодильник; 10 – емкость для очищенных стоков; 11 – манометр; 12 – термопары; 13 – понижающий трансформатор; 14 – вентиль; 15 – pH-метр

Разбавленные стоки (соотношение стоки : вода составляет 1:20) из емкости 15 насосом высокого давления 4 подаются в нагреватель 1. В это же время сжатый компрессором 3 воздух поступает из ресивера 6 также в нагреватель 1, где происходит предварительный нагрев смеси разбавленных стоков с воздухом. Далее предварительно нагретая смесь подается в реактор 2, где происходит реакция сверхкритического водного окисления сточных вод. Образующиеся продукты реакции поступают в каталитический участок 8, а затем в охладитель 9. Нерастворимая неорганическая составляющая выпадает в осадок и собирается в камере под реактором. После охлаждения смесь воды и углекислого газа подается в систему сброса давления. Вода поступает в емкость для очищенных стоков 10, а углекислый газ удаляется в атмосферу через вентиль 14.

Результаты исследований.

Для проведения процесса СКВО сточных вод с применением Fe-содержащих катализаторов использовались промышленные сточные воды, получаемые при проведении реакции эпоксидирования пропилена предприятием ПАО «Нижнекамскнефтехим». Особенностью данного производства является использование катализатора на основе дорогостоящего молибден содержащего комплекса. В ходе проведения процесса эпоксидирования пропилена происходит частичное вымывание молибдена из носителя. За неимением возможности выделения его из сточных вод металл утилизируют вместе со стоками, что приводит к большим материальным затратам.

Перед проведением реакции полученные от ПАО «Нижнекамскнефтехим» сточные воды анализировали с помощью ИК Фурье-спектрометра. Результаты анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Содержание основных компонентов сточных вод

Компонент сточных вод	Химическая формула	Содержание, % масс.
Пропиленгликоль	$C_3H_8O_2$	12
Метилфенилкарбинол	$C_6H_5CH(OH)CH_3$	6,5
Этилбензол	$C_6H_5CH_3CH_2$	2,5
Фенол	C_6H_5OH	2,5
Ацетофенон	$CH_3COC_6H_5$	1
Молибден	Mo	0,2
Вода	H_2O	40
Прочее		35,3

Несмотря на низкое содержание молибдена в данном составе, при крупнотоннажном производстве утилизируется около 45 тонн данного металла в год.

В качестве катализаторов использовались ацетат железа (Fe-Ac) и гидроксид железа (Fe-OH). Для исследования влияния катализаторов проводили по 5 исследований при различных температурах (от 400 до 600 ºС), давлениях 22,4-25,5 МПа и коэффициентах избытка воздуха 2 и 4, с применением катализаторов и без них. Время реакции составляло 2,91-3,11 минут.

После проведения экспериментов рассчитывали химическое потребление кислорода (ХПК) и эффективность окисления по формуле:

$$X = 1 - ХПК_к/ХПК_н, \quad (1)$$

где $ХПК_н$ – химическое потребление кислорода для исходного стока, г O_2/л; $ХПК_к$ – химическое потребление кислорода для очищенного стока, г O_2/л.

Из рисунка 2 видно, что с увеличением температуры показатель ХПК во всех случаях уменьшается, а эффективность окисления, наоборот, увеличивается. Присутствие Fe-содержащих катализаторов позволило провести СКВО с большей эффективностью. Также влияние на окисление органических соединений в сточных водах оказывал коэффициент избытка воздуха. Наилучшие результаты получены при коэффициенте избытка воздуха 4. Таким образом, наименьшее значение ХПК, равное 576,7 г O_2/л, и наибольшая эффективность окисления, равная 0,991, были получены при температуре 873 К, коэффициенте избытка воздуха 4 и при использовании гидроксида железа. ХПК технической воды принимается равным 1000 г O_2/л, что выше полученного при проведении очистки методом СКВО почти в два раза.

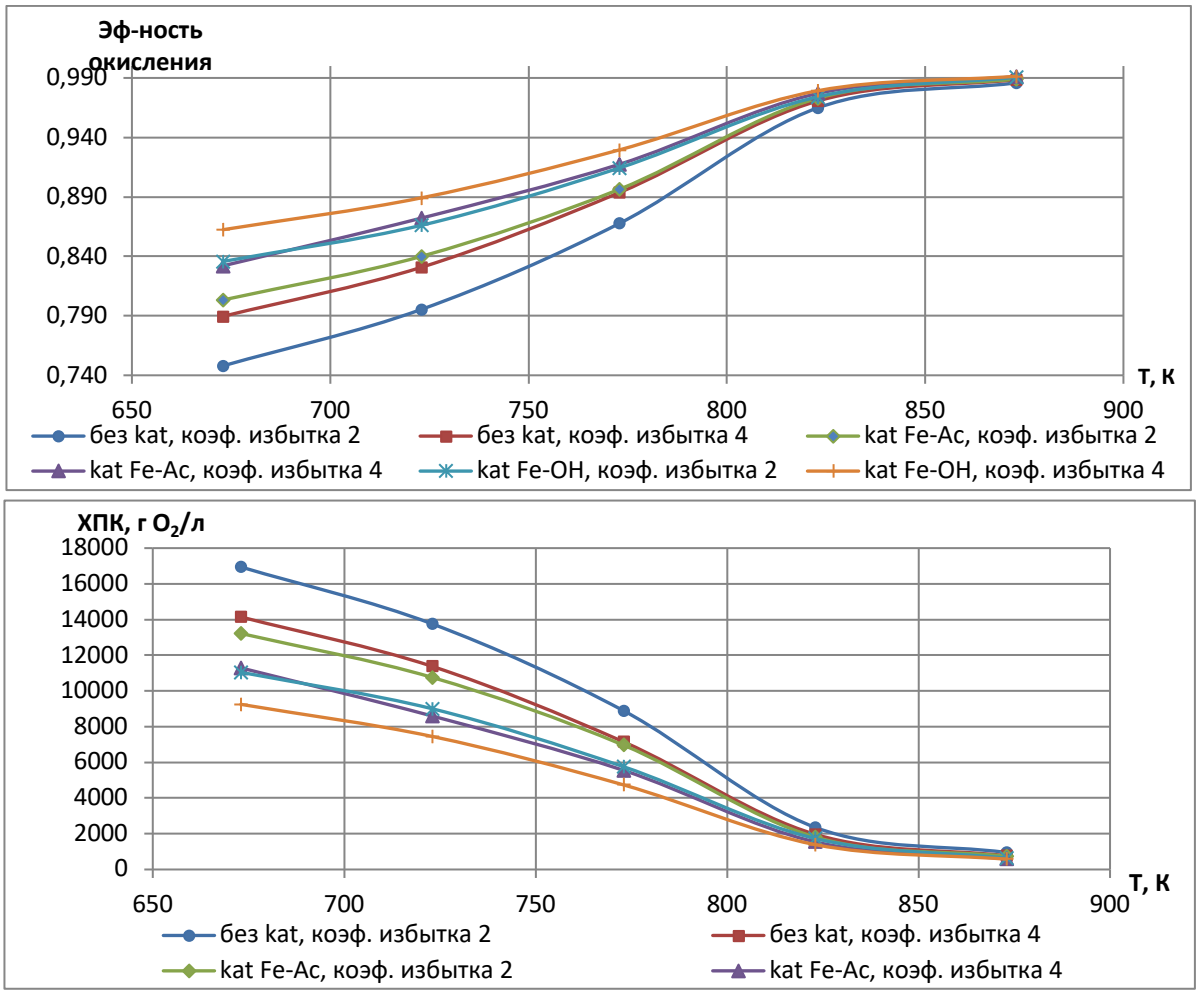


Рисунок 2 – Зависимости ХПК и эффективности окисления от температуры, коэффициента избытка воздуха, присутствия и вида катализатора

Также был проанализирован состав полученного в ходе реакции неорганического твердого осадка. При этом содержание молибдена в нем достигало 29,3%. При дальнейшей переработке осадка возможно выделение молибдена и возврат его обратно в производственный процесс [4]. Таким образом, количество утилизированного со сточными водами данного дорогостоящего металла снизится.

Вывод

Проведение реакции СКВО промышленных сточных вод позволяет очистить стоки и нейтрализовать вредное воздействие токсичных веществ в их составе. При этом было показана возможность получения на выходе воды, ХПК которой не превышает ХПК технической воды. Оптимальными параметрами проведения реакции являются температура 873 К, коэффициент избытка воздуха 4, катализатор гидроксид железа. Минимальное значение ХПК составило 576,7 г O_2/л, а наибольшая эффективность окисления равнялась 0,991. Также в составе твердого минерального осадка было обнаружено 29,3% молибдена, который при

дальнейшем разделении компонентов возможно выделять и возвращать в производство, снижая тем самым материальные затраты.

Литература:

1. Gumerov F.M., Usmanov R.A., Aetov A.U., Gabitov R.R., Mazanov S.V., Gabitov I.R., Zaripov Z.I. Oxidation of Fatty Acids by Hydrogen Peroxide in Aqueous Medium Under Supercritical Fluid Conditions // Mass Spectrometry & Purification Techniques (OMICS) 2017, V.3 Issue 1. doi:10.4172/2469- 9861.1000116.

2. Исследование возможности получения водорода в процессах фотокаталитической деградации органических загрязнителей воды с использованием Fe-содержащих композитов / В.Н.Баталова и др. // Вестник Томского государственного университета. – 2013. - № 366. – С.197-200.

3. Перовскитоподобные катализаторы типа $LaBO_3$ (B = Cu, Fe, Mn, Co, Ni) для глубокого жидкофазного окисления фенола пероксидом водорода / О.П. Таран и др. // Journal of Siberian Federal University. – 2013. – 6. – С.266-285.

4. Патент №171030 от 17.05.2017г. «Реактор с индукционным нагревом для осуществления химических реакций в сверхкритических условиях»

УДК 614.83, 66.011, 536.24

АНАЛИЗ ЗОН ПОРАЖЕНИЯ АММИАКОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CFD И ИНТЕГРАЛЬНОЙ МОДЕЛЕЙ

Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Сафина Р.Р., Киляков Е.Л.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ПИ «Союзхимпромпроект»,
E-mail: starovojtova@inbox.ru

Наибольшее количество аварий происходит на объектах, где хранятся или производятся опасные химические (токсичные) вещества, такие как хлор, аммиак. Существует реальная вероятность, что облако, которое образуется после выброса, имеет концентрацию, которая превышает допустимые нормы. Это объясняет актуальность прогнозирования количества опасного вещества при аварийном выбросе его в окружающую среду [1, 2], а также нахождения размеров зон поражения при залповом выбросе опасного вещества в атмосферу [3÷ 6].

На данный момент есть три основных подхода для описания количественного рассеяния в атмосфере [2]: дисперсионные модели рассеяния; модели, которые в основе имеют интегральные законы сохранения массы, энергии и импульса; модели, которые устроены по принципу решения уравнений по сохранению массы.

В статье приведены расчеты зон токсического поражения при залповом выбросе аммиака в атмосферу, выполненные по CFD-модели в пакете ANSYS Fluent и по ТОКСИ-3+ [7]. Более подробное описание CFD-модели можно найти в работах [8 ÷ 12]. Масса выброса при расчетах принята 10 тонн. Скорости ветра имели значения 1, 2.5 и 5 м/с. Состояние атмосферы – изотермия. Начальная температура сжиженного газа в емкости принималась равной температуре окружающей среды $T_0=T_a=308$ К. Время экспозиции $t_{эксп}$ при расчете размеров зон поражения принято равным 1800 сек.

Изолинии летальной и пороговой токсодоз при выбросе аммиака приведены на рис. 1-3. Место выброса располагается в точке с координатами (0,0) (на графиках). Ветер направлен слева направо по оси *x*.

Из приведенных графиков видно, что расчеты, полученные по CFD-модели, дают завышенные значения при определении летальных зон поражения. Однако, это наблюдается при скоростях ветра 2,5 и 5 м/с. При скорости ветра 1 м/с расхождения незначительные. Также можно заметить, что протяженность облака при летальной концентрации практически совпадают, а ширина облака, вычисленная по рассматриваемым методикам – существенно отличается. Так, ширина облака при летальной токсодозе при 2,5 м/с примерно в 2,5 раза больше значения по CFD-модели, чем по ТОКСИ-3; при 5 м/с – в 5,52 раза.

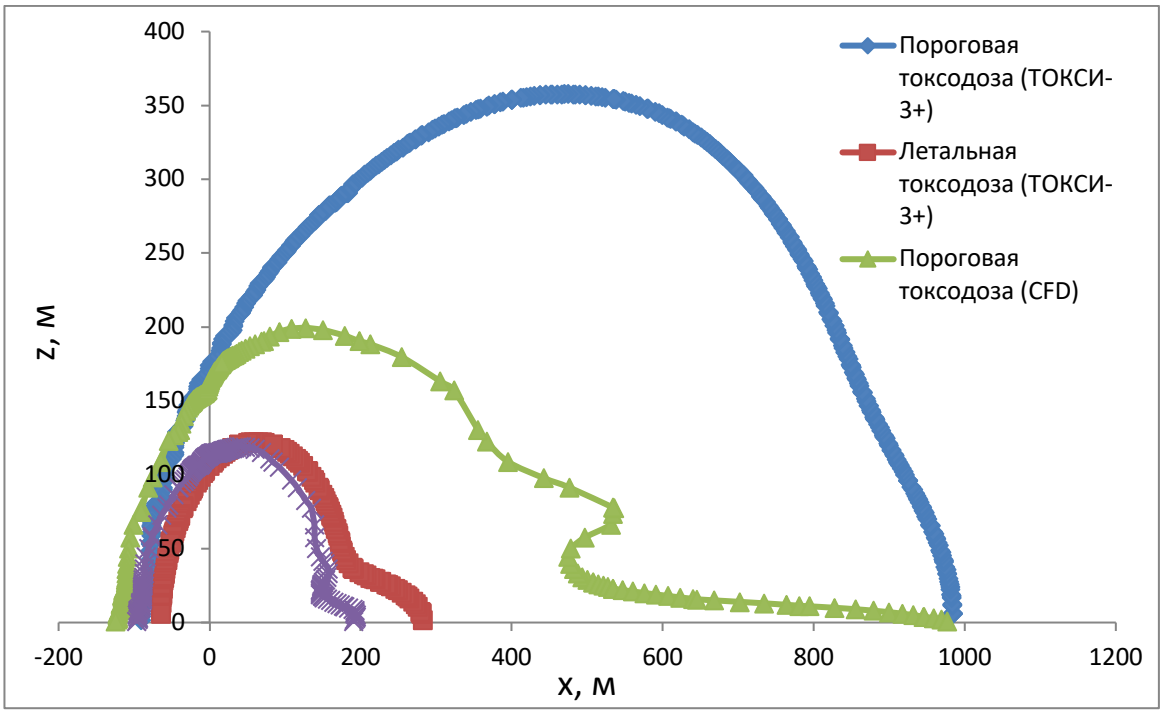


Рис 1. Изолинии летальной и пороговой токсодоз (изотермия) при скорости ветра 1 м/с и массе выброса 10 тонн

