

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ В РЕБРИСТОМ ПУЧКЕ

Сидорик Г.С., Сухоцкий А.Б.

Белорусский государственный технологический университет. г. Минск,
Беларусь. E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) применяются при температуре окружающего воздуха от -55 до $+55$ °С в химической, нефтехимической промышленности, в электроэнергетике, где имеется необходимость охлаждения технологических продуктов, конденсации их паров, охлаждения и конденсации парогазовых смесей.

Применение АВО в различных отраслях промышленности постоянно расширяется по следующим причинам: снижение потребления охлаждающей воды до 80%; снижение капитальных и эксплуатационных затрат; повышенная экологическая чистота; меньшая коррозионность теплообменных секций и отсутствие накипи, по сравнению с трубным пучком кожухотрубных аппаратов.

Основными конструкторскими и сборочными элементами аппаратов воздушного охлаждения (рис. 1) являются теплообменные секции 1 из биметаллических оребренных труб, осевой вентилятор 2 с приводом 3, диффузор 4 или конфузор, опорная конструкция 5, система регулирования подачи охлаждающего воздуха. АВО с естественной тягой воздуха в энергосберегающем режиме без потребления электроэнергии приводом вентилятора через теплообменные секции используются лишь в холодное время года при температурах воздуха не более -25 °С. Однако при оснащении аппаратов воздушного охлаждения дополнительными устройствами, которые помогут усилить тягу, существует возможность сохранения теплопроизводительности аппарата при более высоких температурах.

В настоящее время широко изучена вынужденная конвекция в теплообменных пучках аппаратов воздушного охлаждения, проведены оригинальные экспериментальные и теоретические исследования физических процессов конвективной теплоотдачи и гидродинамики потока воздуха в развитых трубчатых поверхностях теплообмена, разработаны основы расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения [1, 2].

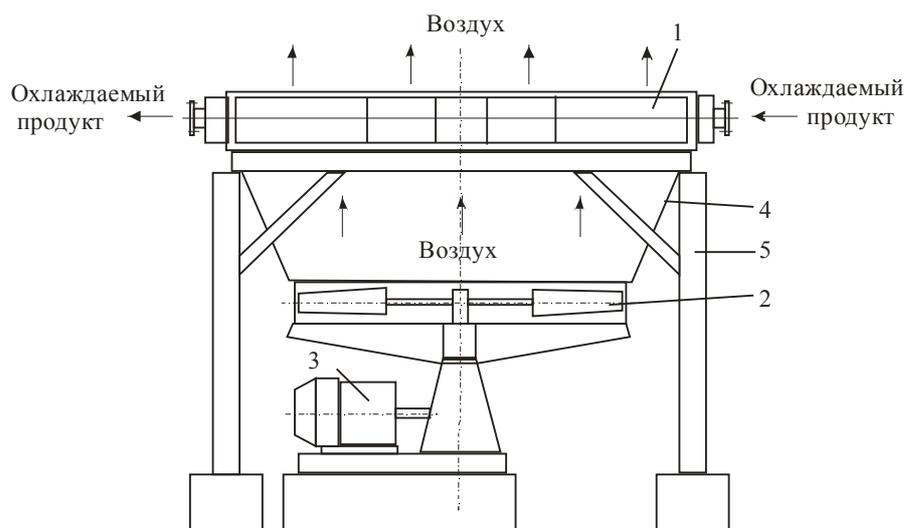


Рис. 1. Аппарат воздушного охлаждения: 1 – теплообменные секции, 2 – вентилятор, 3 – привод вентилятора, 4 – диффузор, 5 – опора

Одним из направлений повышения энергоэффективности и экономичности аппаратов воздушного охлаждения является интенсификация теплоотдачи и улучшение

аэродинамики многорядного пучка из оребренных труб при прохождении охлаждающей среды. Одной из конструкций аппаратов воздушного охлаждения, в которой реализовано данное направление, является аппарат [3], для охлаждения природного газа на КС магистральных газопроводов. Экономичность аппарата обеспечивается снижением аэродинамического сопротивления вследствие разработанных конструктивных решений, обеспечивающих улучшенную аэродинамику движения воздуха через межтрубное пространство пучка и оптимизации параметров проходного сечения коллекторов вентилятора и их обтекаемой формы.

В работе [4] для однорядного трубного пучка с параметрами диаметр труб $d - 28$ мм, относительный шаг разбивки труб в пучке $\sigma_1 = 1,082 - 4,33$, температура поверхности наиболее нагретой трубы $t = 25 - 240^\circ\text{C}$; для шахматного пучка с параметрами число горизонтальных рядов $z = 2 - 7$, диаметр труб $d - 19$ мм, относительный горизонтальный шаг рядов труб $\sigma_1 = 1,5 - 3,5$, относительный вертикальный шаг рядов труб $\sigma_2 = 1,5 - 3,5$, температура поверхности наиболее нагретой трубы $t = 60 - 220^\circ\text{C}$; число труб в горизонтальном ряду $n = 5$; для коридорного пучка с параметрами диаметр труб $d - 19$ мм, относительный горизонтальный шаг рядов труб $\sigma_1 = 2 - 4,5$, относительный вертикальный шаг рядов труб $\sigma_2 = 1,5 - 4,5$, число труб в горизонтальном ряду $n = 2 - 7$, были установлены экспериментальные зависимости числа Нуссельта от числа Грасгофа, а также даны расчетные формулы для подсчета коэффициента теплоотдачи свободной конвекцией к воздуху от горизонтального ряда, шахматного и коридорного пучка труб.

Методика расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками следующих параметров:

$$d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 55,6 \times 26,5 \times 14,55 \times 2,91 \times 0,75 \times 300 \text{ мм}, \varphi = 16,8;$$

$$d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 56,9 \times 26,36 \times 15,27 \times 2,44 \times 0,55 \times 400 \text{ мм}, \varphi = 21;$$

изучена и усовершенствована в [5], были выполнены исследования закономерности совокупного влияния величины шагов равносторонней компоновки труб, числа рядов и номера ряда на порядную и среднюю теплоотдачу пучка, уточнена методика расчета теплового потока излучения оребренных труб и пучков, базирующаяся на экспериментальном способе определения эффективной степени черноты одиночной трубы.

Разработана конструкция АВО [6], в котором внутри диффузора по периметру верхней части расположен коллектор со щелевыми насадками, которые имеют выходное прямоугольное сечение с углом раскрытия в $15-30^\circ$. Режим теплообмена в аппарате по стороне охлаждающего воздуха переходит из естественного в смешанный, и затраты энергии на подачу сжатого воздуха и ввод его в аппарат уменьшаются по сравнению с затратами при принудительном движении воздуха.