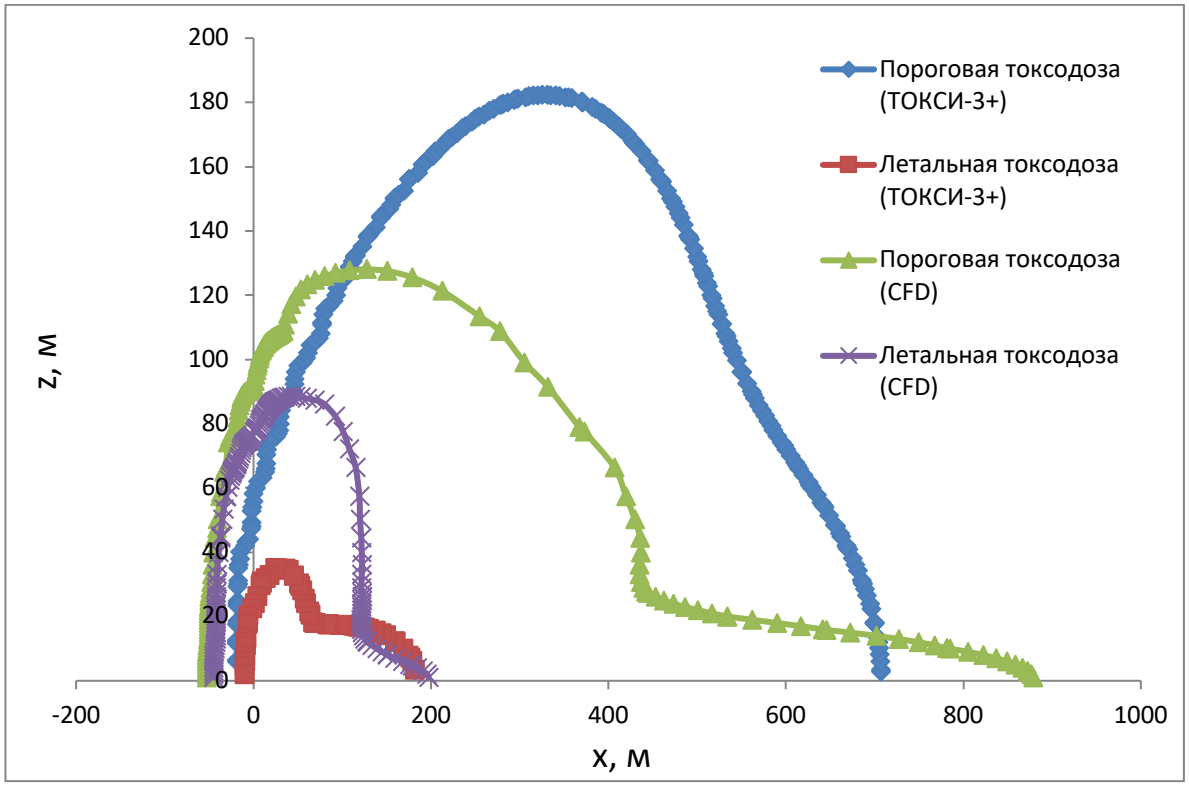


Рис 2. Изолинии летальной и пороговой токсодоз (изотермия) при скорости ветра 2,5 м/с и массе выброса 10 тонн

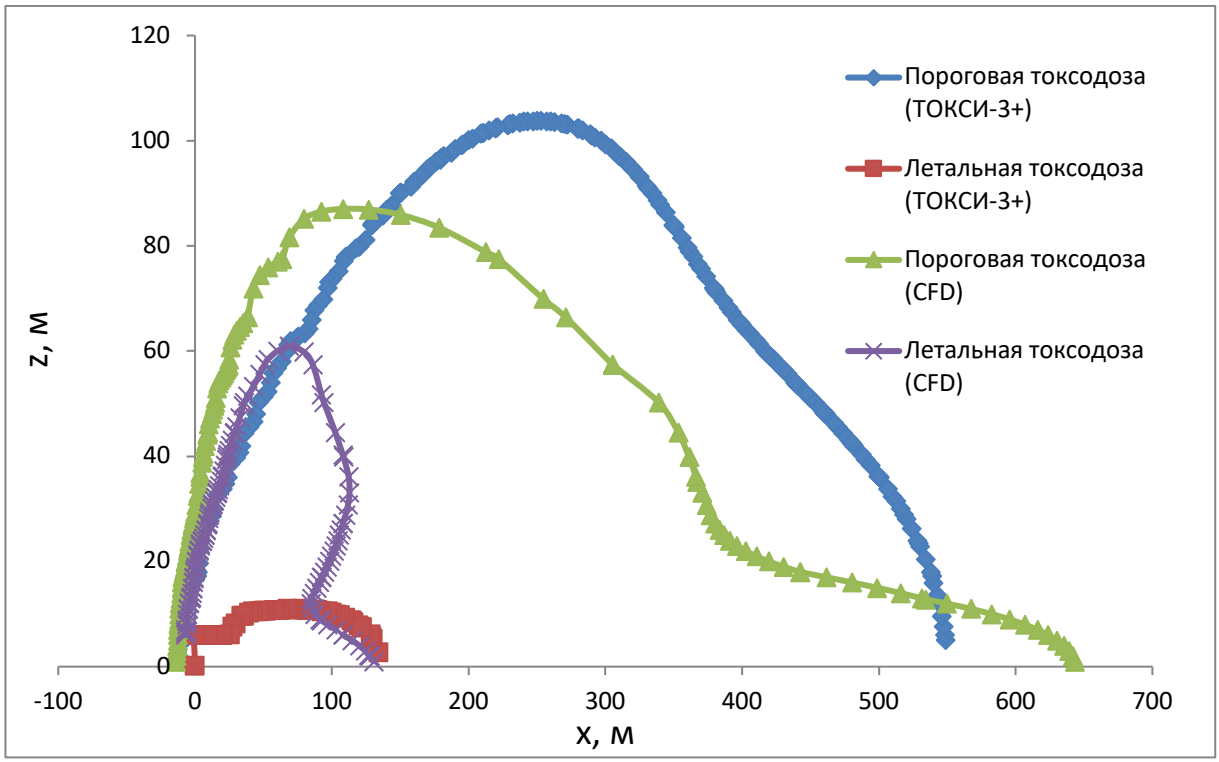


Рис 3. Изолинии летальной и пороговой токсодоз (изотермия) при скорости ветра 5 м/с и массе выброса 10 тонн

Если рассматривать зоны поражения при пороговой концентрации, то при повышении скорости ветра отличия в протяженности зон поражения возрастает, однако разница в ширине облаков снижается. Протяженность облака по ветру 2,5 и 5 м/с больше по CFD-модели на 28,8 и 38% соответственно. При 1 м/с практически совпадают. Ширина облака по CFD-модели меньше, чем рассчитанная по ТОКСИ-3 при 1 м/с в 1,8 раза; при 2,5 м/с – в 1,42 раза; при 5 м/с – в 1,2 раза.

Таким образом, можно сделать вывод, что рассматриваемые модели в целом показывают неплохое совпадение результатов протяженности (по направлению ветра) зоны поражения. Однако, размеры зон порогового и летального поражения в поперечном направлении, полученные по ТОКСИ-3, существенно превышают размеры зон, полученные с использованием модели CFD. Это обуславливает необходимость дополнительных исследований для обоснования выбора размеров капель в первичном облаке, начальных размеров и формы первичного облака, степени перемешивания выброса с воздухом в момент образования первичного облака при CFD моделировании.

Литература:

1. Галеев, А.Д. Численный анализ аварий на объектах использования сжиженных газов / Галеев А.Д., Гасилов В.С., Поникаров С.И., Старовойтова Е.В. // Безопасность жизнедеятельности. – 2006. – № 12. – С. 30-37.

2. Основы прогнозирования последствий промышленных аварий / Галеев А.Д., Старовойтова Е.В., Салин А.А., Поникаров С.И. – уч.пособие. –Казань, 2017. – 213 с.

3. Старовойтова, Е.В. Оценка последствий аварийного выброса сжиженного аммиака с использованием программы FLUENT // Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 12. – С. 47-51.

4. Старовойтова, Е.В. Оценка последствий аварийного выброса сжиженного аммиака с использованием вероятностного критерия поражения / Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. // Вестник Казанского технологического университета. –2013. – Т. 16. – № 17. – С. 259-261.

5. Старовойтова, Е.В. Численный анализ процесса парообразования при кипении аварийного пролива сжиженного газа / Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20. – № 2. – С. 24-28.

6. Галеев, А.Д. Динамика формирования взрывоопасного облака при аварийном выбросе смеси сжиженных углеводородных газов в атмосферу / Галеев А.Д., Старовойтова Е.В., Поникаров С.И. // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 3. – С. 130-135.

7. Методическое пособие по расчету последствий возможных аварий и оценке риска на опасных производственных объектах с использованием программного комплекса Токси$^{+риск}$ / Кол. авт. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 326 с.

8. Старовойтова, Е.В. Математическая модель процесса парообразования при аварийном проливе сжиженного газа / Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 1. – С. 323-325.

9. Программа для расчета интенсивности парообразования из пролива однокомпонентного сжиженного газа / Галеев А.Д., Старовойтова Е.В., Салин А.А. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020614082, 26.03.2020. Заявка № 2020612897 от 16.03.2020.

10. Шестакова, А.А. Моделирование рассеивания паровоздушного облака при истечении сжиженного природного газа (СПГ) в атмосферу / Шестакова А.А., Галеев А.Д., Старовойтова Е.В., Поникаров С.И., Мухамадиева Л.Н. // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2019. – № 3. – С. 723-733.

11. Галеев, А.Д. Численное моделирование формирования токсичного облака при залповом выбросе сжиженного хлора в атмосферу / Галеев А.Д., Старовойтова Е.В., Поникаров С.И. // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86. – № 1. – С. 203-212.

12. Старовойтова, Е.В. Моделирование парообразования с поверхности пролива сжиженного газа / Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 4. – С. 110-112.

УДК 66.021.1

ПРОИЗВОДСТВО ОРГАНИЧЕСКОГО УДОБРЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШНЕКОВОГО СЕПАРАТОРА

Тургунбоев Н.Р., Алексеев В.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: valexeevtt@mail.ru

Использование свежего куриного помета в качестве органического удобрения на полях не допустимо, так как может повлечь загрязнение почвы, уничтожение плодородного слоя почвы путем его загрязнения тяжелыми металлами, патогенной микрофлорой и другими загрязнителями, что является нарушением земельного законодательства.

Помет куриный свежий относится к 3 классу опасности, помет куриный перепревший - к 4 классу опасности (Приказ Росприроднадзор от 22.05.2017 №242 (ред. От 28.11.2017) «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов»).

Согласно требованием ст. 51 Федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» отходы производства подлежат сбору, накоплению, утилизации, обезвреживанию, транспортировке, хранению и захоронению, условия и способы, которые должно быть безопасными для окружающей среды и регулироваться законодательством Российской Федерации [1]. В этой связи перед современной наукой стоит ряд конкретных задач, обусловленных присутствием в биосфере соединений, являющихся токсичными для окружающей среды и человека, способных накапливаться в живых организмах и вызывать нежелательные изменение в обменных процессах.

В то же время растениеводство глубоко нуждается в рентабельном удобрении. Несмотря на то, что Россия является одним из основных производителей минеральных удобрений, вносится в почву на 1 гектар на порядок меньше, чем 40 в развитых в сельском хозяйстве государствах, что является одной из причин уменьшения плодородия и дефицит урожая сельскохозяйственных культур.

Для аннулирования негативных явлений возникает необходимость замкнутых циклов производства продукции птицеводства и переработки помета [2]. Одним из вариантов замкнутого цикла производства продукции является схема, представленная на рис. 1.

Эффективное решение по переработке (утилизации) куриного помета, основанное на разделении – сепарировании помета. Для этого применяется шнековый сепаратор.

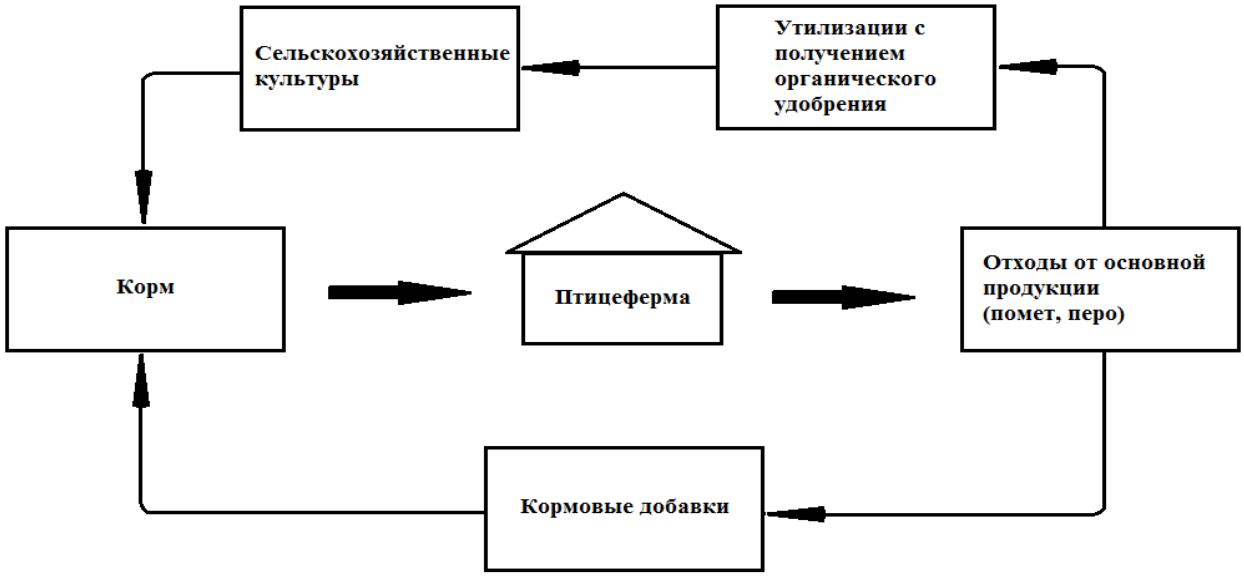


Рис. 1 – Принципиальная схема замкнутого производства продукции в птицеводстве

Куриный помет состоит из твердых частиц и жидкости; решение проблемы заключается в том, чтобы отделить твердые частицы прежде, чем их загрязняющие окружающую среду элементы растворяется в жидкости [3]. Шнековый сепаратор – это лучшее из доступного сегодня оборудования для выполнения этой задачи.

Удаление твердых частиц из жидких помета – ключевой момент в решении этой проблемы, цель которого - сократить содержание загрязняющих часть помета, что позволит удлинить срок службы и значительно сократить объем отстойников, облегчить технологию внесения в почву, увеличить эффективность биологических очисток и минимизировать вредное влияние на окружающую среду.

Шнековый сепаратор представляет собой шнековый пресс, с котором сжатие производится при помощи шнека. Это единственный сепаратор для переработки помета, эффективно отделяющий до 85% твердых составляющих из стоков помета довольно сухие вещества. Эффективность отделения твердых составляющих зависит от размера ячеек сита, шнека, модели сепаратора, типа твердых составляющих и расположения противовесов системы. При этом степень отделения сепаратором азота, фосфора, калия и питательных веществ колеблется от 10 до 80% [4].

Шнековый сепаратор производится в различных модификациях, с различными видами загрузочных отверстие, барабанных сит с размером ячеек от 0,1 мм до 1,0 мм. Это предоставляет эффективно применять сепаратор при различной влажности помета. После этого происходит последний отбор жидкой фракции, которая выделявшийся через нижний выходной патрубок из корпуса сепаратора.

Показатель отжима определяется величиной кольцевого зазора между конусом и торцом корпуса. Зазор можно менять с помощью гайки узла выгрузки. Конструкция шнекового сепаратора представлена на рис. 2.

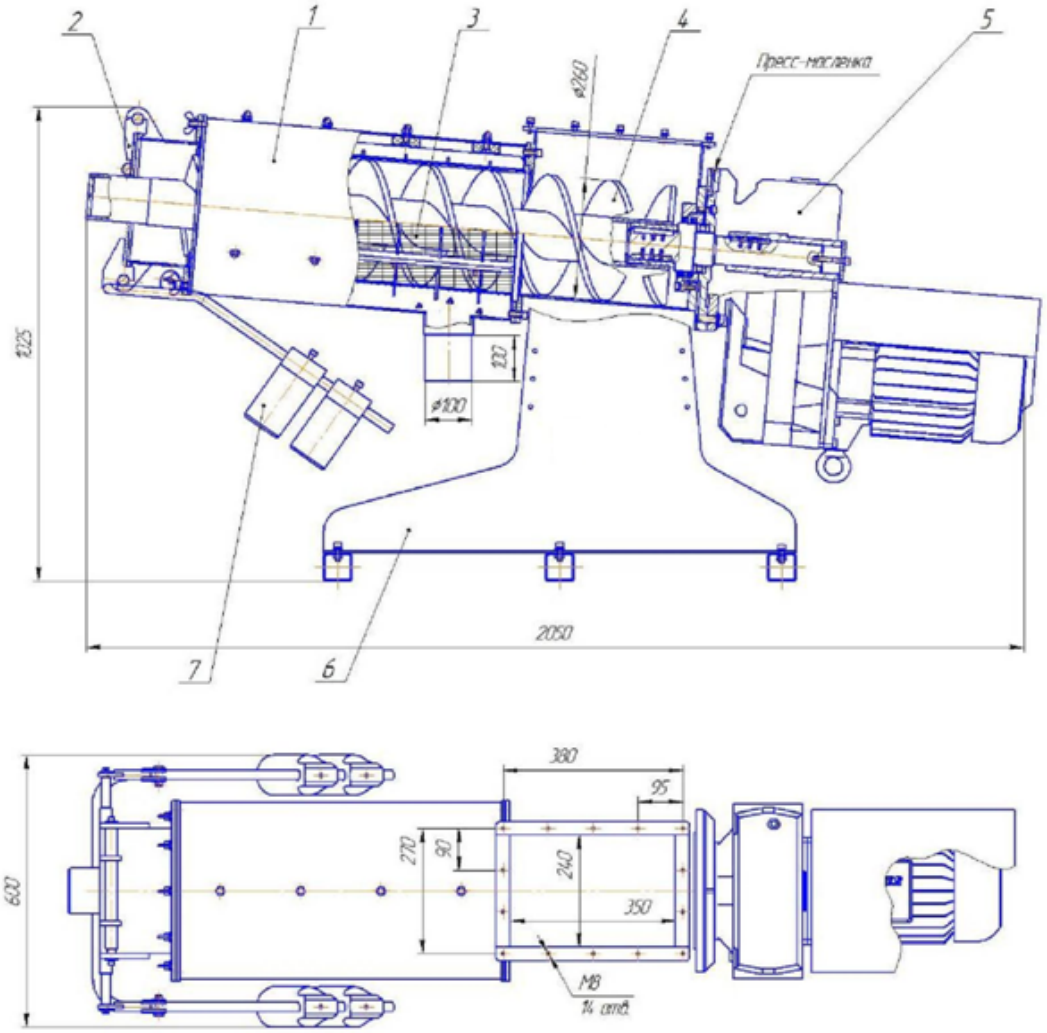


Рис. 2 – Шнековый сепаратор: 1 – корпус сепаратора; 2 - двустворчатая крышка; 3 - фильтр элемент (сито); 4 – шнек; 5 - мотор-редуктор; 6 - рама опорная; 7 - противовес-регулятор.

Принцип работы шнекового сепаратора состоит в следующем.

Сырье (куриный помет) поступает в узел загрузки через входной патрубок при помощи насоса или навалом через накопительный бункер. При избытке подачи сырья насосом предусмотрен выходной патрубок для возврата избытка [5]. В загрузочной воронке (накопительном бункере) сырье захватывается лопастями шнека и вращением подается внутрь сита. По мере продвижения вдоль сита происходит перемешивание сырья и процеживание жидкой фракции через ячейки сита. При следующем перемещении сырья к торцу включается в действие механизм прессования. После этого происходит последний отбор жидкой фракции, которая выделяется через нижний выходной патрубок из корпуса сепаратора.

Показатель отжима определяется величиной кольцевого зазора между конусом и торцом корпуса. Зазор можно менять с помощью гайки узла выгрузки. Твердая фракция выходит через торец сепаратора – окно узла выгрузки.

Преимущество применения шнекового сепаратора заключаются в следующем: снижается объем промышленных отходов [6]; возможна дальнейшая переработка жидкой фракции; возможно применение твердой фракции в качестве удобрения или как добавки на комбикорм.

Объём жидкой фазы в помете сокращается на 15 – 30%; не образуются плотные слои и нет необходимости дополнительного перемешивания; после извлечения твердых элементов и углерода уменьшаются потери аммиака, метана, азотных соединений (NH_3, CH_4, N_2O) в процессе хранения и внесения; значительно уменьшается количество неприятного запаха; хорошо усваивается почвой и растениями при простой и не дорогой системе внесения в почву.

В твердой фракции хорошо сохраняется компост без неприятного запаха; высокое содержание твердых веществ позволяет долгосрочное хранение без применения особых мер; улучшается структура почвы и повышается содержание гумуса; широкий спектр применения в сельскохозяйственной отрасли, где необходимы растительные питательные вещества; осуществляется легкая перевозка и расфасовка.

Эффективное использование куриного помета в птицеводческих хозяйствах позволяет: повысить уровень безопасности жизни и здоровья граждан; рационально использовать внутренние ресурсы; повысить качество и конкурентоспособность побочной продукции птицеферм; обеспечить национальную, экологическую безопасность технологии производственного процесса предприятий.

Литература:

1. ГОСТ 31461-2012 «Помет птицы. Сырье для производства органических удобрений. Технические условия».

2. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации, 2013 г., Министерство сельского хозяйства Российской Федерации (Минсельхоз России).

3. Минеев В.Г. Агрохимия: Учебник.– 2-е издание, переработанное и дополненное.– М.: Издательство МГУ, Издательство «КолоС», 2004.– 720 с.

4. Санитарные Правила 1.2.1170-02 «Гигиенические требования к безопасности агрохимикатов».

5. https://alkargroup.com/ru/sepra/work-process.

6. https://rcycle.net/navoz/kak-udobrenie/kak-ispolzovat-ptichij-pomet-v-ogorode.

УДК 621.643.412

ПРОЧНОСТЬ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ

Фахретдинов М.Ф., Сабитов М.Х., Фролагин М.Ю.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

Делая расчет фланцевого соединения, приходится решать несколько задач: соединения должно быть прочным, жестким и герметичным.

В некоторых случаях трубы требуют присоединения дополнительных элементов, например, насосов, задвижек или контрольно-измерительной аппаратуры. В данном случае применение сварки становится невозможным и для крепления изделий применяют фланцы. Также фланцевые соединения используют для стыковки частей трубопровода. Фланцы являются самыми популярными соединительными элементами в промышленности это обусловлено их прочностью, долговечностью, возможностью многократного использования (монтажа и демонтажа).

Существуют различные методы расчета фланцевых соединений, в данной статье я хочу рассмотреть такие методы как расчет фланцевых соединений по методу допускаемых напряжений и расчет фланцевых соединений по методу предельных нагрузок.[1]

Наибольшее распространение получил метод расчета по допускаемым напряжениям, согласно которому наибольшее напряжение в некоторой точке нагруженной детали не должно превышать определенной величины, свойственной данному материалу и типу детали. Метод расчета по допускаемым напряжениям исходит из рассмотрения идеально упругого тела, не учитывая действительных свойств материалов, по существу являющихся упругопластичными.

При пластичных деформациях нельзя, как правило, пользоваться методом расчета по допускаемым напряжениям. В этом случае о пригодности конструкции судят по величине предельной нагрузки. Метод расчета по предельной нагрузке более полно учитывает прочность конструкций, изготовленных из пластичных материалов. Это позволяет облегчить вес конструкции, т. е. экономить материал, идущий на изготовление.

При расчете фланцевых соединений по методу допускаемых напряжений сперва необходимо провести расчет болтов, для этого требуется определить их диаметр и количество. В ГОСТ 34233.4-2017 (Сосуды и аппараты. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений) и нормалях даны сведения о диаметре и количестве болтов, соответствующих определенным условным давлениям и условным проходам. Все расчеты проводятся в соответствии с нормами, по формулам из справочной литературы. [1]

Затем определяется допустимая нагрузка на один болт в зависимости от материала, допускаемого напряжения и поперечного сечения болта по внутреннему диаметру резьбы.

Зная допустимую нагрузку на один болт определяется число болтов.

Следующим шагом в расчете является определение общего усилия в болтах фланцевого соединения, оно должно противодействовать нагрузке на фланцевое соединение от внутреннего давления и обеспечивать герметичность соединения путем создания необходимого контакта сжатия прокладки. Общее усилие складывается из нагрузки от внутреннего давления в сосуде и нагрузки на прокладку, необходимую для создания герметичного соединения.

Общий подход к расчету на герметичность фланцевых соединений, работающих под давлением, основан на определении усилий, воспринимаемых деталями соединения при затяжке и в рабочих условиях (под давлением) с учетом их совместной деформации.

Таким образом, для проведения силового анализа фланцевого соединения и определения его геометрических параметров необходимо знать такие характеристики, как модуль упругости, характер ползучести материалов составляющих его элементов.

Уплотнение играет важную роль в обеспечении герметичности фланцевого соединения, и в расчете фланцевого соединения определяется расчетный диаметр уплотнения в зависимости от действительной ширины прокладки.

При расчете на герметичность фланцевого соединения вначале необходимо определить усилие для первоначального сжатия прокладки и обеспечения герметичности фланцевого соединения.

Необходимо рассчитать допустимую нагрузку на болты, при затяжке фланцевого соединения. Следом в расчете определяется расчетная болтовая нагрузка. Все формулы для проведения данных расчетов также можно использовать из справочной литературы.

Все фланцы по методам их расчета можно разделить на три группы:

1) Цельные и плоские приварные фланцы;
2) Свободные, но приравненные к цельным со втулкой;
3) Свободные фланцы без втулки.

Для каждой из этих групп по графикам находятся поправочные коэффициенты.

Расчет каждой группы фланцев ведем по напряжениям возникающим от действия суммарного изгибающего момента трех сил. Для этого рассчитывается нагрузка от внутреннего давления, нагрузка от внутреннего давления на площадь кольца и максимальная нагрузка на прокладку.

Соответственно после расчета вышенаписанных трех сил определяются моменты от действия этих трех сил.

Далее вычисляется суммарный изгибающий момент.

Для всех типов фланцев по формулам вычисляются продольное напряжение во втулке, радиальное напряжение во фланце, тангенциальное напряжение во фланце.

Напряжения во фланце не должны превышать следующих величин:

Продольное напряжение во втулке: $S_H \leq 1{,}5\sigma_{\text{доп}}$

Радиальное напряжение во фланце: $S_R \leq 1{,}1\sigma_{\text{доп}}$

Тангенциальное напряжение во фланце: $S_T \leq 1{,}1\sigma_{\text{доп}}$

По результатам проведения расчета и выполнения условий можем сделать вывод обеспечивается ли прочность фланца для заданных условий.

Расчет фланцевых соединений по методу предельных нагрузок начинается с определения толщины и плеч фланцев различного типа.

Если имеем дело со свободным фланцем то рассчитывается бурт для него. По формулам рассчитывается толщина бурта, приваренного к трубе (сосуду) или составляющего с нею одно целое. Конструкция и размер бурта имеют разные типы и так же есть формулы для расчета коэффициентов для бурта с воротничком и бурта с конической шейкой (рисунок 1).

Следующим этапом следует расчет болтов фланцевого соединения. Метод определения расчетного болтового усилия затрагивает фланцевые соединения с плоскими и зубчатыми прокладками и строится на том условии, что при затягивании фланцевого соединения для его герметичности прокладка должна быть в самом начале сжата и расплющена на поверхности.

Расчет состоит из следующих этапов:

1) Рассчитывается минимальное усилие, необходимое для пластического сжатия прокладки при затяге в условиях нормальной температуры.

2) Определяется удельное давление на контактную площадь прокладки при затяге в зависимости от конструкции и материала прокладки.

3) Рассчитывается минимальное усилие, действующее на прокладку и необходимое для сохранения герметичности в рабочих условиях.

4) Определяем усилие, действующее на соединения от внутреннего давления.

5) Далее определяется расчетное усилие в болтах при предварительном затяге и при рабочих условия, расчет ведется по формулам.

6) Определяется внутренний диаметр резьбы болтов (шпилек), берется большее из значений по формулам

7) Определяется число болтов Z по большему из полученных значений

Формулы, необходимые поправочные коэффициенты принимаются из справочной литературы [2].

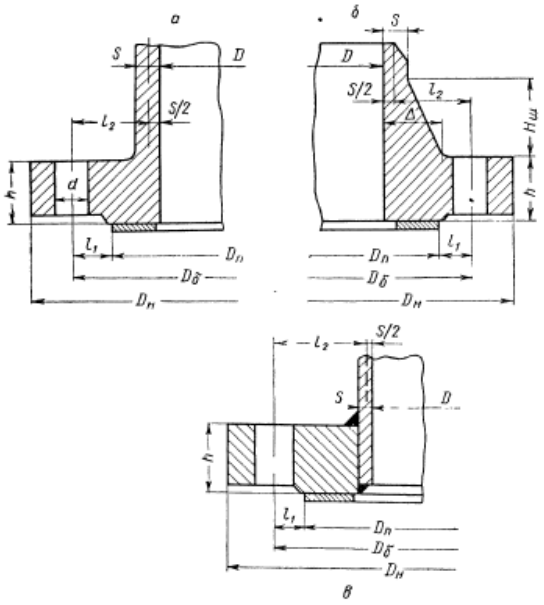


Рис. 1 – Типы цельных фланцев.
(а – фланец с цилиндрическим воротником, б – фланец с конической шейкой, в – плоский приварной фланец)

Допускаемые напряжения при расчете по методу предельных нагрузок для фланцев жестких и свободных и для буртов свободных фланцев находятся по таблицам в зависимости от марки стали и расчетной температуры.

Допускаемые напряжения для литых фланцев снижаются на 20%.

Допускаемые напряжения для болтов (шпилек) так же находятся по таблицам в зависимости от марки стали и расчетной температуры.

Результатом проверки прочности фланцев служит сравнение табличных значений допускаемых напряжений в зависимости от марки стали и расчетной температуры и значений допускаемых напряжений болтов при затяге и в рабочих условиях найденных по формулам.

Литература:

1. ГОСТ 34233.4—2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. Введен 1.08.2018 – 41 с.

2. Волошин А. А., Григорьев Г.Т. Расчет и конструирование фланцевых соединений: Справочник.— 2-е изд., перераб. и доп.— Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979.— 125 с.

УДК 620.191.33

ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ДЕФЕКТОМ ТИПА РАССЛОЕНИЕ

Харламов И.Е., Валеев С.И.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: vsi73@mail.ru

В настоящее время оборудование потенциально опасных химических, нефтехимических, нефтегазоперерабатывающих производств изношено на 80-90 %. Это приводит к снижению надежности и долговечности оборудования и в свою очередь к повышению аварийности на производстве [1,6,8,10].

Оборудование нефтехимических, нефтегазоперерабатывающих производств изготавливается в основном из различного вида металлов. Причины возникновения аварийных ситуаций связаны в основном с образованием и развитием дефектов, которые могут появиться не только при эксплуатации, но и изначально присутствовать в металле оборудования, не замеченном при входном контроле [3,6,9,10]. Все это может привести к разгерметизации технологического оборудования, выбросу и проливу взрывопожароопасных веществ.

Причинами дефектов и разрушения материалов могут быть причины металлургического характера, когда имеются дефекты в заготовках.