Одним из направлений повышения энергоэффективности и экономичности аппаратов воздушного охлаждения является интенсификация теплоотдачи и улучшение аэродинамики многорядного пучка из оребренных труб при прохождении охлаждающей среды. Одной из конструкций аппаратов воздушного охлаждения, в которой реализовано данное направление, является аппарат [7]. Новым в данной конструкции является установка между опорами и на нижней плоскости блока теплообменных секций металлической сетки с фильтрующим полотном из геотекстильного материала; наличие зигзагообразно расположенных водометных стволов со щелевыми наконечниками, ориентированных параллельно плоскости рамы и подсоединенных к воздушному компрессору. При этом водометные стволы направлены сверху вниз и из центра к периметру, а по периметру аппарата на полу расположен лоток с водой. При прохо-

ждении через фильтрующее полотно, воздух очищается от органических и неорганических примесей, благодаря чему уменьшается загрязнение поверхности оребрения биметаллических труб теплообменных секций и интенсифицируется теплопередача. При высоких температурах атмосферного воздуха применяется водяное орошение, которое реализуется водометными стволами, а подвод сжатого воздуха в стволы диспергирует воду на мелкие частицы, что интенсифицирует процесс охлаждения воздуха с понижением его температуры до значения по мокрому термометру. Движение частиц воды сверху вниз дополнительно очищает воздух от мелких примесей и воздушной пыли, прошедших фильтрующее полотно, расположенное между опорами по периметру АВО на всю высоту от пола до теплообменного блока. Увлеченные частицами воды примеси оседают на пол и собираются в лоток с водой. Охлаждение воздуха водой позволяет лишь кратковременно интенсифицировать теплоотдачу воздуха.

Таким образом, вопросы теплоотдачи вынужденной и свободной конвекции практически изучены полностью. Однако теплоотдача при смешанной конвекции почти не изучалась, но это является достаточно перспективной областью для аппаратов воздушного охлаждения, так как при таком виде теплоотдачи по сравнению с естественной конвекцией существенно интенсифицируется теплоотдача, а также в 5-6 раз уменьшаются затраты на электроэнергию по сравнению с затратами при вынужденном движении вентилятора. Схема разработанного стенда представлена на рис. 2.

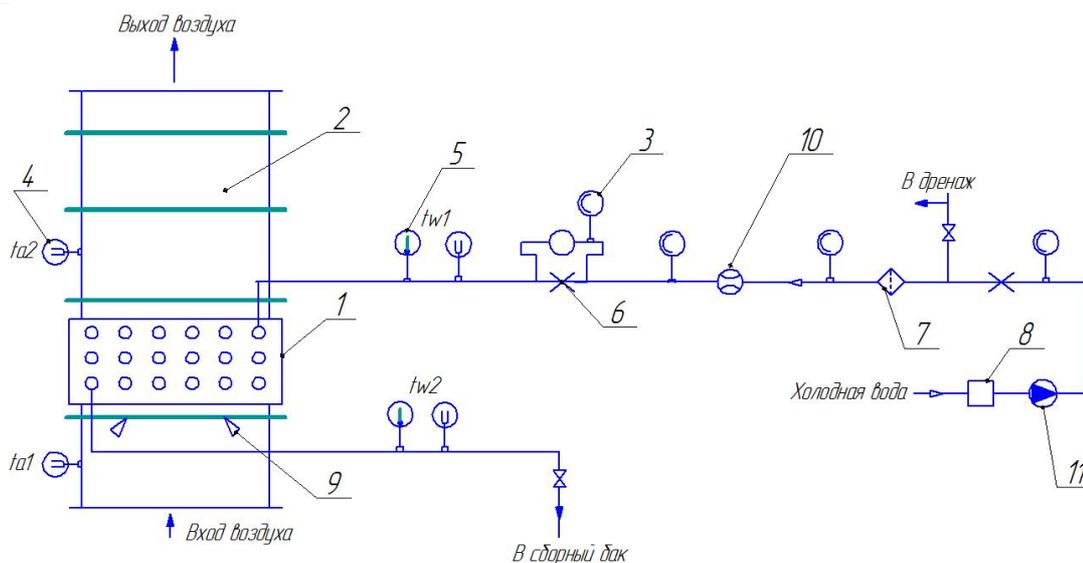


Рис. 2. Схема стенда: 1 – теплообменный пучок, 2 – вытяжная шахта, 3 – манометры, 4 – термодатчики, 5 – термометры, 6 – диафрагмы, 7 – фильтр, 8 – электродогреватель, 9 – сопла, 10 – расходомер, 11 – насос

Атмосферный воздух поступает в теплообменный пучок 1, а затем за счет разности плотностей холодного и горячего воздуха возвращается в окружающую среду. Для создания тяги на выходе из аппарата воздушного охлаждения установлена вытяжная шахта 2, количество коробов которой в процессе исследований будет изменяться. Вытяжная шахта размещается непосредственно над поверхностью оребрения. На входе воздуха также установлен короб, в котором будет производиться измерение температуры окружающего воздуха t_{a1} , а на выходе из теплообменного пучка температуры t_{a2} . Из электродогревателя 8 Гродноторгмаш ЭВО-4,8-0,1 мощностью 4,8 кВт с системой автоматического поддержания температуры насосом 11 в теплообменный пу-

чок подается горячая вода. Термометрами 5 измеряется температура воды на входе и на выходе из пучка, а расход – расходомером 10. В каждом ряду устанавливается одна измерительная трубка с зачеканенными термopарами с помощью которых можно определить среднюю температуру поверхности стенки трубы у основания ребра.

По результатам опытов можно определить средний приведенный α_i коэффициент теплоотдачи i -го поперечного ряда пучка по формуле, Вт/(м² К)

$$\alpha_i = Q_i / (F(t_{cmi} - t_1)),$$

где Q_i – тепловой поток, переданный измерительной трубой воздуху, Вт; $F = \pi d_0 \phi l$ – полная площадь наружной теплоотдающей поверхности измерительной трубы, м²; t_{cmi} – средняя температура поверхности стенки измерительной трубы в i -ом ряду у основания ребер, °С; t_1 – средняя температура воздуха перед измерительной трубкой, принимаемая равной средней температуре воздуха перед пучком, °С.

Литература

- [1] Бессонный А.Н., Кунтыш В.Б. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения. *СПб. Недра.* **1996.** 512 с., ил.
- [2] Кунтыш В.Б., Бессонный А.Н. Примеры расчетов не стандартизированных эффективных теплообменников. *СПб. Недра.* **2000.** 300 с., ил.
- [3] Патент ВУ на полезную модель 9446. **2013.**
- [4] Короленко Ю.А. Теплоотдача от горизонтального пучка труб к воздуху в условиях свободной конвекции. *Изв. Томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова.* **1962.** Т.110. С.26-33.
- [5] Самородов А.В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками. *Автореферат.* **1999.** С.3-22.
- [6] Мильман О.О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой. *Теплоэнергетика.* **2005.** №5. С.16-19.
- [7] Патент RU на изобретение 2200907 С2. **2003.**

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ВИДОВ КОНТАКТНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ТЕПЛОМАСООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ВЫСОКОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Мадышев И.Н., Махмутов А.Ф., Дмитриев А.В.*

Нижекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ).

**Казанский государственный энергетический университет.*

E-mail: ieremiada@gmail.com

Современная химическая промышленность характеризуется весьма большим числом разнообразных производств, различающихся условиями протекания технологических процессов и многообразием физико-химических свойств перерабатываемых веществ и выпускаемой продукции. Среди типовых процессов разделения и очистки жидких, газовых и паровых смесей важное место занимают процессы абсорбции и

ректификации [1]. При этом эффективность осуществления массообменных процессов определяется в основном совершенством используемого контактного устройства. В настоящее время наибольшее распространение получили аппараты с насадочными и тарельчатыми контактными устройствами [2].