Одним из наиболее опасных дефектов металлургического происхождения, приводящий к авариям, является трещиноподобный дефект типа расслоение основного металла или сварного соединения [2.4,9,10].

В общем случае расслоение-нарушения сплошности внутри прокатанного металла, представляющие собой раскатанные крупные дефекты слитка (глубокие усадочные раковины, усадочная пористость, скопления пузырей или неметаллических включений). Характерным для расслоения является то, что поверхность нарушения сплошности параллельна плоскости прокатки, раскатанные скопления неметаллических включений дают внутреннюю прослойку, разделяющую лист или профиль на две, три или более частей.

Обычно эксплуатация такого оборудования разрешается при условии ремонта дефектного участка с применением сварки или периодического обследования дефектного участка неразрушающими методами с целью контроля увеличения размеров расслоения, если размеры и расположение расслоения не позволяет произвести его ремонт [3,9,10]. Проведение периодического контроля процесс дорогой и трудоемкий, особенно в случае невозможности вывода оборудования из технологического процесса.

При принятии решения о дальнейшей эксплуатации оборудования с дефектом типа расслоение необходимо учитывать в первую очередь глубину его залегания и направленность.

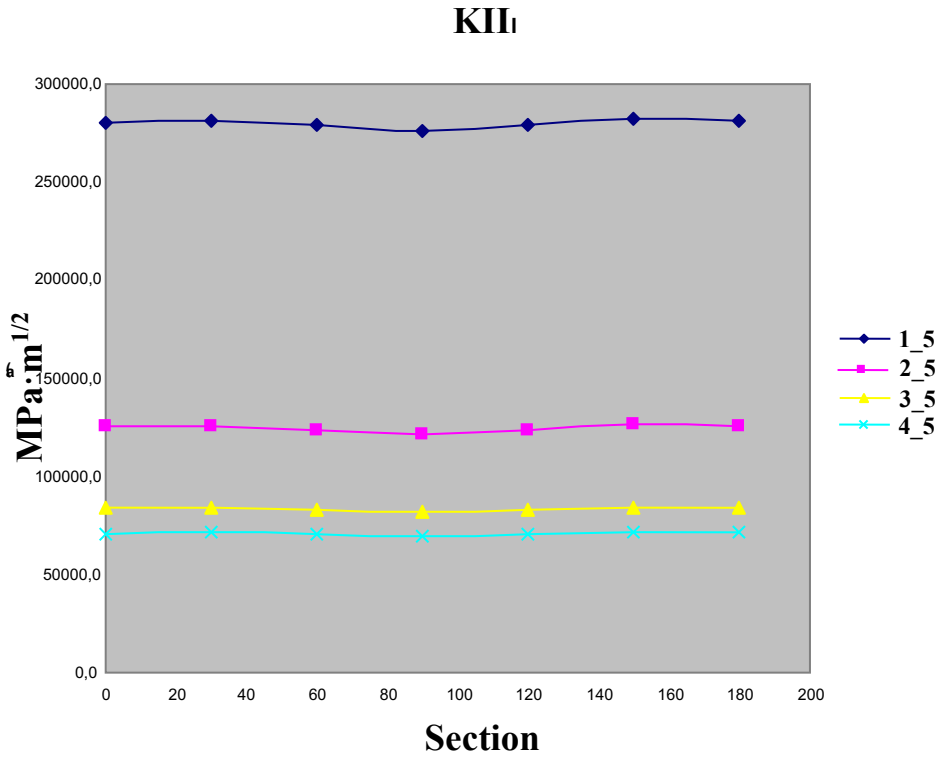


Рис. 1 Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжения KII для различных глубин залегания расслоения.

Известные экспериментальные данные не позволяют дать количественную оценку характеристик разрушения элемента, имеющего расслоение. Для аналитических методов эта задача представляет определенную трудность. Перспективным в этом отношении являются численные методы, среди которых ведущая роль отводится методу конечных элементов.

При оценке безопасной эксплуатации элемента оборудования с расслоением необходимо, прежде всего, оценить возможность его хрупкого разрушения или сопротивление хрупкому разрушению, так как разрушения этого вида особенно опасны. Основным критерием для анализа хрупких и квазихрупких разрушений (температура эксплуатации не превышает первую критическую температуру) является коэффициент интенсивности напряжений КИН [4,5,7,8].

Расслоение дефект трещиноподобный, отличается от других дефектов этого типа (трещин нормального отрыва) своим особенным расположением в металле. Как уже отмечалось выше, этот дефект располагается параллельно поверхности

стенки элемента. Над силами нормального отрыва берегов расслоения значительно преобладают силы продольного и поперечного сдвига.

Для подтверждения этого утверждения проведены исследования конечно-элементной модели обечайки с расположенными в ней расслоениями. Размеры обечайки и внутреннее давление постоянны.

Расчет напряженно-деформированного состояния и вычисление коэффициентов интенсивности напряжений выполнены методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS [2,5,7]. Рассмотрена модель половины обечайки с записью соответствующих граничных условий на плоскости симметрии. Для имитации реакции днищ к торцевым плоскостям прикладывались соответствующие растягивающие напряжения. Расслоения моделировались на разных глубинах залегания. Расслоения моделировались параллельно поверхности обечайки. Не учитывалось влияние концентраторов напряжений (швов, штуцеров, опор и т.д.). Для создания правильной сетки в области фронта расслоения использовались 2-D элементы со смещенными центральными узлами (с целью реализации функции формы с корневой особенностью) PLANE82 и 3-D элементы SOLID186 с добавлением контактных элементов CONTA174 и TAR

Решалась нелинейная контактная статическая задача без учета пластических деформаций в зоне фронта трещины.

На рисунках 1 показаны расчетные значения коэффициентов интенсивности напряжения (КИН) КII (для КI, КIII графики не показаны) для 7 точек вдоль фронта круглого расслоения расположенных через каждые 30 град от 0 до 90 град относительно оси расслоения, проходящей по нормали к плоскости через его центр. Значения получены при различных глубинах залегания расслоения для отношений глубины залегания к толщине стенки от 1/5 до 4/5. Аналогичные расчеты проведены для коэффициентов интенсивности напряжения (КИН) КI, КIII.

По результатам расчетов установлено, что максимальные значения относительно других коэффициентов интенсивности напряжения достигают коэффициенты интенсивности напряжения второго типа-КII (трещина продольного сдвига) расположенная ближе к внутренней стенке обечайки.

Таким образом при прочих равных условиях преобладают коэффициенты интенсивности напряжения второго КII типа, которые в свою очередь достигают максимальных значений для расслоений, расположенных ближе к внутренней стенке обечайки.

Проведенные исследования подтверждают [4], что расслоение не оказывает существенного влияния на несущую способность оборудования, пока оно локально и не распространяется.

Литература:

1. Валеев С.И. Прочность элементов оборудования длительное время находящегося в эксплуатации / С.И. Валеев, Н.В. Пластинкин //Фундаментальные основы механики. -2018.-№3.-С.129-130.

2. Валеев, С И. Техническая и инновационная надежность опасных производственных объектов: учебное пособие / С.И. Валеев, А.С. Поникарова, С.И. Поникаров. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2019. – 122 с.

3. Валеев С.И. Эксплуатация технологического оборудования на опасном производственном объекте / С.И. Валеев // Современные проблемы теории машин.-2020.-№ 9.-С. 50-52.

4. Исследование расслоений различной формы и ориентации в обечайке с определением параметров трещиностойкости / И.Е. Харламов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета.-2014.-Т. 17.-№ 20.-С. 267-269.

5. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов. М. А. Олферьева // М.: Едиториал, УРСС. – 2003. – 272 с.

6. Монтаж, техническая диагностика и ремонт основного технологического оборудования химических производств и нефтегазопереработки / И.И. Поникаров [и др.]. -Казань: Изд-во Академии наук РТ,-2018.-798 с.

7. Морозов Е.М. Методы конечных элементов в механике разрушения / Е.М. Морозов, Г.П. Никишков.- М.: «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, 1980.-256 с.

8. Некоторые аспекты обеспечения промышленной безопасности опасных объектов. Имитационное моделирование / В. А. Алексеев, С. И. Валеев, С. А. Вилохин [и др.] ; Казанский национальный исследовательский технологический университет. – Казань : Фэн, 2020. – 128 с.

9. Шакирова Ю.И. Эксплуатация технических устройств (сосудов и аппаратов) с дефектами типа расслоение / Ю.И. Шакирова, С.И. Валеев, В.А. Булкин // Вестник Казанского технологического университета.-2012.-Т.15.-№ 16.-С 157-158.

10. Valeev S.I., Kharlamov I.E. Forecasting the resource of bulk-capacity equipment with crack-like defects / Materials Today: Proceedings, -Vol. 19, -Nos. 5, -2019, -pp. 2488-2490.

УДК 536.24

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ НА НАГРЕТЫХ СТЕНКАХ ТОПЛИВНЫХ КАНАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТАНОВОК НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Хаустов Д.А., Алтунин К.В.
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
E-mail: altkonst881@yandex.ru

Доклад посвящен проблеме образования углеродсодержащих осадков на поверхностях топливных каналов тепловых двигателей и установок нефтехимических производств. Рассмотрено осадкообразование термоэлектрической природы, не зависящее от гравитации.

Процесс осадкообразования в жидких углеводородных горючих (УВГ) и охладителях (УВО) в большинстве случаев оказывает негативное влияние на работу тепловых двигателей, энергоустановок и установок нефтехимических производств. Данный процесс зачастую приводит к дополнительным экономическим потерям. Например, в США только для обычного нефтеперерабатывающего завода ежегодные затраты составляют до 10 млн долларов [1]. Аналогичные проблемы стоят и в теплоэнергетике и двигателестроении.

Осадкообразование может иметь место и в ДВС, и в ВРД. В топливной системе ВРД образование углеродсодержащих осадков приводит [2, 3]: к неуправляемости двигателя; к повышению времени приемистости или помпажу двигателя; к самовыключению двигателя на земле или в воздухе; к частичному или полному закупориванию форсуночных фильтров и форсуночных каналов, что ведет к частичной или полной потере тяги реактивного двигателя.

Процесс образования углеродсодержащих отложений имеет место и при применении различных мазутов в наземных установках. Например, загрязнение поверхности нагрева мазутных подогревателей приводит к резкому, в 5-10 раз, увеличению гидравлического сопротивления, а также к уменьшению коэффициента теплопередачи. Вместе с этим, значительно снижается тепловая мощность подогревателей, что приводит к сокращению их рабочей кампании. При появлении углеродсодержащих отложений на стенках распылителей мазутных форсунок ухудшается распыливание горючего и снижается полнота сгорания топлива [9].

Существующие методики расчета толщины углеродсодержащих осадков не охватывают полностью многие режимы эксплуатации топливно-подающих и охлаждающих каналов двигателей и установок нефтехимических производств на жидких УВГ (УВО), не всегда являются точными, не учитывают влияние

электрических свойств топлив, стенок и осадков [2, 5, 6, 7]. Можно отметить, что осадкообразование зависит от многих факторов [2, 8]:

$$\delta_{ос} = f\,(T_{w.};\ T_f;\ p;\ W;\ M;\ П;\ K_{шер.},\ K_{O_2};\ K_{ин.};\ X;\ N;\ G;\ E;\ \tau \text{ и др.}), \qquad (1)$$

где T_w - температура стенки (канала со стороны УВГ, УВО); T_f - температура жидкого (газообразного) УВГ, УВО; p - давление в топливно-охлаждающей системе; W - скорость прокачки УВГ (УВО); M - материал стенки; $П$ – присадки; $K_{шер.}$ - степень шероховатости поверхности; K_{O_2} - насыщенность кислородом; $K_{ин.}$ - насыщенность инертными газами; X - вид УВГ (УВО), его физико-химические и физико-технические характеристики и свойства; N - число циклов работы двигателя, ЭУ; G – геометрические характеристики внутренних узлов топливно-охлаждающих систем (расстояния между деталями, габариты выемок (лунок) и т.д.); E – электростатические поля; τ – время наработки.

Главным фактором в (1) является температура (стенки и УВГ (УВО)), при росте которой образование осадков усиливается, а также происходит увеличение размеров частиц осадка (табл. 1).

Разработанная методика расчета осадкообразования на нагретых стенках топливных каналов двигателей и установок нефтехимических производств основана на формуле [7, 9, 10, 11]:

$$\sum_{i=1}^{n} \delta_{ос_i} = \sum_{i=1}^{n} K_{ос i}\left(ln\rho_{ос_{max}} - ln\rho_{ос_{i-1}}\right)\tau_i\, T_{wi}, \qquad (2)$$

где $\delta_{ос_i}$ - толщина i-го слоя осадка, м; $К_{ос_i}$ – коэффициент режима, характеризующий условия i-го режима, $\frac{1}{Ом \cdot с \cdot К}$ (в случае применения $ln\rho_{ос_{max}}$ и $ln\rho_{i-1}$ – м/(с·К)); $\rho_{ос_{max}}$ - максимальное значение удельного электрического сопротивления конечного слоя осадка, Ом·м; $\rho_{ос_{i-1}}$ – значение удельного электрического сопротивления на поверхности предыдущего слоя осадка, Ом·м; τ_i – время наработки i-го режима, с; $Т_{w_i}$ - температура нагретой стенки при i-м режиме, К.

Таблица 1 – Влияние температуры на размеры частиц осадка в некоторых реактивных горючих

Марка УВГ	Температура, ^{0}С	Общее количество осадка, м^2/100 мл	Распределение осадка на фильтрах, %			
			1-2 мк	30 мк	60 мк	120 мк
ГФ	140	1,2	79,6	1,8	1,0	0
	160	1,6	75,0	3,4	2,0	1,0
	180	1,7	66,9	2,8	1,0	0
	220	1,1	47,3	8,6	4,4	2,2

Т-7	150	1,0	80,0	1,0	0,5	0
	160	1,3	71,3	1,8	1,1	0
	200	1,1	61,0	4,0	2,0	0

Методика расчета толщины слоя осадка заключается в следующем:

1) строится график зависимости удельного электрического сопротивления осадка $\rho_{\text{ос}}$ от средней температуры слоя осадка T_{moc} при определенном давлении, скорости прокачки УВГ (УВО), с заданной пористостью, для определённого вида жидкого УВГ (УВО);

2) из построенного графика выбирается $\rho_{\text{ос}_{max}}$, которое сохраняется постоянным в ходе расчета;

3) определяются режимы эксплуатации топливного канала, их время, температуры стенки; подсчитываются коэффициенты всех режимов $K_{\text{ос}_i}$;

4) по формуле (2) рассчитывается общая толщина слоя осадка, при подсчете первого слоя (за минимальное время) учитывается удельное электрическое сопротивление металлической стенки ρ_w, а в других случаях - $\rho_{\text{ос}}$ в зависимости от T_{oc}, которая берется на поверхности предыдущего слоя осадка или $\rho_{\text{ос}}$ в зависимости от толщины предыдущего слоя осадка $\delta_{\text{ос}}$;

5) в случае переменной температуры стенки топливного канала (например, перегрев из-за роста толщины общего слоя осадков) необходимо учитывать пористость и теплофизические свойства всех слоев осадков, включая теплопроводность, но в (2) использовать температуру стенки T_{w_i}.

В целом, разработанная методика расчета является универсальной, может применяться в различных технических и технологических областях. Материалы доклада будут полезны для ученых, разработчиков тепловых двигателей, энергоустановок и специалистов нефтехимических производств.

Литература:

1. Van Nostrand W.Z., Leach S.H. and Haluske J. Economic Penalty Associated with the Fouling of Refinery Heat Transfer Equipment. Washington, 1981, pp. 619-643.

2. Алтунин В.А. Исследование особенностей теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в энергетических установках многоразового использования. Книга первая. – Казань: Изд-во «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина», 2005. – 272 с.