Поиски путей интенсификации массообмена в газожидкостных системах привели к разработке принципиально новых аппаратов со струйно-барботажными контактными устройствами, регулярными насадками повышенной пропускной способности и так далее. Как показывает анализ наиболее перспективных конструкций контактных устройств, созданных в последние годы, каждое новое конструктивное решение дает незначительный выигрыш в эффективности. Конструкции, в основном, становятся все сложнее [3].

Вариант конструкции струйно-барботажного контактного устройства для массообменных аппаратов предлагается авторами работы [4]. Контактное устройство состоит (рис. 1) из сливных стаканов 1, имеющих вертикальные стенки, необходимые для поддержания уровня жидкости внутри них. Стаканы 1 в каждом ряду соединены между собой с помощью стержней 2, открыты с верхнего своего конца, а нижний конец (днище) снабжен некоторым множеством отверстий 3, необходимых для слива жидкости на расположенный ниже сливной стакан 1. Схема взаимодействия потоков газа и жидкости в предлагаемом струйно-барботажном контактном устройстве представлена на рис. 2.

Разработанное авторами настоящей статьи струйно-барботажное контактное устройство работает следующим образом. Жидкость через множество отверстий 3, выполненных в днище сливных стаканов 1, диспергируется в виде струй на расположенный ниже сливной стакан 1. При этом в указанных сливных стаканах 1 поддерживается уровень жидкости h_2 за счет наличия вертикальных стенок высотой h_1 сливных стаканов. Сливные стаканы 1 располагают горизонтально в шахматном порядке, образуя тарелку. Причем нижерасположенная тарелка имеет смещение стаканов, формируя шахматное их расположение по вертикали. По этой причине, газ, поступающий снизу под тарелку, приобретает зигзагообразный характер движения (рис. 2).

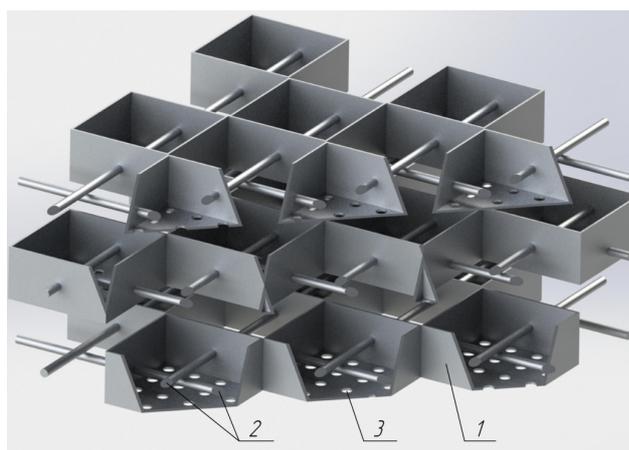


Рис. 1. Струйно-барботажное контактное устройство:
1 – сливной стакан; 2 – стержень; 3 – отверстия

При движении струй жидкости происходит их распад с образованием множества капель. Последние, соударяясь о поверхность жидкости, находящейся внутри стаканов 1, разлетаются в разные стороны брызгами. Таким образом, создается развитая

постоянно обновляющаяся поверхность контакта фаз, которая определяется наличием относительно небольших газовых пузырей в слое жидкости и вылетающими каплями с поверхности.

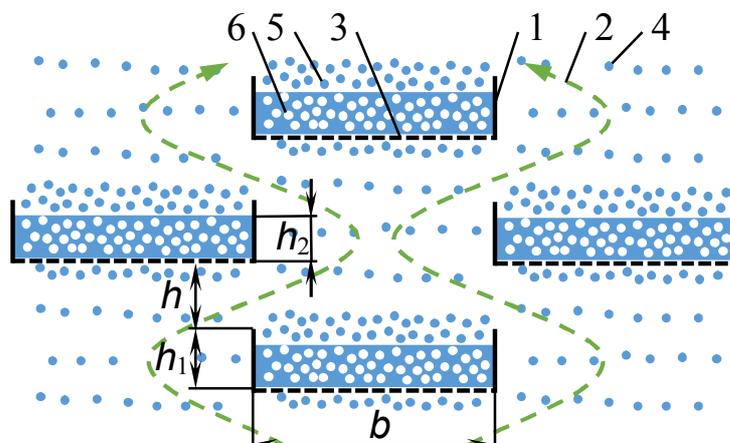


Рис. 2. Схема взаимодействия потоков газа и жидкости в струйно-барботажном контактном устройстве: 1 – сливной стакан; 2 – поток газа; 3 – перфорированное днище; 4 – капли, образованные перфорированным устройством; 5 – капли, вылетающие из жидкости; 6 – пузыри

Кроме того, восходящий поток газа контактирует с падающими струями или каплями жидкости, при этом образуется вторая зона контакта газа и жидкости. Принимая расстояние между сливными стаканами на одном уровне, равными ширине сливного стакана, обеспечивается равнопроточность для прохода газа, что приводит к снижению гидравлического сопротивления, предлагаемого струйно-барботажного контактного устройства. Для обеспечения максимальной эффективности тепломассообменных процессов сливные стаканы в поперечном сечении имеют форму квадрата. Таким образом, организация оригинального взаимодействия между газом и жидкостью позволяет интенсифицировать тепло- и массообменные процессы как в жидкой, так и в газовой фазах при относительно простом аппаратном оформлении.

Предлагаемые контактные устройства обладают уникальной особенностью, а именно гидравлическое сопротивление практически не зависит от расхода жидкой фазы, так как сечение для прохода потока газа не зависит от этого параметра. Кроме того, можно с достаточно большой точностью определить максимальные и минимальные нагрузки по жидкости, поскольку они зависят от значения уровня в контактном устройстве:

$$\frac{L_{m \max}}{L_{m \min}} \approx \sqrt{\frac{h_{2 \max}}{h_{2 \min}}},$$

где $h_{2 \min}$, $h_{2 \max}$ – минимальный и максимальный уровни жидкости в контактном элементе, м.

Таким образом, предлагаемые струйно-барботажные контактные устройства, без снижения эффективности, могут увеличить производительность и снизить энергетические затраты на проведение тепломассообменных процессов как в действующих аппаратах, так и во вновь проектируемых.

Литература

- [1] Бурмистров Д.А., Фарахов М.М., Фарахов М.И., Клинов А.В. Гидродинамические характеристики новой регулярной гофрированной насадки. *Вестник Казанского технологического университета*. **2010**. №7. С.310-314.
- [2] Пушнов А.С., Соколов А.С., Бутрин М.М. Методы интенсификации процесса тепло- и массообмена в колонных аппаратах с контактными устройствами. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. **2013**. Т.4. №1(15). С.237-242.
- [3] Гумерова Г.Х., Макушева О.С., Дмитриев А.В. Оптимизация размеров регулярной насадки для теплообменных процессов. *Вестник Казанского технологического университета*. **2011**. №3. С.35-37.
- [4] Струйно-барботажное контактное устройство для теплообменных процессов: заявка на полезную модель № 2015119123 (029613). Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., Сагдеева Г.С., Николаев А.Н.; заявл. 30.04.**2015**.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ УЗЛА РЕГЕНЕРАЦИИ ЭКСТРАГЕНТА ПРОИЗВОДСТВА БУТАДИЕНА

Гайфетдинов М.Ф., Закиров М.А.

Нижнекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ).

E-mail: zakirovma@mail.ru

При реализации современных национальных проектов и программ Российской Федерации важное значение принадлежит нефтехимическому комплексу страны. Это обусловлено значительной ролью нефтехимической индустрии в решении задач практически всех других отраслей экономики – строительства, транспорта, сельского хозяйства, оборонного комплекса, здравоохранения и другие.

Задачами стратегии развития нефтехимического комплекса Российской Федерации и Республики Татарстан в частности являются:

- обеспечение потребностей рынка продукцией различного функционального назначения путем увеличения объема ее производства;
- внесение качественного изменения структуры, и повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции;
- реализация национальных проектов в сфере строительства жилья, здравоохранения, сельского хозяйства и других федеральных целевых программ, непосредственно связанных с практическим использованием продукции нефтехимического комплекса.

Материальной базой развития нефтехимических отраслей является химическое и нефтяное машиностроение. Основными направлениями развития химического и нефтяного машиностроения являются: увеличение единичной мощности оборудования; увеличение номенклатуры и качества выпускаемого технологического оборудования и машин; создание и освоение производства нефтехимического оборудования пониженной металло- и энергоемкости; создание и освоение технологии производства новых, прогрессивных химических процессов и безотходных и ресурсосберегающих технологий.

Общепризнанным лидером в производстве и реализации современной наукоемкой продукции нефтехимического комплекса по производству синтетических каучу-

ков в стране и за рубежом является Публичное акционерное общество «Нижнекамскнефтехим». (ПАО «НКНХ»). В состав этого крупнейшего предприятия входят около 25 заводов и подразделений, на которых выпускаются более 100 видов современной высококачественной нефтехимической продукции, пользующихся огромным спросом на отечественном и мировом рынке.

Одним из ключевых технологических подразделений ПАО «НКНХ» является завод Дивинила и углеводородного сырья (ДБ и УВС).

В составе завода с 1974 года успешно функционирует производство дивинила и бутадиена (ДБО), состоящее из двух цехов: цех 1431 (ДБО-2) по дегидрированию н-бутана и газоразделения и цех 1432 (ДБО-10) – для выделения и очистки бутадиена методом двухступенчатой экстрактивной ректификации с использованием диметилформамида (ДМФА) с производственной мощностью 90 тыс. тонн бутадиена -1,3 (дивинила) в год.

Получаемый в цехах 1431 и 1432 бутадиен-1,3 применяется для дальнейшего производства на заводе ДБ и УВС и других заводах ПАО «НКНХ» различных марок синтетических каучуков и добавок к автомобильным бензинам (МТБЭ).

Для поддержания поглотительной способности применяемого в производстве избирательного растворителя (экстрагента) – диметилформамида, предусмотрена его регенерация в ректификационной колонне D-408 узла регенерации ДМФА [1]. Технологическая схема узла представлена на рис. 1.

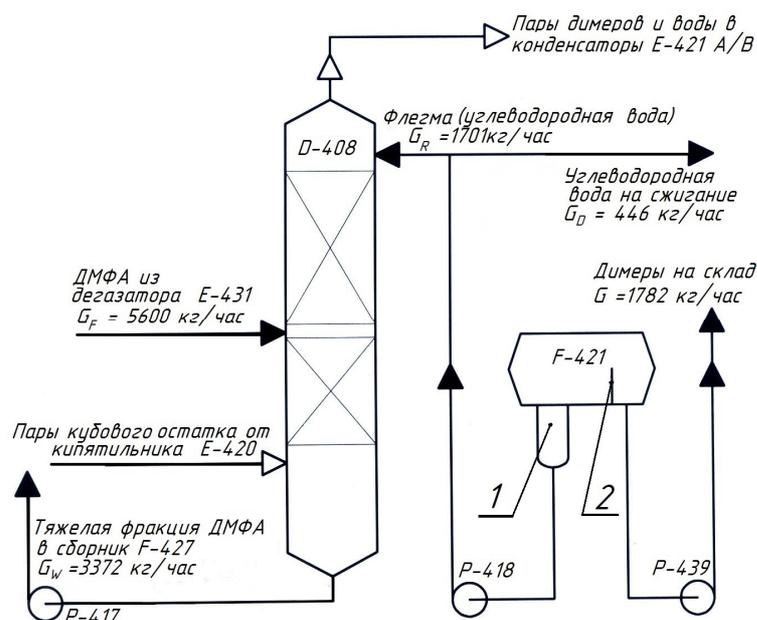


Рис. 1. Схема модернизации флегмовой емкости F-421 узла регенерации ДМФА:
1 – отстойник для углеводородной воды; 2 – разделительная перегородка для димеров

Исходная смесь (G_F) насыщенного растворенными углеводородными газами ДМФА поступает в линию питания колонны D-408 в распределитель питания между двумя слоями насыпной нерегулярной насадки из керамических колец Рашига. Жидкая часть питания стекает вниз по поверхности насадки частично попадает в кипятильник E-420, в межтрубное пространство которого подается острый водяной пар с температурой 160 °С для создания восходящего парового потока внутри колонны.

Кубовая жидкость (G_W), состоящая из тяжелых остатков углеводородных газов и 1% ДМФА, откачивается насосом Р-417 в сборник Е-427 на дальнейшую переработку.

С верха колонны D-408 пары низкокипящих компонентов – димеры и воды с температурой 90 °С поступают в межтрубное пространство конденсатора 1 ступени Е-421А, где частично охлаждаются и конденсируются за счет подачи в трубное пространство оборотной промышленной воды с температурой 60 °С. Окончательная конденсация несконденсированные паров осуществляется в конденсаторе-дефлегматоре второй ступени Е-421В за счет подачи в трубное пространство заоложенной воды. Сконденсированные пары димеров и воды из конденсаторов Е-421А и Е-421В по уровню в аппарате, стекают в флегмовую емкость F-421, где происходит разделение димеров и воды за счет разности плотностей жидких фаз.

Нижний слой – углеводородная вода, из F-421 насосом Р-418 подается на верхнюю тарелку колонны D-408 в качестве флегмы (G_R), а его избыток (G_D) откачивается на сжигание в факельную линию. Верхний слой – димеры (G), по верхнему смотровому фонарю, насосом Р-439, откачивается на склад регенерированного ДМФА для дальнейшего использования в технологическом процессе.

Требования к расходам и составам питания и готовым продуктам разделения ректификационной колонны D-408 представлены в табл. 1.