3. Большаков Г.Ф. Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах. – Л.: Изд-во «Химия», 1972. – 232 с.

4. Алтунин К.В. Разработка горелок повышенной эффективности для тепловых электростанций: монография. - Казань.: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2016г. – 136 с.

5. Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М., Сапгир Г.Б. Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях. – Казань: Абак, 1999. – 284 с.

6. Шлякотин В.Е., Шихман Ю.М. Эмпирические модели ресурсной наработки и динамики жидкофазных коксоотложений при нагреве авиационного керосина. Авиационные двигатели, 3(4), 2019. – С. 57-62.

7. Алтунин К.В. Разработка новой методики расчета толщины слоя углеродсодержащих осадков в топливных каналах тепловых двигателей и энергоустановок // Инженерный журнал: наука и инновации. №10 (118). DOI: 10.18698/2308-6033-2021-10-2119. 2021 г.

8. Алтунин К.В., Гортышов Ю.Ф., Галимов Ф.М. и др. Проблемы осадкообразования в энергоустановках на жидких углеводородных горючих и охладителях. Энергетика Татарстана, №2, 2010. – С. 10-17.

9. Алтунин К.В. Определение скорости осадкообразования в энергоустановках многоразового использования на углеводородных горючих. Матер. докл. 6 Всеросс. научно-техн. студенч. конф. «Интенсификация тепло- и массообменных процессов в химической технологии», посвящённая 90-летию со дня рождения А.Г. Усманова. – Казань: Инновационно-издательский дом «Бутлеровское наследие», 2010. – С. 41-45.

10. Алтунин К.В. Способ прогнозирования осадкообразования в энергоустановках многоразового использования на жидких углеводородных горючих и охладителях. Патент РФ на изобретение №2467195, кл. F02K 9/00, B64F 5/00, G01N 25/72, G01K 7/02. Бюл. №32 от 20.11.2012.

11. Алтунин К.В. Модель идеального осадкообразования в энергоустановках многоразового использования на жидких углеводородных горючих и охладителях. Матер. докл. 18 Междунар. молодёж. научной конф. «Туполевские чтения». Сек. №3.: «Теплотехнические проблемы в энергоэффективных установках». – Казань: Изд-во Каз. гос. техн. ун-та им. А.Н. Туполева, 2010. Т.2. С. – 66-68.

УДК 621.64

ЗАДАЧИ РАСЧЕТА РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Хисматуллин И.И., Сабитов М.Х.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: ilsaf98@yandex.ru

Введение

Увеличение объемов добычи и переработки нефти сопровождается производством нефтегазового оборудования для приема, хранения и транспортировки нефтепродуктов. В состав такого оборудования входят резервуары РВС, которые используются в технологических системах для хранения продуктов нефтепереработки. Резервуар представляет собой сложное техническое сооружение, состоящее из основания, днища, стенки резервуара, понтона, крыши, предохранительных устройств, трубопроводов различного назначения, которые отличаются как по своему исполнению, так и по характеру возникающих в процессе монтажа и эксплуатации в них дефектов. Поэтому в процессе эксплуатации резервуары периодически подвергаются обследованию, по результату которого оценивается техническое состояние. Порядок проведения и периодичность описан в руководящих документах Ростехнадзора России: РД 153-112-017-97 [1], РД 08-95-95 [2].

Целью данной работы является постановка задач расчета существующих резервуаров с дефектами с определением нагрузок, учитываемых при расчете.

Для выполнения поставленной цели необходимо осуществить выполнение следующих задач:

- подробное ознакомление ГОСТ 31385-2016 [3];
- изучение методов технологических расчетов резервуаров;
- подробное ознакомление с методикой оценки прочности, устойчивости и долговечности резервуаров.

Нагрузки, действующие на резервуар

Основной эксплуатационной нагрузкой, действующей на стенку РВС, является гидростатическое давление. От этой нагрузки в стенке резервуара возникают кольцевые напряжения. В резервуарах низкого давления может образоваться избыточное давление ($p_и$), обычно около 2000 Па. Величина гидростатического давления на любом уровне определяется по формуле

$$p_x = \rho g \cdot (H - x) = \gamma(H - x),$$

где ρ - плотность нефтепродукта; g - ускорение свободного падения; H - высота резервуара; x - текущая координата с началом в месте сопряжения стенки

с днищем; γ - удельный вес нефтепродукта. Полное давление на стенку резервуара (на уровне x) с учетом избыточного давления

$$p_x = p_x + p_{u=}\rho g \cdot (H - x) + p_{\text{И}} = \gamma(H - x) + p_{\text{И}}.$$

Днище резервуара передает всю нагрузку от давления жидкости на основание, которое является ограждающей частью конструкции, за исключением краевой зоны. В краевой зоне возникает изгибающий момент. На покрытие резервуара действуют нагрузки от собственного веса конструкции, снеговая нагрузка, внешнее давление, возникающее при разрежении в газовом пространстве резервуара (вакуум), вес оборудования и теплоизоляции.

Ветровая нагрузка и нагрузка от избыточного давления действуют в направлении, противоположном основным нагрузкам вверх и поэтому учитываются при определении напряжений в настиле покрытия и в его краевой зоне. Кроме этого, следует добавить агрессивное воздействие хранимого продукта и химически активных примесей, атмосферных осадков, почвенных вод, сейсмические явления. Нагрузки вызывают в конструктивных элементах резервуара отклонения стенки от правильной формы цилиндра (вмятины, выпучины, дефекты в замыкающем монтажном стыке рулонов) и неравномерные осадки основания. При сварке появляются усадочные термические напряжения. Расчет конструктивных элементов РВС производят в соответствии со строительными нормами по проектированию стальных конструкций СП 20.13330.2016 [4] и ГОСТ 31385-2016 [3]. Нормативные и расчетные значения нагрузок и воздействий, а также учет их неблагоприятных сочетаний осуществляется с учетом климатических и сейсмических условий, а также технологических особенностей эксплуатации резервуара [3,4]. Расчетное значение нагрузки определяется как произведение ее нормативного значения на коэффициент надежности по нагрузке, соответствующей рассматриваемому предельному состоянию, принимаемому согласно [4].

Методика расчета резервуара

Для определения срока и условий безопасной эксплуатации резервуара с дефектами выполняют ряд расчетов. Перечень расчетов, выполняемых для определения срока и условий безопасной эксплуатации, а также критерии необходимости их выполнения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование расчета	Критерий необходимости выполнения расчета
Расчет прочности стенки резервуара	Выполняют по результатам каждого технического диагностирования
Расчет устойчивости стенки резервуара с учетом колец жесткости,	Выполняют по результатам каждого технического диагностирования

центральной опорной стойки и понтона	
Расчет прочности и устойчивости центральной опорной стойки	Выполняют по результатам полного технического диагностирования при наличии центральной опорной стойки
Расчет условий безопасной эксплуатации резервуара с учетом фактической геометрической формы стенки резервуара	Обнаружены предельные дефекты, а именно отклонения от установленных значений в проектной документации: - отклонения образующих стенки от вертикали; - отклонение абсолютных осадок и разностей относительных отметок окрайки (наружного контура днища)
Расчет прочности и устойчивости стационарной стальной крыши и опорного кольца с учетом неравномерной снеговой нагрузки и нагрузки от собственного веса крыши	Обнаружена коррозионная потеря металла несущих конструкций крыши и опорного кольца глубиной более 20 % от толщины, указанной в проектной документации
Расчет срока и условий безопасной эксплуатации основного металла и сварных соединений конструкций резервуара с дефектами	Обнаружены предельные дефекты металла и сварных швов стенки, крыши, днища, понтона
Расчет срока и условий безопасной эксплуатации резервуара при наличии на стенке локальных деформаций (вмятин, выпучин, угловатостей) с учетом проектных ребер и колец жесткости, опорных колец и непроектных усиливающих элементов	Выполняют по результатам технического диагностирования при обнаружении предельных локальных деформаций стенки (вмятин, выпучин, угловатостей), при наличии проектных ребер, в том числе вертикальных колец жесткости, опорных колец и непроектных усиливающих элементов
Расчет срока и условий безопасной эксплуатации резервуара при воздействии на стенку нагрузок от ПРП при наличии/отсутствии СКНР и трубопроводной обвязки	Обнаружены предельные дефекты геометрии ПРП или стенки в области ПРП

По результатам расчета определяют условия эксплуатации резервуара с дефектами до полного технического диагностирования. Все обнаруженные при техническом диагностировании дефекты классифицируют по степени опасности с разделением на три группы:

группа 1 - дефекты, при наличии которых эксплуатация не допускается;

группа 2 - дефекты, при наличии которых для каждого из них выполняется расчет срока безопасной эксплуатации конструкции резервуара с этим дефектом;

группа 3 - дефекты, подлежащие ремонту, для которых срок безопасной эксплуатации элемента не рассчитывается и не устанавливается.

По результатам частичного технического диагностирования всем дефектам (кроме дефектов стенки и дефектов, при наличии которых эксплуатация резервуара не допускается) присваивается группа 3. Дефекты типа трещины, сквозные отверстия в окрайке, при наличии которых эксплуатация резервуара не допускается, относят к группе 1. Для каждого дефекта группы 2 выполняют расчет срока безопасной эксплуатации элемента конструкции резервуара с такими дефектами.

Методы численного моделирования

Методы численного моделирования, в отличие от стандартных методов расчета на прочность и устойчивость, позволяют на этапе разработки геометрической модели создать адекватную конечно-элементную модель. В настоящее время существуют технология и расчетные методики оценки технического состояния РВС. Для обнаруженных дефектов стенки резервуара производятся расчеты двух основных типов:

1. расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) стенки резервуара для выявления дефектов геометрии;

2. расчет числа циклов нагрузки до разрушения конструкции с дефектами металла или сварных соединений, срок допустимой эксплуатации металлоконструкции.

Следует отметить, что данная технология и расчетные методики позволяют рассчитывать напряженно-деформированное состояние металлоконструкций при наличии допустимых и недопустимых дефектов. Такие расчеты могут быть выполнены с использованием специальных программных продуктов. Наиболее распространенной программой конечно-элементного анализа общего назначения является ANSYS. Суть расчета заключается в создании конечно-элементной модели, учитывающей геометрические параметры стенки резервуара, толщины листов стенки по всей поверхности, механические свойства материала листов стенки, различные эксплуатационные нагрузки с последующей оценкой точности полученных расчетов. В программном обеспечении ANSYS расчет может быть выполнен по балочной, оболочечной, трехмерной (объемной) схеме. Если

дефект (вмятина) расположен на гладкой поверхности, расчет выполняется по оболочечной схеме, если рассматривается упорный узел, то расчет проводится в объемной постановке.

Литература:

1. 153-112-017-97 «Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров».

2. РД 08-95-95 «Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов».

3. ГОСТ 31385-2016 «Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов».

4. СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» (Приказ Минстроя России от 3 декабря 2016 г. № 891/пр).

5. ГОСТ Р 58622-2019 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Методика оценки прочности, устойчивости и долговечности резервуара вертикального стального».

УДК 6.66-965.81

ВЛИЯНИЕ ИНИЦИАТОРА НА ПРОЦЕСС ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ЭТИЛЕНА ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Холоденина Д.С., Назаров А.А.
Казанский национально исследовательский технологический университет,
E-mail: darya.kholodenina.00@mail.ru

Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) - это продукт полимеризации этилена, получаемый при высоком давлении в трубчатых реакторах и реакторах с перемешивающим устройством с применением инициаторов радикального типа.

Инициатор должен хорошо растворяться в растворителях, обладать стабильностью при хранении и безопасностью при работе. В производстве наибольшее распространение получили молекулярный кислород и органические перекиси.

Инициаторы подразделяются на низкотемпературные, среднетемпературные и высокотемпературные; им соответствуют приблизительно следующие интервалы температур: 413…453К (140…180°С), 453…533К (180…260°С) и 493…553К (200…280°С). Из большого числа органических инициаторов, которые производят в промышленности, лишь немногие могут быть использованы для работы в условиях данного процесса. Так, при более низкой температуре используют перекись дилауроила, нонаноила, капроноила и др.; при повышенной - перекись бензоила, и при наиболее высокой температуре - дри-трет-бутилпероксид, трет-бутилпероксибензоат, перекись метилэтилкетона и др.

Количество подаваемого инициатора в реактор обычно мало и для обеспечения равномерного распределения его подают в реактор в виде раствора в нейтральном растворителе. Растворителями могут быть очищенные керосин или нефтяное масло, или другие инертные углеводороды.

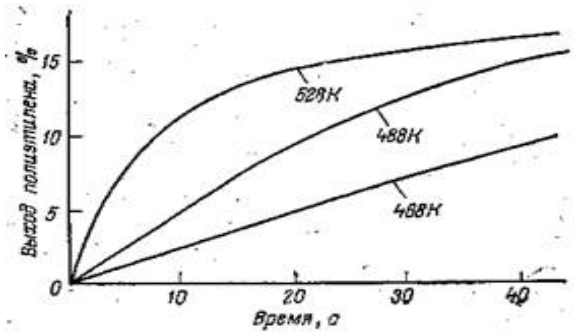


Рис. 1. Зависимость выхода полиэтилена от времени пребывания в зоне реакции

Практически показано, что выход полимера обратно пропорционален скорости подачи этилена при температурах до 488К (пропорционален времени пребывания) даже в том случае, если инициатор разлагается почти полностью в зоне реакции (рис.1).

Весьма распространенным инициатором полимеризации этилена при высоком давлении является молекулярный кислород, который имеет ряд преимуществ перед пероксидным, основными из которых являются:

1) доступность и дешевизна кислорода;
2) удобство введения его в реакционную смесь без применения специальных устройств (например, инициаторных насосов высокого давления), что упрощает и удешевляет производство;
3) отсутствие дополнительных компонентов (растворители для пероксидов), что позволяет получать полиэтилен более высокой чистоты.

Однако применении кислорода возможно только при температуре выше 170°С и давлении выше 86 МПа, ниже этих значений полимеризация не идет. Невозможность применения кислорода для инициирования в автоклавных реакторах объясняется трудностями регулирования температуры в реакторе из-за запаздывания при дозировании кислорода, так как он начинает действовать после некоторого определенного времени, называемого индукционным периодом реакции. Пуск автоклавного реактора затруднен тем, что требует подачи избыточного количества инициатора для предотвращения падения температуры при пуске.

Анализируя достоинства и недостатки инициаторов можно сказать, что оба инициатора подходят для производства полиэтилена, и доля их использования примерно одинаковая на заводах, однако предпочтения больше отдают молекулярному кислороду при работе в трубчатом реакторе, а органическим перекисям при работе в автоклавных реакторах.

Литература:

1. Первов Д.Н. Экспериментальная установка исследования процессов дегидрирования углеводородного сырья под вакуумом / Д.Н. Первов, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Технологического университета. - 2015. - Т. 18. № 19. - С. 64-66.

2. Хакимуллин Р.Р. Получение изопрена путем дегидрирования изопентана и изоамилена / Р.Р. Хакимуллин, А.А. Назаров, С.А. Вилохин // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15 № 16. – С. 154-156.

3. Конаков А.С. Моделирование гидродинамики и нагрева реакционной смеси в экспериментальной установке вакуумного дегидрирования /

А.С. Конаков, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17 № 7. – С. 224-225.

4. Назаров А.А. Вакуумное дегидрирование углеводородного сырья в химической и нефтехимической промышленности / А.А. Назаров, В.П. Матвеев, С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 4. - С. 107-110.

5. Фаттахаев Р.М. Методы моделирования гидродинамики / Р.М. Фаттахаев, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17 № 11. – С. 106 - 107.

6. Назаров А.А. Математическая модель газодинамических и теплообменных процессов вакуумного дегидрирования углеводородов / А.А. Назаров, С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 10. - С. 153-156.