Табл. 1. Материальный баланс колонны D-408

Компоненты	Приход		Расход			
	Питание, G_F		Дистиллят, G_D		Куб, G_W	
	Расход, кг/час	Состав x_F , % масс.	Расход, кг/час	Состав, x_D , % масс.	Расход, кг/час	Состав, x_W , масс.
Фракция димеров	2240	40	2206	99	34	1
Углеводородная вода	3360	60	22	1	3338	99
ИТОГО	5600	100	2228	100	3372	100

Дистиллят колонны G_D – фракция димеров, должен состоять из димеров с концентрацией не менее 80% и углеводородной воды – с содержанием до 20%. Расчет балансового количества и содержания фракции димеров узла регенерации ДМФА представлен в табл. 2.

Табл. 2. Содержание дистиллятной фракции димеров колонны D-408

Компоненты	Расход G_D , кг/час	Концентрация x_D , % масс.
Димеры	1782	80
Углеводородная вода	446	20
ИТОГО (фракция димеров)	2228	100

По существующей технологической схеме сконденсированные пары димеров и углеводородной воды из конденсаторов Е-421А и Е-421В по уровню в аппарате, стекают в флегмовую емкость F-421, откуда по уровню жидкости, производится откачка дистиллята – димеров на склад, а его избыток – углеводородной воды – на сжигание в факеле.

Нами предлагается ввести незначительные изменения в конструкцию флегмовой емкости F-421 (рис. 1) в виде нижнего отстойника 1 для водной фазы и разделительной перегородки 2 для легкой органической фазы. Это позволит более четко произво-

дить разделение нижнего водного слоя, и отводить в соответствии с табл. 2 балансовое количество углеводородной воды ($G_D = 446$ кг/час) на сжигание, а отделившуюся от воды органическую фазу ($G = 1782$ кг/час) откачать существующим насосом Р-439 на склад регенерированного ДМФА. В результате модернизации снижаются загрязнения атмосферы продуктами сжигания на факеле, сокращаются выбросы загрязненной углеводородной воды в систему химически загрязненных стоков, что в конечном счете позволит улучшить экологическую обстановку на предприятии и в регионе.

Следующее предложение по модернизации действующего производства связано с заменой устаревших и малоэффективных насадок из колец Рашига на более современную регулярную насадку «Меллапак».

Преимущества насадки «Меллапак» перед кольцами Рашига заключается в том, что течение жидкости по элементам насадки происходит в виде тонкой пленки, площадь которой значительно превышает поверхность колец Рашига на 60-80%. При протекании жидкости с одного элемента на другой пленка жидкости разрушается и на нижележащем элементе образуется новая пленка, то есть на насадке происходит непрерывное обновление поверхности контакта. Под действием восходящего парового потока пара часть жидкости проходит через слои насадки дополнительно в виде капель, струек, брызг, обеспечивая увеличение поверхности контакта фаз, что, в конечном счете, приводит к улучшению качества разделения при том же объеме и высоте слоев насадки в колонне.

Регулярная насадка «Меллапак» имеет ряд преимуществ [2-4] перед нерегулярной насадкой из колец, засыпанной в колонну навалом:

- более удобная загрузка и выгрузка крупными блоками;
- меньшее гидравлическое сопротивление и как следствие – снижение тепловой нагрузки на кипятильник куба колонны;
- хорошая смачиваемость жидкостью;
- отсутствие хрупкого разрушения;
- меньшая плотность и масса насадки;
- большой свободный объем и удерживающая способность.

Стоимость капитальных затрат по реконструкции колонны D-408 незначительна и окупается меньше чем за год, в основном за счет повышения качества дистиллята, связанного со снижением содержания тяжелых компонентов в углеводородной воде до нормативного значения. Кроме того, от модернизации насадки колонны обеспечивается значительный экологический эффект в результате снижения содержания органических компонентов в углеводородной воде, направляемой на сжигание от узла регенерации ДМФА цеха 1432 ПАО «НКНХ».

Литература

- [1] Технологический регламент цеха 1432 завода ДБ и УВС ОАО «НКНХ».
- [2] Поникаров И.И., Гайнуллин М.Г. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки: Учебник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: *Альфа*. М. 2006. 608с.
- [3] Гильманов Х.Х., Закиров М.А. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки: Учебное пособие. *Нижекамск, Нижекамский химико-технологический институт*. 2013. 128с.
- [4] Машины и аппараты химических производств: Учебник для вузов. А.С. Тимонин, Б.Г. Балдин, В.Я. Борщев и др. Под общей редакцией А.С. Тимонина. *Калуга, Издательство «Ноосфера»*. 2014. 856с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛО-МАССООБМЕНА В ЦЕНТРОБЕЖНО-БАРБОТАЖНОМ АППАРАТЕ

Калекин В.С.

Омский автобронетанковый инженерный институт.

E-mail: kalekinvc@mail.ru

Интенсификация процессов тепло-и массообмена ставит задачу поиска новых эффективных систем обработки газовых сред, новых технических решений, которые позволили бы снизить массогабаритные показатели массообменных аппаратов. Эффективными и простыми по принципу действия для проведения тепло-массообменных процессов являются осевые барботажно-пенные аппараты, но они имеют существенный недостаток – повышенный брызгоунос при скоростях вдува газа 2-2,5 м/с [1].

Использование вращающегося двухфазного слоя в барботажно-пенных аппаратах позволяет существенно снизить степень уноса жидкости, доведя его до минимального уровня. Кроме того, аппараты вихревого типа имеют дополнительные преимущества. Это обеспечение большой пропускной способности, создание развитой поверхности тепло-массообмена, многократное использование жидкой фазы, возможность регулирования времени пребывания теплоносителей в зоне фазового контакта.

Исследованию контактных аппаратов осевого типа посвящены многие работы [2], в которых обобщены результаты гидравлических и тепловых испытаний, даны рекомендации по их проектированию. Аналогичные результаты для вихревых контактных аппаратов ограничены и даже носят противоречивый характер [3].

В задачи настоящей работы входило проведение экспериментальных исследований по изучению гидродинамики и тепло-массообмена в центробежно-барботажном аппарате [4].

На рис. 1 приведена конструкция исследуемого аппарата, выполненного из оргстекла диаметром 380 мм и высотой 850 мм. Принцип работы аппарата заключается в следующем. Газовая фаза тангенциально вводится в вихревую камеру 4 через патрубок Д. Пройдя через отверстия перфорированного контактного устройства, выполненного в виде обратного усеченного конуса 5, закрученный газовый поток создает с жидкостью, которая подается в нижнюю часть контактного устройства через патрубок В, вращающийся газожидкостный слой. Вращающийся двухфазный слой за счет центробежных сил поднимается на верхний торец газовой камеры, откуда по переточным трубкам 6 жидкость возвращается в коническое днище 7.

Часть жидкости может опять возвращаться в нижнюю часть конуса через зазор с тарелкой 9, образуя рециркуляционный поток, обеспечивая тем самым многократное взаимодействие жидкой и газовой фаз.

Отработанная жидкость, насыщенная поглощаемыми компонентами, выводится из аппарата через патрубок Г. Очищенный поток газа проходит через инерционный каплеуловитель 2, где происходит его раскручивание с сепарацией унесенных мелких капель жидкости, и выводится через патрубок Е. По сливным трубкам 3, размещенным внутри труб 6, отделенная жидкость возвращается обратно в коническое днище 7.