7. Назаров А.А. Газодинамические и теплообменные процессы в установке вакуумного дегидрирования углеводородов / А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Теоретические основы химической технологии. - 2019. Т. 53. № 4. - С. 416–430.

8. Назаров А.А. Численное исследование газодинамических и теплообменных процессов и апробация математической модели путем сравнения с экспериментальными данными / А.А. Назаров, С.И. Поникаров, К.А. Петлин // Вестник Технологического университета. - 2018. Т. 21. № 11. - С. 157-161.

9. Магарил Я.Ф. Аэродинамические газовые затворы для факельных установок / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, Я.С. Шпанер, Р.Г. Гимранов, В.И. Панченко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. - № 5. – С. 14-15.

10. Panchenko V.I., Magaril Y.F., Nazarov A.A., Shpaner Y.S. Gimranov R.G., Aerodynamic gas gates for flare units. Chemical and Petroleum Engineering, 2009. – Vol. 45, № 5 - 6. – P. 278 - 280.

11. Ахмадиев А.Л. Математическая модель нагрева реакционной смеси в процессе вакуумного дегидрирования углеводородов. / А.Л. Ахмадиев, В.П. Матвеев, А.А. Назаров, А.И. Гиниятулин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. - № 10. – С. 22-23.

12. Akhmadiev A.L. A mathematical model of heating of a reaction mixture in the process of vacuum dehydrogenation of hydrocarbons / A.L. Akhmadiev, V.P. Matveev, A.A. Nazarov, A.I. Giniyatulin // Chemical and Petroleum engineering. - 2013. - Vol. 48, Nos. 9 - 10. - P. 618 - 620.

13. Магарил Я.Ф. Факельные установки. Специальные оголовки факельных установок / Я.Ф. Магарил, А.А. Назаров, Я.С. Шпанер, Р.Г. Гимранов// Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. - № 1. – С. 17.

14. Magaril Ya.F., Nazarov A.A., Shpaner Ya.S., Gimranov R.G. Special torch heads, Chemical and Petroleum Engineering, 2009. – Vol. 45, № 1 - 2. – P. 13 - 14.

15. Зарипов Р.Р. Катализаторы, применяемые при каталитическом дегидрировании парафиновых, олефиновых и алкилароматических углеводородов / Р.Р. Зарипов, А.А. Назаров, С.И. Поникаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16 № 10. – С. 67-70.

УДК 613.6

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ

Цыганкова М.Н., Лукашевич О.Д.
Томский государственный архитектурно строительный университет,
E-mail: m312@yandex.ru

В 2022 году тема проведения оценки профессиональных рисков выходит на первый план. Безусловно это связано в первую очередь с внесением изменений в законодательные акты Российской Федерации и в первую очередь в Трудовой кодекс. При обеспечении функционирования системы управления охраной труда работодателем должны проводиться системные мероприятия по управлению профессиональными рисками на рабочих местах, связанные с выявлением опасностей, оценкой и снижением уровней профессиональных рисков [1].

Профессиональный риск - вероятность причинения вреда здоровью в результате воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов при исполнении работником обязанностей по трудовому договору или в иных случаях, установленных настоящим Кодексом, другими федеральными законами [1].

Таким образом у хозяйствующего субъекта появляется новая обязанность в рамках системы управления охраной труда, при этом надзорный орган с момента вступления в силу требований, пристально контролирует наличие проведения оценки профессиональных рисков.

Рекомендации по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков, в соответствии с трудовым кодексом РФ, утверждаются федеральным органом исполнительной власти. На данный момент это порядка одиннадцати документов, часть из которых уже утратила силу [2].

Проведя анализ методов оценки профессиональных рисков, все методы можно классифицировать по двум основным группам:

– качественные, например, с помощью матрицы [5];

– количественные, например метод комплексной оценки риска, оценка ретроспективного профессионального риска [5], метод ФайнКинни, метод Элмери.

На практике обычно применяют качественные методы, данные методы позволяют сгруппировать риски по уровням (низкие, средние, высокие либо приемлемые, неприемлемые), являются более простыми при использовании.

В основе количественных методов лежит применение математических знаний – алгоритмов, функций, теории вероятности, что требует дополнительной квалификации у специалиста, проводящего оценку риска. Несмотря на это, количественные методы обладают значительными преимуществами - возможностью сопоставления рисков друг с другом, осуществления повторных расчетов, объективностью полученных результатов.

Рассмотрим методы оценки профессионального риска, представленные в нормативно-технической документации.

В соответствии с ГОСТ Р 12.0.010-2009 [5] риск R определяют путем суммирования произведений возможных дискретных значений ущерба здоровью и жизни работника Ui на вероятности их наступления Pi по формуле (1):

$$R = \sum_{i=1}^{N} P_i U_i \quad , (1)$$

где N – количество дискретных значений возможных ущербов (одного типа, одной размерности) или объединяющих их групп.

Характеристики случайных чисел, в том числе значения вероятности и ущерба, как правило, определяют по репрезентативной ограниченной по 30 объему и времени выборке. В этом случае формула (1) приобретает следующий вид формулы (2):

$$R^* = \sum_{i=1}^{N} P_i^* U_i \quad , (2)$$

где R* – статистическая оценка риска; Pi * – частота наступления Ui * ущерба здоровью и жизни работника.

Оценка профессионального риска проводится с применением формул (1)–(2) в представленной ниже последовательности:

1. Идентифицируют опасности, а также возможные их проявления.

2. Для каждой идентифицированной опасности определяют возможный ущерб, который численно выражается в виде весовых коэффициентов в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1 – Пример трехуровневой шкалы тяжести ущерба

Тяжесть ущерба	Весовой коэффициент	Вербальное описание ущерба
Малый	5	Пострадавшему работнику не требуется оказания медицинской помощи; в худшем случае 3-дневное отсутствие на работе
Средний	10	Пострадавшего работника доставляют в организацию здравоохранения или требуется ее посещение; отсутствие на работе до 30 дней; развитие хронического заболевания
Большой	15	Несчастный случай вызывает серьезное (неизлечимое) повреждение здоровья; требуется лечение в стационаре; отсутствие на работе более 30 дней; стойкая утрата трудоспособности или смерть

3. Определяют качественные значения вероятностей наступления ущербов и исхода, не связанного с наступлением ущерба, и соответствующие им весовые коэффициенты путем логического анализа дерева событий

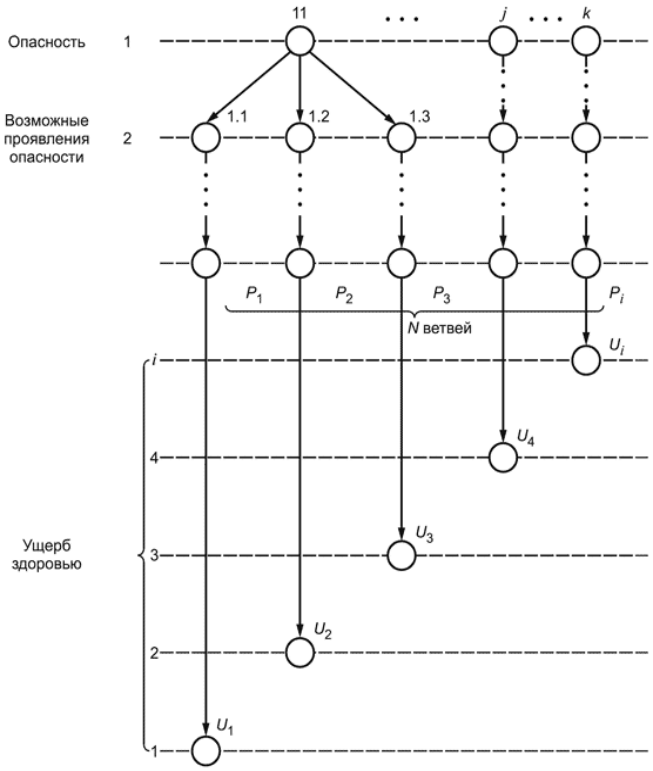


Рисунок Б.1 - Дерево событий. Схема расчета вероятности наступления ущерба

Так же широко используется вербальное описание вероятностей (частот) в соответствии с таблицей 2

Таблица 2 - Пример трехуровневой шкалы вероятностей (частот)

Вероятность	Весовой коэффициент	Вербальное описание вероятностей (частот) проявления опасностей и наступления ущерба
Низкая	1	Опасность или ее проявления, которые могут вызвать определенный ущерб, не должны возникнуть за все время профессиональной деятельности работника
Средняя	3	Опасность или ее проявления, которые могут вызвать определенный ущерб, возникают лишь в определенные периоды профессиональной деятельности работника
Высокая	7	Опасность или ее проявления, которые могут вызвать определенный ущерб, возникают постоянно в течение всей профессиональной деятельности работника

Численные значения указанных вероятностей (частот) наступления ущерба, вызванного проявлением j-й опасности, определяют путем деления i-го весового коэффициента на сумму весовых коэффициентов, присвоенных k идентифицированным опасностям и исходу, не связанному с наступлением ущерба; рассчитывают по формуле (3):

$$P_j = \frac{A_i}{\sum_{j=1}^{k+1} A_j}. \quad (3)$$

4. Путем перемножения численных значений вероятностей (частот) наступления ущербов на соответствующие весовые коэффициенты ущербов определяют риски по каждой из идентифицированных опасностей.

5. Путем сложения рисков для каждой идентифицированной опасности на рабочем месте определяют общий риск.

6. Определяют значимость риска для рабочей зоны в соответствии со шкалой (таблица 3) и принимают решение по дальнейшим действиям в зависимости от уровня риска.

Таблица 3 - Пример трехуровневой шкалы оценки значимости рисков

Интервал значений риска	$0 < R \leq 5$	$5 < R \leq 10$	$10 < R \leq 15$
Значимость риска	Низкий	Умеренный	Высокий

Верхнее значение шкалы оценки значимости рисков должно соответствовать значению наибольшего весового коэффициента ущерба.

В общем случае при оценке риска на рабочем месте может быть использована N-уровневая шкала ущерба, каждому уровню которой путем экспертной оценки ставят в соответствие определенный весовой коэффициент. При определении значения тяжести событий устанавливаются наихудшие возможные последствия.

Таким образом, не представляется возможным говорить о полном отсутствии методик для проведения оценки рисков. На данный момент разработаны и применяются различными хозяйствующими субъектами множество подходов к проведению оценки профессиональных рисков. Однако, учитывая разницу в уровнях квалификации специалистов по охране труда и размеров хозяйствующих субъектов, в целях упрощения проведения оценки профессиональных рисков ожидаем от федеральных органов исполнительной власти разработку единых методологических подходов к проведению оценки профессиональных рисков.

Литература:

1. Трудовой кодекс Российской Федерации (с изменениями на 25 февраля 2022 года) (редакция, действующая с 1 марта 2022 года), Федеральный закон от 30 декабря 2001 197-ФЗ
2. https://eisot.rosmintrud.ru/otsenka-i-upravlenie-professionalnymi-riskami
3. ГОСТ Р 12.3.050-2017 от 1.09.2017. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Строительство. Работы на высоте. Правила безопасности.
4. Малышев Д.В. Метод комплексной оценки профессионального риска // Риск профессиональный. Проблемы анализа риска. – 2008. – № 3. – С. 40-59.
5. ГОСТ Р 12.0.010-2009 от 01.01.2011. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Системы управления охраной труда. Определение опасностей и оценка рисков. 86

УДК 544.275.2

ВЛИЯНИЕ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСТВОРОВ НА ИХ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ИДЕАЛЬНОСТИ

Шакиров Н.И., Чистов Ю.С.
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
E-mail: office@kstu.ru

Идеальные растворы, которые подчиняются закону Рауля, в природе встречаются крайне редко, к их числу можно отнести лишь небольшое число летучих смесей. Реальные же растворы откланяются от идеальности положительно или (и) отрицательно. В данной статье описываются выявленные влияния физико-химических свойств и параметров растворов на эти отклонения. Также приводятся взаимосвязи между отклонениями и межмолекулярными взаимодействиями.

Насыщенный пар – пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью.

Если пар постепенно сжимают при постоянной температуре, а превращение его в жидкость не происходит, то такой пар называют насыщенным.

Давление насыщенного пара – давление $p_{н.п.}$ пара, при котором жидкость находится в равновесии со своим паром (рис. 1).

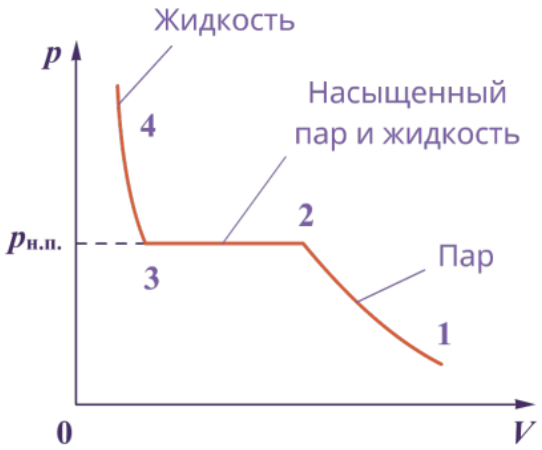


Рис. 1. График зависимости давления от объема двухфазной системы «жидкость – пар»

Так как давление насыщенного пара не зависит от объёма, то, следовательно, оно зависит только от температуры.

Однако эта зависимость, найденная экспериментально, не является прямо пропорциональной, как у идеального газа при постоянном объёме. С увеличением температуры давление реального насыщенного пара [1] растёт быстрее, чем давление идеального газа (рис. 2).

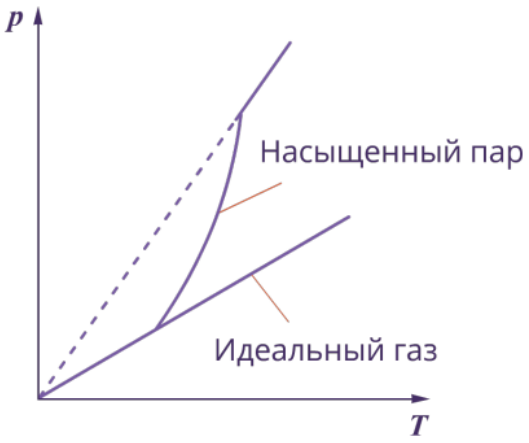


Рис. 2. График зависимости давления от температуры двухфазной системы «жидкость – пар»

Первый закон Рауля связывает давление насыщенного пара над раствором с его составом; он формулируется следующим образом:

Парциальное давление насыщенного пара компонента раствора прямо пропорционально его мольной доле в растворе, причём коэффициент пропорциональности равен давлению насыщенного пара над чистым компонентом:

$P_i = P_i^0 X_i$, где P_i^0 - давление насыщенного пара над чистым компонентом, X_i- мольная доля компонента.

Для бинарного раствора, состоящего из компонентов А и В (компонент А считаем растворителем), удобнее использовать другую формулировку:

Относительное понижение парциального давления пара растворителя над раствором не зависит от природы растворённого вещества и равно его мольной доле в растворе.



Рис. 3. График зависимости ДНП раствора от содержания компонента для идеального раствора

Из рис. 3 видим, что ДНП идеального раствора, по мере изменения концентрации компонента, изменяется плавно и без скачков.

Реальные растворы не подчиняются закону Рауля во всем диапазоне составов и проявляют либо положительные, либо отрицательные отклонения от него.

Если в растворе энергии взаимодействия между однородными молекулами больше, чем между разнородными, то образование раствора обычно сопровождается поглощением тепла и увеличением объема. Это облегчает процесс испарения, и экспериментально определенные значения давления пара оказываются выше рассчитанных значений по закону Рауля – раствор проявляет положительные отклонения от закона Рауля. В этом случае температура кипения в этих системах ниже, чем в идеальных. К их числу относятся смеси этиловый эфир – этанол, ацетон – сероуглерод, бензол – ацетон и др.