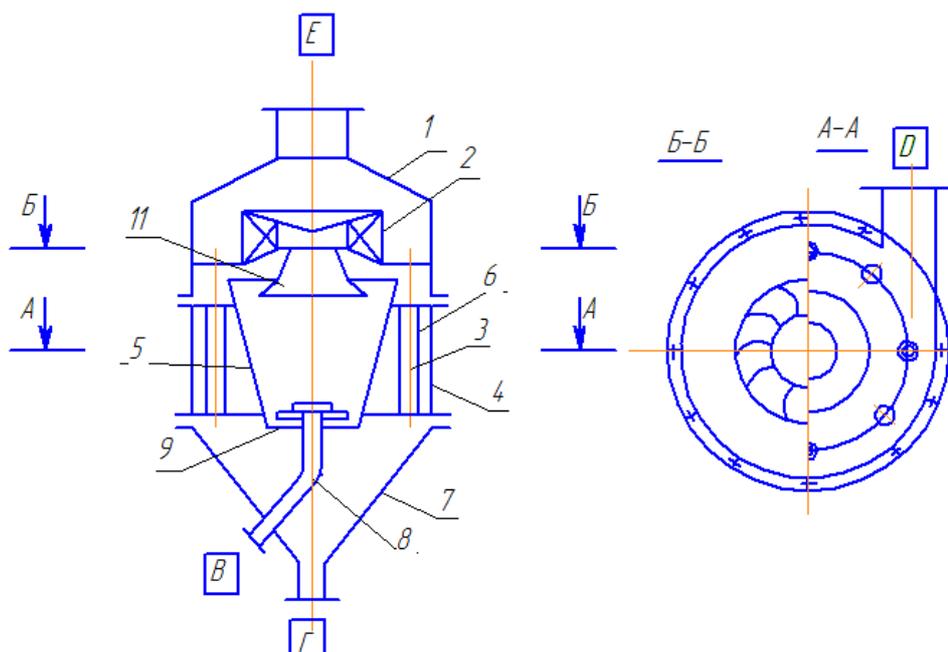


Рис. 1. Центробежно-барботажный аппарат: 1 – верхняя крышка; 2 – каплеуловитель; 3 – сливные трубы; 4 – вихревая камера; 5 – перфорированный обратный усечённый конус; 6 – перегородочные трубы; 7 – коническое днище; 8 – подводящая труба; 9 – распределительная тарелка

Экспериментальная установка представляла собой два разомкнутых контура по воздуху и воде. Циркуляция воздуха обеспечивалась вентилятором Ц4-70, изменение расхода воздуха производилось шибером на входе, измерение – с помощью стандартной диафрагмы в комплекте с U-образным манометром. Вода в аппарат производилась по схеме с нижней подачей вихревым насосом из накопительной емкости, с размещенным в ней электрическим обогревателем. В процессе экспериментов производились следующие измерения по воздуху: сопротивление в аппарате, температуры и влагосодержания на входе и выходе из аппарата, по воде – расход и температуры на входе и выходе.

В результате экспериментальных исследований установлены границы устойчивой работы аппарата. Имели место режимы «провала» жидкости через отверстия перфорации при недостаточном расходе газа. В связи с невозможностью обеспечить расход жидкости, стекающей по циркуляционным трубам с крышки вихревой камеры аппарата, наступал режим «затопления» полуконического контактного устройства.

На рис. 2 и 3 приведены результаты исследований в безразмерных координатах гидродинамики аппарата для режимов «провала» и «затопления». Для режима провала характерны высокая степень заполнения конуса и низкое газосодержание. По мере увеличения расхода по газу структура слоя изменяется, появляется зона барботаж, часть активного объема конуса занимает пена. При дальнейшем увеличении расходов по газу и жидкости зона барботаж несколько уменьшается. Слои пены при этом вращаются с большей скоростью и под действием центробежных сил распределяются по поверхности конуса, образуя пенно-вихревой слой.

Степень заполнения конуса пенным слоем и газосодержание снижаются, однако под действием центробежных сил происходит уменьшение среднего размера пузыря, что приводит к значительному увеличению поверхности контакта фаз.

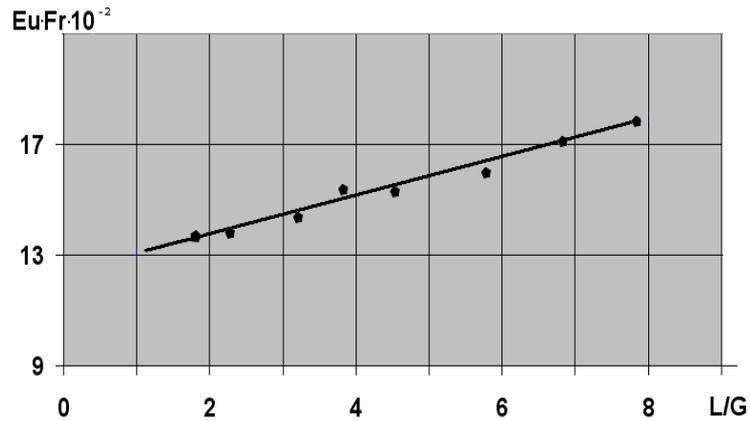


Рис. 2. Режим «провала» жидкости на контактном элементе:

$Eu = 2\Delta p_{кр} / (\rho w_2^2)$; $Fr = w_2^2 / (2gH \sin \alpha)$; $\Delta p_{кр} = \rho_{г-ж} gH \sin \alpha$; w_2 – скорость газа в отверстиях перфорации; H , α – высота и угол раскрытия обратного полуконического контактного элемента; $\rho_{г-ж}$ – плотность газожидкостной системы; L , G – массовые расходы жидкости и газа, соответственно

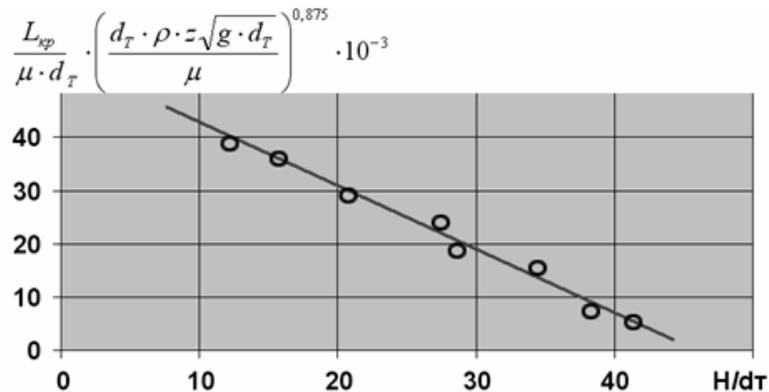


Рис. 3. Режим «затопления» контактного элемента: $L_{кр}$ – критический (максимальный) расход жидкости при затоплении; ρ , μ – плотность и динамический коэффициент вязкости жидкости; d_m , z – диаметр и число циркуляционных труб аппарата, соответственно

Для обработки результатов экспериментов использовались уравнения тепловых балансов, теплоотдачи и массоотдачи. Поверхность контакта фаз определить при экспериментальных исследованиях не представлялось возможным. Поэтому при обработке эксперимента в качестве рабочей поверхности принималась активная площадь конического контактного устройства.

Критерий Рейнольдса $Re = (w_0 d_s \rho) / \mu$, $w_0 = G / (\rho \cdot n \cdot f)$, критерий Эйлера $Eu = \Delta p / (\rho \cdot w_0^2)$, тепловой и диффузионный критерии Нуссельта: $Nu = (\alpha \cdot d_s) / \lambda$; $Nu_0 = (\beta_y \cdot d_s) / D$, где w_0 – скорость газа в отверстии контактного устройства; f , n – площадь поперечного сечения и число отверстий; d_s – эквивалентный диаметр отверстия; ρ , μ , λ – плотность, динамический коэффициент вязкости и теплопроводность воздуха при средней температуре воздуха, соответственно.

На основании экспериментальных исследований были получены следующие результаты: установлена устойчивая работа аппарата в диапазоне $Re = 1600 - 3000$ пред-

ложены аналитические безразмерные зависимости для расчета гидравлических сопротивлений и тепло-массообмена:

$$Eu = 1,3 \cdot 10^4 \cdot Re^{-1} \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0,1}; \quad Nu = 0,04 \cdot Re^{1,3} \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0,5}; \quad Nu_{diff} = 0,17 \cdot Re^{0,8} \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{0,25}.$$

В усовершенствованной конструкции центробежно-барботажного аппарата [5] учтены недостатки аппарата [4], а именно: исключены переточные трубки для циркуляции жидкости; вихревая камера выполнена по спирали, что позволяет обеспечить равномерное распределение газовой фазы по отверстиям перфорации обратного конуса, уменьшить гидравлические сопротивления, расширить диапазон устойчивой работы.

Литература

- [1] Контактные теплообменники. Таубман Е.И., Горнев В.А., Мельцер В.Л. и др. М.: Химия. 1987. 256с.
- [2] Пенный режим и пенные аппараты. Мухленов И.П., Тарат Э.Я., Туболкин А.Ф., Тумаркина Е.С. Л.: Химия. 1977. 304с.
- [3] Богатых С.А. Циклонно-пенные аппараты. Л.: Машиностроение. 1978. 224с.
- [4] Пат. 2069080 России. Центробежно-барботажный аппарат. А.В. Бенедиктов, В.С. Калекин, А.А. Плотников и др. Бюл. №32, 1996.
- [5] Пат. 2261138 России. Центробежно-барботажный аппарат. В.С. Калекин, А.В. Ильин, В.В. Калекин, Д.В. Калекин. Бюл. №27, 2004.

РЕГЕНЕРАЦИЯ КАТАЛИЗАТОРА ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ СТИРОЛА СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ ФЛЮИДНЫМ ЭКСТРАГЕНТОМ

Хисамов А.Э., Галимова А.Т., Сагдеев А.А., Гумеров Ф.М.*

Нижекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ).

**Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

E-mail: tukhvatova-albinka@mail.ru

Получение стирола дегидратацией метилфенилкарбинола является одним из приоритетных процессов на ПАО «Нижекамскнефтехим». Катализатор данного процесса – активный оксид алюминия.

В процессе реакции дегидратации активность катализатора снижается вследствие его зауглероживания. Для восстановления активности через 400-600 часов работы активный оксид алюминия регенерируется паровоздушной смесью [1]. Однако такая регенерация не позволяет в полной мере удалить кокс с поверхности катализатора, часть его неизбежно остается. Так же существует опасность спекания катализатора в связи с образованием полимера стирола, что в свою очередь снижает срок службы катализатора.

Одним из перспективных вариантов решения перечисленных проблем является применение сверхкритической флюидной экстракционной регенерации катализатора.

Сверхкритическая флюидная (СКФ) технология обладает значительными преимуществами по сравнению с паровоздушной регенерацией. Растворяющая способность, плотность и транспортные свойства веществ при переходе от жидкой

или газовой фаз к сверхкритическому (СК) состоянию значительно изменяются. При этом, СКФ имеют физические свойства жидкости, например, растворяющая способность и высокая плотность, и диффузионные свойства газа, такие как, высокая диффузия, сжимаемость, заполнение всего объема емкости. СК среда представляет собой уникальное сочетание теплопроводящих свойств и растворяющей способности [2].

Для осуществления процесса сверхкритической флюидной экстракционной регенерации создана экспериментальная установка (рис. 1). Экспериментальная установка имеет возможность использования как чистого, так и модифицированного флюидного экстрагента [3].

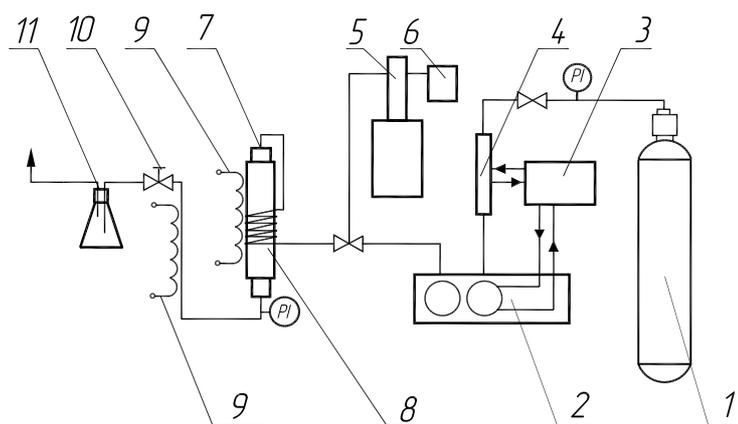


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – газовый баллон; 2 –насос для CO₂; 3 – агрегат холодильный 4 – конденсатор; 5 –насос для соразтворителя; 6 – емкость с соразтворителем; 7 – ячейка; 8 – теплообменник; 9 – ТЭНы, 10 – дросселирующий вентиль, 11 – сборник экстракта

Основным элементом установки является жидкостной плунжерный насос. Подача жидкого CO₂ на контур всасывания способствует нормальной работе насоса. Для этого предусмотрен конденсатор. Одной из конструктивных особенностей жидкостного насоса является наличие двух плунжерных головок, которые сглаживают пульсацию потока флюида, что позволяет достичь высокий уровень равномерности подачи газа.

Применяемые обратные клапаны, предотвращают возврат жидкости и газа обратно в насосы.

Теплообменник представляет собой толстостенную медную трубу, куда помещается экстракционная ячейка. ТЭН, намотанный на теплообменник в виде металлического кабеля, позволяет осуществлять нагрев. Температура ячейки поддерживается постоянной с помощью электронного измерительного регулятора 2ТРМ1. Для контроля температуры на концах ячейки установлены хромель-копелевые термопары. Точность измерения температуры $\pm 0,05$ °С.

Для определения количества извлеченных веществ, дезактивирующий катализатор, активный оксид алюминия взвешивают до и после эксперимента на весах с точностью измерений $\pm 10^{-6}$ кг.