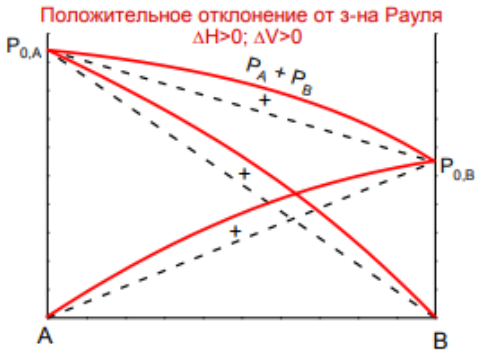


Рис. 4. График зависимости ДНП раствора от содержания компонента для реального раствора с положительными отклонениями от закона Рауля

Из этого графика видим, что линии положительных отклонений уходят от прямой идеального раствора вверх, в сторону увеличения давления.

Если в растворе энергии взаимодействия между однородными молекулами меньше, чем между разнородными, то образование раствора обычно сопровождается выделением тепла и уменьшением объема. Это затрудняет процесс испарения, и экспериментально определенные значения давления пара оказываются ниже рассчитанных значений по закону Рауля – раствор проявляет отрицательные отклонения от закона Рауля. Температура кипения в этих системах выше, чем в идеальных. Такие растворы встречаются сравнительно редко. К их числу относятся, например, смеси вода – серная кислота, вода – азотная кислота, хлороформ – бензол и др.

Из графика выше видим, что линии отрицательных отклонений уходят от прямой идеального раствора вниз, в сторону уменьшения давления.

У многих изученных смесей положительные или отрицательные отклонения от закона Рауля настолько велики, что на кривой зависимости давления насыщенного пара от состава раствора появляется экстремум или минимум соответственно. Это явление нашло отражение во Втором законе Гиббса – Коновалова: В точках экстремумов давлений пара (или температур кипения) составы пара [2] и сосуществующей с ним в равновесии жидкости совпадают.



Рис. 5. График зависимости ДНП раствора от содержания компонента для реального раствора с отрицательными отклонениями от закона Рауля

В результате сбора данных по давлению насыщенных паров водных растворов, и рассчитанных мной энергий разрыва связи для данных растворов, я вывел следующие зависимости:

1) $\Delta p=\sqrt{100\Delta Hсв}+200\Delta Hсв$ – для водных растворов KI, KBr, KF, RbCl, $LiNO_3$, LiCl;

2) $\Delta p=\sqrt{1000\Delta Hсв}+400\Delta Hсв$ – для водных растворов $BaBr_2$, NaBr, NaI;

3) $\Delta p=200\sqrt{\Delta Hсв}$ – для водных растворов NH_3, LiBr, LiI;

4) $\Delta p=315\sqrt{\Delta Hсв}$ – для водных растворов HCl; HNO_3,

где Δp – отклонение ДНП от идеальности, $\Delta Hсв$ – энергия разрыва связи.

Не удалось связать данные параметры лишь одной зависимостью. Исходя из литературных источников, предполагаю, что знак и величина отклонения раствора от закона Рауля (от идеальности) зависят от природы растворителя и растворенного вещества и определяются не только различием в энергиях взаимодействия однородных и разнородных молекул, но и соотношением размеров молекул обоих компонентов. Дополнительными причинами отклонения могут быть дипольные взаимодействия частиц, образование водородных связей между молекулами, процессы ассоциации и диссоциации.

Литература:

1. А. Н. Несмеянов. Давление пара химических элементов. – Академия наук СССР, Москва, 1961. – 401 с.

2. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ для иностранных студентов-бакалавров направления подготовки 6.051301 – «Химическая технология и инженерия». Дисциплина «Физическая химия». Разделы: «Растворы», «электрохимия», «Поверхностные явления», «Адсорбция». Часть – 2. / Сост.: Д.В. Гиренко, Д.А. Сухомлин. – Днепропетровск: ГВУЗ УГХТУ, 2017. – 83 с.

УДК 620.97 661.566

ПОЛЕЗНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЭР В ПРОИЗВОДСТВЕ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ

Шелгинский Е.А., Яворовский Ю.В.
Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт,
E-mail: egornumberone@gmail.com

Производство слабоконцентрированной азотной кислоты (58-60% HNO_3) является одним из самых крупнотоннажных в химической промышленности. Слабая азотная кислота является продуктом, на основе которого производятся нитратные азотные удобрения, комбинированные удобрения.

В Российской Федерации слабая азотная кислота производится на двух видах агрегатов: УКЛ-7 и АК-72. Проектные производственные мощности агрегатов соответственно составляют 135 тысяч тонн и 380 тысяч тонн моногидрата азотной кислоты в год. Исходными веществами в производстве являются: аммиак; воздух; вода; природный газ (неселективная очистка).

В данной работе рассматривается производственная схема УКЛ-7. В качестве источника вторичных энергетических ресурсов взята теплота сжатого воздуха между двумя ступенями компрессора при подготовке воздуха для производства и холод при испарении и нагреве аммиака. Элементы подготовки воздуха и аммиака в производстве показаны на рисунках 1, 2.

Атмосферный воздух после фильтра поступает в первую ступень компрессора, где сжимается до давления 0.3 МПа и его температура повышается до 174 °С [1]. Затем воздух охлаждается в теплообменнике «3» водой из водооборотного цикла. Теплота сжатия воздуха выбрасывается в окружающую среду через градирню. Охладившись до 42 °С, поступает во вторую ступень компрессора, где сжимается до давления 0.716 МПа и нагревается до 135 °С.

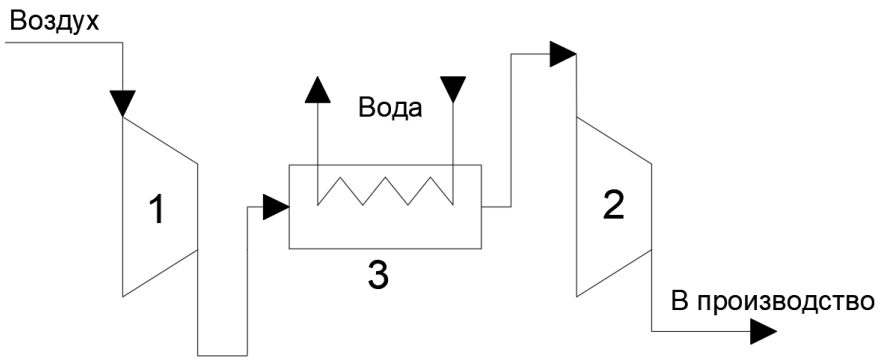


Рис.1 Сжатие воздуха до давления 0.716 МПа в агрегате УКЛ-7.
1 – первая ступень компрессора; 2 – вторая ступень компрессора; 3 – охладитель воздуха между ступенями

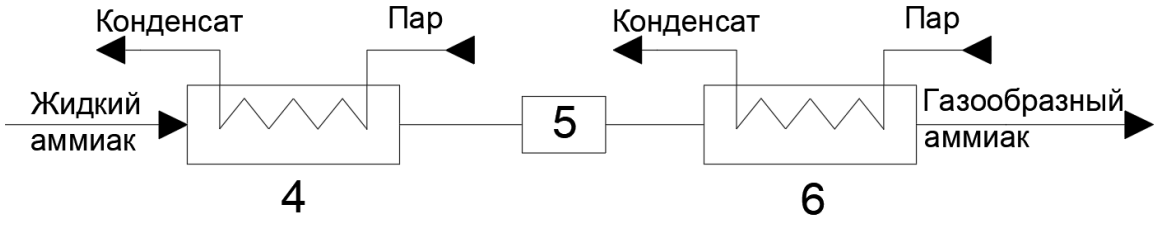


Рис.2. Испарение и подогрев аммиака в агрегате УКЛ-7.
4 – испаритель аммиака; 5 – фильтр аммиака; 6 – подогреватель аммиака

Жидкий аммиак под давлением 12 бар и температурой 20-25 °С поступает в испаритель «4», где испаряется паром, температурой 230 °С и давлением 1.4 МПа. После испарителя аммиак поступает в фильтр «5», потом в подогреватель «6», где нагревается до температуры 150 °С.

Разработанная схема по полезному использованию ВЭР в производстве представлена на рисунке 3.

Воздух после первой ступени компрессора поступает в испаритель термосифонного теплообменника (ТТ) «3», разработанного в [2]. Циркулирующая вода в термосифонном теплообменнике в испарителе парообразуется при температуре 80 °С и пар поступает в конденсатор «5», конденсируется, нагревая питательную воду перед деаэратором от 30 °С до 77 °С, тем самым происходит экономия пара при нагреве питательной воды перед деаэратором. Образовавшийся конденсат снова направляется в испаритель ТТ. Воздух после испарителя охлаждается до 134 °С. В теплообменнике «4», совмещенным с испарителем термосифонного теплообменника, воздух охлаждается до температуры 42 °С, нагревая воду от 35 °С до 125 °С. Расход воды составляет 6.4 кг/с. Вода после теплообменника «4» направляется в испаритель цикла детандер-генераторного агрегата (ДГА) «6», охлаждаясь при этом до 48 °С. Затем вода направляется в подогреватель «12», где подогревает газообразный аммиак до 43 °С, тем самым происходит экономия пара в подогревателе «13». После подогревателя «12» вода температурой 43 °С поступает в градирню, охлаждаясь до 35 °С и снова направляется с теплообменник «4».

В испарителе ДГА «6» испаряется хладагент R600a при давлении 9 бар и температуре 65 °С. Пар поступает в турбодетандер, давление падает до 5 бар. Работа, полученная при вращении турбодетандера, расходуется на привод электрогенератора «8» где вырабатывается электроэнергия в количестве 35-37 кВт. Расширенный хладагент поступает в конденсатор «9», где конденсируется при температуре 35-40 °С. Тепло хладагента отбирается испарением аммиака. Конденсатор ДГА «9» является испарителем аммиака. Температура газообразного аммиака на выходе из подогревателя «13» составляет 150 °С.

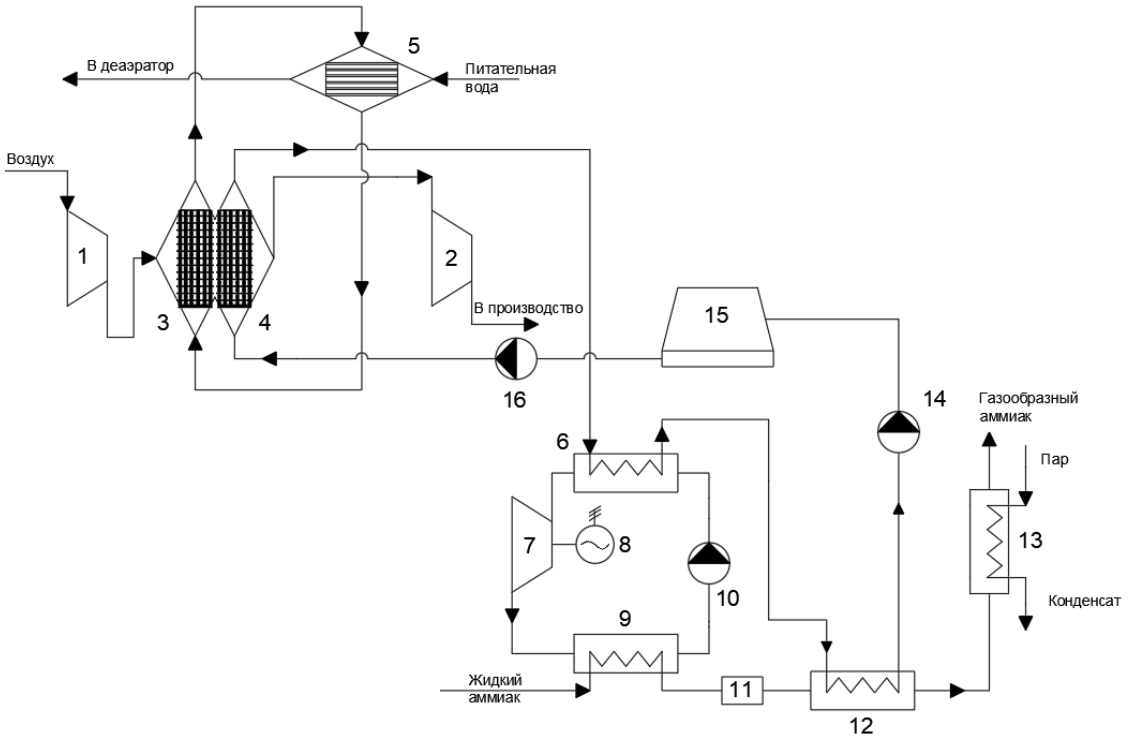


Рис.3 Разработанная схема использования ВЭР.
1 – первая ступень компрессора; 2 – вторая ступень компрессора; 3 – испаритель термосифонного теплообменника; 4 – теплообменник подогрева воды; 5 – конденсатор термосифонного теплообменника; 6 – испаритель цикла ДГА; 7 – турбодетандер; 8 – электрогенератор ДГА; 9 – конденсатор газа в цикле ДГА; 10 – насос газа в цикле ДГА; 11 – фильтр аммиака; 12 – подогреватель аммиака; 13 – паровой подогреватель аммиака; 14 – насос контура воды; 15 – градирня; 16 – насос контура воды.

Разработанная схема позволяет сэкономить пар в производстве в количестве 17 850 т/год. Выработать дополнительно электроэнергию в ДГА в количестве 293 000 кВт · ч/год. С учетом затрат электроэнергии на насосы контуров воды и ДГА полезно выработанная электроэнергия в ДГА составляет 158 400 кВт · ч/год.

Литература:

1. Атрощенко В.И., Каргин С.И. Технология азотной кислоты. – М.:Химия, 1970. – 496 с.

2. Яворовский Ю.В., Шелгинский Е.А. Анализ эффективности использования энергоносителей в производстве азотной кислоты // РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцать шестая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (12-13 марта 2020 г., Москва): Тез. докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга’’», 2020. – 1156 с. С. 684.

УДК 632.952

РАЗРАБОТКА ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО ФУНГИЦИДНОГО ПРЕПАРАТА НА ОСНОВЕ ТЕБУКОНАЗОЛА И ТИАБЕНДАЗОЛА

Ядыкова М.Ю., Нефедьева Е.Э.
Волгоградский государственный технический университет,
E-mail: rector@vstu.ru

От вредителей, болезней и сорняков ежегодно теряется от 20 до 40% потенциального урожая зерновых культур. Наиболее встречаемыми болезнями являются: снежная плесень, корневые гнили (офиоболезная, фузариозная, гельминтоспориозная), фузариоз колоса, ржавчина (бурая, линейная, желтая). Для борьбы применяется система защиты сельскохозяйственных культур от вредных организмов, отвечающая современным требованиям и обеспечивающая предотвращения потерь урожая при минимальных трудовых издержках и предельно ограниченных негативных последствиях.

В настоящее время наиболее востребованным методом защиты растений является химический метод. К данному методу относится использование фунгицидов, которые обеспечивают высокую биологическую, хозяйственную и экономическую эффективность. Однако со временем стало проявляться также отрицательное химическое действие фунгицидов, проявляемое в возможности отравления людей и животных, разрушение биоценозов и появление устойчивых популяций вредителей.

Определение "фунгицид" является производным от корней двух слов: "fung" - гриб, "cide" - сокращать, уничтожать. Смысловой перевод термина - средства, уничтожающие грибы. Тем не менее, практика защиты растений расширила данное понятие, включив в него не только препараты, токсичные для грибов, но и вещества, эффективные против иных инфекционных болезней сельскохозяйственных культур [2].

По характеру распределения в растениях выделяют контактные и системные фунгициды.

Контактные фунгициды действуя на поверхности растения подавляют развитие возбудителей болезней на начальных стадиях, во время прорастания спор или конидий [3].

Контактные действующие вещества, прежде всего, угнетают репродуктивные органы патогенов и предотвращают инфицирование с поверхности. В основном, контактные фунгициды действуют менее длительно, нежели системные, но некоторые имеют способность "продлевать" свой эффект, растворяясь в восковом слое на поверхности листьев и стеблей. При применении контактных фунгицидов очень большое значение имеет равномерность покрытия растений

препаратами, т.к. степень защиты считается эквивалентной площади покрытия, выраженной в процентах.

В сравнении с системными, у контактных фунгицидов имеются свои преимущества и недостатки. Например, резистентность микроорганизмов по отношению к контактным средствам развивается в 3-8 раз медленнее, чем к проникающим веществам.

Системные фунгициды используются для внесения в почву и обработки вегетирующих растений на разных стадиях развития. Часто их применяют в смеси с контактными фунгицидами для уничтожения внутренней и наружной семенной инфекции бактериального или грибкового происхождения.

Фунгициды, усваивающиеся растениями, считаются нетоксичными, но при несоблюдении норм расхода или при воздействии негативных природных факторов может произойти повреждение или гибель культуры.

Большим недостатком системных препаратов является быстро формирующаяся устойчивость патогенов. В связи с этим, системные фунгициды предпочтительно использовать в баковой смеси с другими препаратами.

Тебуконазол[(RS)-1р-хлорфенил-4,4-диметил-3-(1Н-1,2,4-триазол-1-ил-метил)пентан-3-ил] – пестицид, эффективный системный фунгицид для обработки семян зерновых культур в борьбе с фитопатогенами, передающимися с семенами.

Тебуконазол представляет собой бесцветные кристаллы. Хорошо растворяется в органических растворителях, плохо в воде. Не гидролизуется при pH от 4 до 9. Период полураспада при 20 °C более года. [4]

Системный фунгицид широкого спектра действия. Обладает защитными, лечебными и искореняющими свойствами.[5] Быстро проникает в растение и равномерно распределяется в нем.[6]

Тебуконазол имеет специфичный эффект против всех видов ржавчины зерновых культур. При опрыскивании растений в течение трех недель защищает их от болезней. На мучнистую росу действует слабее, чем другие представители группы триазолов, поэтому на его основе выпускают комбинированные препараты с добавлением триадимефона.

Подавляет биосинтез эргостерина в мембранах клеток фитопатогенов, ингибируя деметилирование в положении С-14. Образующиеся Д5-стерины также воздействуют на метаболизм, и этим тебуконазол отличается от других триазолов.[4]

Тиабендазол [2-(4-тиазолил)-1Н-бензимидазол] – действующее вещество пестицидов, высокоэффективный фунгицид класса бензимидазолов, протравитель системного действия.

Контактно-системный фунгицид защитного и лечебного действия. Обладает

широким спектром фунгицидного действия, особенно эффективен против кагатных гнилей, болезней хранения.[7]

Тиабендазол защищает овощи и плоды от болезней, образуя на их поверхности долго сохраняющийся защитный слой, действие сохраняется до шести месяцев.[7]

За счет своих метаболитов тиабендазол может ингибировать биосинтез нуклеиновых кислот ДНК и РНК, а также процессы дыхания.[4]

Вещество, взаимодействуя с белком микротрубочек, подавляет важную фазу деления ядра – формирование «веретена», или протоплазматических нитей.

В данной работе исследованы активные вещества фунгицидных препаратов тебуконазола и тиабендазола, предназначенных для обработки семян зерновых культур от поражения патогенными грибами. В ходе лабораторных испытаний установлена их высокая фитотоксичность и ростостимулирующие свойства.

Проведя сравнительный анализ действия фунгицидов на рост растения, эффективность и действие на организм человека, было выявлено, что в чистом виде фунгициды могут подавлять рост растения на разных его стадиях. Данный эффект вызван выработкой фито токсинов грибов. Такая реакция растения ведет к снижению эффективности фунгицида в борьбе с болезнями, а также к значительному снижению урожая. Для нейтрализации этого эффекта и повышению роста растений предлагается разработать и использовать препарат на основе фунгицидов с добавлением к ним различных веществ.

Задачей является разработка нового состава фунгицидного препарата на основе существующих фунгицидов с добавлением вспомогательных веществ, что приведет к повышению эффективности в борьбе с болезнями растений, а также к повышению роста и урожайности культур.

В ходе эксперимента были исследованы тебуконазол и тиабендазол, а также салициловая кислота, как ростостимулирующее вещество в составе фунгицидов, предназначенные для обработки семян зерновых культур от поражения патогенными грибами.

Фитотоксичность веществ определяли по стандартной методике биотестирования растворенных токсических веществ по росту отрезков колеоптилей пшеницы. Семена пшеницы были заражены возбудителями корневых гнилей – Fusarium spp.

Заранее обработанные колеоптили, вырезанные по зоне растяжения, помещались в растворы активных веществ фунгицидов на 2%-ной сахарозе. Повторность эксперимента – трехкратная. Раствор с колеоптилями помещались в термостат при температуре +25°С - +26°С на 2-3 дня. Рост колеоптилей на чистой 2%-ной сахарозе принимается за контроль (100%), реакция же на испытуемые растворы подсчитывается относительно контроля.

Согласно полученным результатам лабораторных испытаний выявлено, что Тебуконазол и Тиабендазол не усиливают токсические свойства грибов, а вещества не влияют на синтез фитотоксинов. Наиболее подходящим соотношением тебуконазола к тиабендазолу является 3:4.

Исходя из экспериментальных данных, был составлен состав нового фунгицидного препарата с улучшенными свойствами более безопасного с экологической точки зрения.

Таблица 1

Компонентный состав фунгицидного препарата

№	Компоненты	Состав в г/л
1	Тебуконазол	30
2	Тиабендазол	40
3	Краситель жидкий (Родамин Б 30% водный р-р)	50
4	Пента 465	1
5	Сивушное масло	100
6	Неолон	140
7	Катамин АБ	35

Приводимый фунгицидный препарат может использоваться также в сочетании с другими фунгиидами, инсектицидами, гербицидами, регуляторами роста растений или удобрениями в зависимости от конкретной необходимости.

Литература:

1. Сергеева А.В. Влияние фунгицидных обработок на урожайность озимой пшеницы/ А.В. Сергеева // Земляробства і ахова зфслін. 2002. - №6. - С. 21-22.

2. Зинченко В.А. Химическая защита растений. Под ред. Г.С. Груздева - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Агропромиздат, 1987. - 415 с.

3. Попов С.Я. Основы химической защиты растений. Попов С.Я., Дорожкина Л.А., Калинин В.А./ Под ред. профессора С.Я. Попова. - М.: Арт-Лион, 2003. - 208 с.

4. Голышин Н. М. Фунгициды. - М.: Колос, 1993. -319 с.: ил.

5. Белов Д.А. Химические методы и средства защиты растений в лесном хозяйстве и озеленении: Учебное пособие для студентов. –М.: МГУЛ, 2003. – 128 с

6. Андреева Е.И., Зинченко В.А. Системные фунгициды – ингибиторы биосинтеза эргостерина. Журнал «АгроXXI», №4, 2002, С.14-15

7. Зинченко В.А. Химическая защита растений: средства, технология и экологическая безопасность. – М.: «Колос», 2012. – 127 с.

УДК 504

ОБРАЩЕНИЕ С РЕЗИНО-ТЕХНИЧЕСКИМИ ОТХОДАМИ: ПРОБЛЕМЫ, СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ

Яппарова О.Р., Соколова Э.И.
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,
E-mail: www.magtu.ru

На сегодняшний день проблема обращения с отходами является одной из самых важных экологических проблем. До определенного времени природа сама справлялась с переработкой отходов, но в результате технического прогресса появились новые материалы, разложение или переработка, которых естественным путем длится не одну сотню лет.

На территории России накоплено и продолжает накапливаться огромное количество отходов производства и потребления, которые оказывают негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека. На рост количества отходов повлияло и стремительное развитие промышленности. Важнейшей проблемой промышленных предприятий является организация системы экологически безопасного обращения с отходами производства и потребления. К этому их подталкивает и необходимость исполнения требований законодательства Российской Федерации в области охраны окружающей среды, и сокращение экономических издержек при обращении с отходами.

В современном мире отходы и мусор можно рассматривать, как сырье - их можно перерабатывать и повторно использовать. Одним из таких видов отходов являются резино-технические отходы. Данный вид отхода самый распространенный как в повседневной жизни, так и в рамках промышленных предприятий.

Выброшенные на свалки, либо закопанные шины в естественных условиях разлагаются не менее 100 лет. Контакт шин с дождевыми осадками и грунтовыми водами сопровождается вымыванием ряда токсичных органических соединений: дифениламина, дибутилфталата, фенантрена и так далее. Все эти соединения попадают в почву. А резина, являющаяся высокомолекулярным материалом, относится к термореактивным полимерам, которые в отличие от термопластичных не могут перерабатываться.

При сгорании же шин образуются различные химические соединения, которые, попадая в атмосферный воздух, становятся источником повышенной опасности для человека: это бифенил, антрацен, флуорентан, пирен, бенз(а)пирен. Два из перечисленных соединения – бифенил и бенз(а)пирен относятся к сильнейшим канцерогенам.

Как правило, источником образования отхода «Шины пневматические автомобильные отработанные» является эксплуатация транспортных средств. Отход

образуется при техническом обслуживании, связанным с заменой отработанных шин на новые. В соответствии с Приказом Росприроднадзора от 22.05.2017 г. №242 «Об утверждении федерального классификационного каталога отходов» отход «Шины пневматические автомобильные отработанные» [1]:

- имеет код 9 21 110 01 50 4;
- относится к отходам IV класса опасности – малоопасные отходы.

Агрегатное состояние отхода – готовое изделие, потерявшее потребительские свойства. Опасные свойства – экотоксичность.

Технология утилизации автомобильных шин используется в развитых странах Европы еще с 70-х годов XX века. В России же, этот процесс начал применяться с 2000 года в связи с появлением автомобилей у большего количества населения страны [3].

Современные шины представляют собой источник ценных полимеров и включают в себя:

1) каучук – синтетический или натуральный, различные смолы и технический углерод, которые вкупе образуют сложноструктурированную резиновую оболочку;

2) металлические элементы, такие как бортовые кольца и проволока армирования;

3) текстильные нитки армирования, выполненные из синтетических тканей.

Согласно отчетам Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), проблема загрязнения окружающей среды материалами отработанных автомобильных шин занимает второе место в мире, после изделий из полиэтилена. Основную проблему представляют мельчайшие частицы резиновых компонентов шин, которые в случае проникновения в организм человека вызывают целый ряд заболеваний: бронхиальную астму, раковые опухоли и огромный спектр аллергических реакций. Помимо прочего, токсичные свалки, образованные из отработанных покрышек, отлично подходят для размножения грызунов и насекомых, которые переносят различные инфекции. Чем жарче климат местности, тем больше опасности исходит от внутренних частей покрышек, где образуется зона повышенной влажности, и условия, наиболее подходящие для жизнедеятельности микроорганизмов и иных представителей животного мира.

Переработка шин благоприятствует решению этих проблем, однако главным препятствием является необходимость привлечения больших инвестиций. Для этого требуется рассмотрение вопроса технологий утилизации шин на законодательном уровне и предоставление государством некоторых преференций для перерабатывающих компаний.

Все имеющиеся на текущий момент способы и технологии переработки автомобильных шин можно разделить на две группы: физические и химические [2].

1) Самый распространенный физический способ утилизации – процесс механического измельчения шин.

2) Утилизация резиновых отходов способом бародеструкции. В данном случае утилизация осуществляется путем «псевдоожижения» автомобильной резины с применением высокого давления для истекания материала из рабочей ячейки сквозь отверстия в ней.

Преимущество использования способа – легкое отделение металлических частей от шины.

Главная проблема применения данного способа – потребность оснащения оборудования режущими элементами с повышенной износостойкостью. При подобных технологиях необходимо применять многокомпонентную очистку измельченной резиновой крошки от включений металла и текстиля.

3) Воздействие озона. Данный метод достаточно новый в области переработки автомобильных шин. Озон, контактируя с поверхностью резины, приводит к быстрому ее окислению, то есть к разрушению межмолекулярных и внутримолекулярных связей. Особенно интенсивно разрушаются напряженные связи. Конечный продукт – резиновая крошка диаметром от 0,1 до 0,2 миллиметров.

4) Криогенная переработка. При криогенной переработке резину замораживают, например жидким азотом до температуры «охрупчивания» резины. Кусковые отходы замороженной резины или нарубленные куски шин измельчаются одним из механических способов, например в валковой дробилке.

5) Способ сжигания. Данный способ утилизации воспринимается неоднозначно: так как автомобильные шины хорошо поддаются процессам горения и выделяют при этом немало энергии, этот способ признается эффективным. Однако с точки зрения экологии применение такого метода недопустимо. Основная проблема технологии в том, что процесс горения резины происходит с выделением в атмосферу гидроксильных окислов азота, углерода и серы, которые становятся основной причиной выпадения кислотных осадков.

Сейчас существует возможность оснастить перерабатывающие заводы полностью контролируемыми печами для сжигания шин, а также мощными фильтрами для процессов поглощения загрязняющих веществ, однако затраты на установку такого оборудования делают процесс утилизации способом сжигания малорентабельным и непривлекательным для предпринимателей [2].

В результате проведения исследования в области утилизации отработанных автомобильных шин нами был выявлен на наш взгляд самый рентабельный и безопасный способ утилизации – термолиз. Разработанная технология

представляет собой процесс непрямой передачи тепла по радиально расположенным пластинам, воздействующим на гранулят, помещенный в вертикальном реакторе в безкислородній среде. При температуре от 500 до 850°С, гидрокарбоновые соединения распадаются и строят соединения из коротких цепей. Сущность метода заключается в специальной термической обработке изношенных шин, в результате чего протекает термолиз резины с образованием твердой, газообразной и жидкой форм. Жидкие отходы термолиза по свойствам и составу аналогичны мазуту. Твердые продукты – карбонизат (полукокс). Исходя из экологической безопасности получения топлива из отходов, представляется перспективным получать топливо путем смешивания 3 составляющих: конденсата, жидкой фракции и твердого остатка [3].

Самой распространенной проблемой при планировании бизнеса по переработке автомобильных шин является поиск подходящего участка для возведения завода. Перерабатывающее предприятие необходимо размещать вдали от жилых помещений. Отлично подойдут помещения предприятий, прекративших свою работу. Другой проблемой утилизации является высокая стоимость технологий требуемых очистных систем. Поэтому многие предприниматели предпочитают совмещать процесс переработки автомобильных шин с утилизацией другого сырья, такого как стекло или пластик. Из перечисленных проблем и особенностей работы предприятий по переработке автомобильных шин можно сделать вывод, что проблема утилизации покрышек в России стоит очень остро, и государству следует проявить больше заинтересованности в вопросе переработки покрышек для улучшения общей экологической обстановки.

Литература:

1. Приказ Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (ред. от 04.10.2021) «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов» (Зарегистрировано в Минюсте России 08.06.2017 N 47008 от 22.05.2017 № 242 // СПС «Консультант плюс».

2. Способы переработки автомобильных шин. http://shinopererabotka.ru/stati/article_post/sposoby-pererabotki-avtomobilnyh-shin

3. Проблемы переработки и способы утилизации автомобильных шин и покрышек. https://stop-othod.ru/recycling/pererabotka-shin.html