Процесс сверхкритической флюидной экстракционной регенерации катализатора оксид алюминия активный проведен на изотерме 150 °С в диапазоне давлений 10÷30 МПа. Результаты представлены на рис. 2.

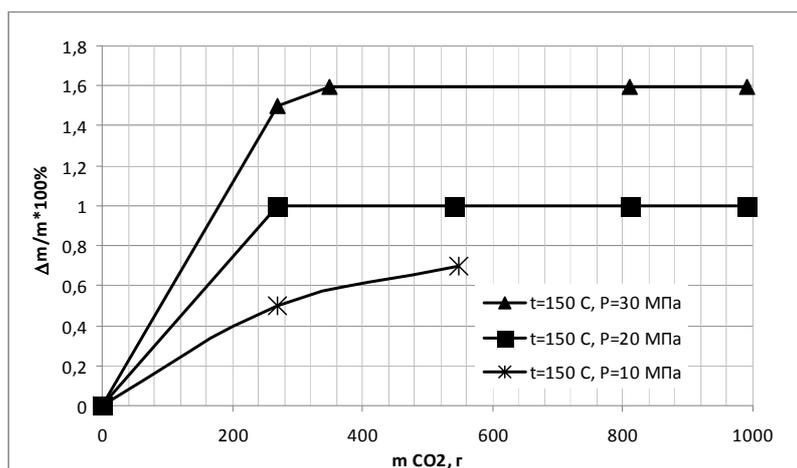


Рис. 2. Кинетика сверхкритической флюидной экстракционной регенерации катализатора оксид алюминия активный с использованием чистого СК CO₂

Из рис. 2 видно, что наблюдается уменьшение первоначальной массы катализатора, что указывает на принципиальную возможность регенерации активного оксида алюминия предлагаемым методом. Изменение режимных параметров и физико-химической природы экстрагента позволяют достигнуть большой эффект регенерации, путем модификации той или иной полярной добавкой. К тому же, метод сверхкритической флюидной экстракционной регенерации катализатора не вызывает разрушение поверхностной структуры, которое происходит при паровоздушной регенерации.

Для определения активности катализатора оксид алюминия активный измерены селективность и конверсия регенерированного чистым СК CO₂ катализатора. На рис. 3 представлена схема установки.

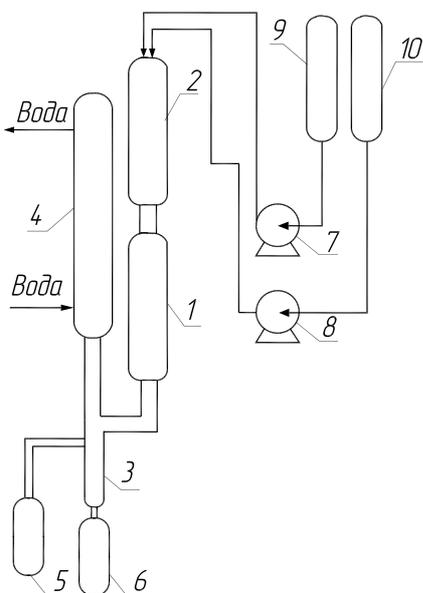


Рис. 3. Установка для исследования процессов парофазной дегидратации МФК:
 1 – реактор; 2 – испаритель; 3 – сепаратор; 4 – обратный холодильник; 5 – сборник углеводородной фракции катализата; 6 – сборник водной фракции катализата; 7 – насос подачи МФК; 8 – насос подачи воды; 9 – емкость с МФК; 10 – емкость с водой

Фракция МФК насосом 7 из емкости 9 подается в испаритель 2, который заполнен битым кварцевым стеклом. Также в испаритель 2 насосом 8 из емкости 10 подается дистиллированная вода, где при температуре 300 °С происходит их испарение. Из испарителя пары воды и МФК поступают в реактор 1, где протекает реакция дегидратации. Сюда же в реактор загружают активный оксид алюминия. Продукты реакции, выходящие из нижней части реактора, поступают в обратный холодильник 4 для конденсации. Далее конденсат стекает в сепаратор 3, который позволяет разделить конденсат на углеводородную и водную фракции. Из сепаратора верхний слой, который представляет из себя углеводородную фазу, поступает в приемник 5, а нижний слой – водная фаза в приемник 6. Затем углеводородная фаза, называемая катализатором, из емкости 5 подвергается хроматографическому анализу. Эксперимент проводят при следующих условиях: весовое соотношение МФК: H₂O = 1:1, расход МФК и H₂O – 45 см³/ч, объем катализатора в реакторе – 100 см³. Процесс парофазной дегидратации МФК длится 10 часов.

Результаты проверки конверсии МФК и селективности катализатора оксид алюминия активный представлены в таблице.

Результаты сверхкритической флюидной экстракционной регенерации катализатора оксид алюминия активный позволяют сделать вывод об эффективности рассматриваемого метода, по сравнению с традиционным.

Таблица. Результаты конверсий и селективности МФК

	Свежий катализатор	Регенерированный катализатор	
		паровоздушной смесью	СК CO ₂
Конверсия МФК, %	99,80	99,69	99,77
Селективность образования стирола (на разложенный МФК), % мол.	100	86,99	93,97

Литература

- [1] Регламент ц. 2508 ПАО «Нижнекамскнефтехим».
- [2] Гумеров Ф.М., Сагдеев А.А., Билалов Т.Р. и др. Катализаторы: регенерация с использованием сверхкритического флюидного CO₂-экстракционного процесса: монография. Казань: изд-во «Бриг». 2015. 264с.
- [3] Патент на полезную модель РФ № 99340 опубл. 20.11.2010.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООТДАЧИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В ПОДОГРЕВАТЕЛЕ НЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ ПНК-1,9

Печенегов Ю.Я., Першина Ю.В., Вокин И.А.*

Энгельсский технологический институт (филиал СГТУ им. Гагарина Ю.А.).

E-mail: mxp@techn.sstu.ru

**Филиал Самарского государственного технологического университета (г. Сызрань).*

E-mail: epp-syzran@yandex.ru

Для обезвоживания и обессоливания нефтяной эмульсии на промыслах производится ее нагрев до температуры 60-90 °С. Нагрев осуществляется в огневых подогревателях различных типов. В последнее время получают распространение подогрева-

тели типа ПНК, которые выпускаются Сызранским заводом «Нефтемаш» с номинальной тепловой мощностью 0,73; 1,9 и 3 МВт. По отношению к аналогам подогреватели типа ПНК обладают рядом преимуществ, которые обусловлены сочетанием косвенного, через промежуточный теплоноситель, и прямого способов передачи тепла от продуктов сгорания топлива к стенкам продуктового змеевика. Комбинирование прямого и косвенного нагрева обеспечивает малые металлоемкость и габариты, работу подогревателя без отложений кокса на внутренней поверхности труб продуктового змеевика. Имеется возможность увеличивать, при необходимости, температуру нагрева эмульсии до 100-150 °С.

В условиях переменного дебита нефтяных скважин часто возникает необходимость увеличить тепловую мощность подогревателя сверх номинальной величины для нагрева нефтяной эмульсии с повышенным ее расходом. Осуществить это возможно путем интенсификации лимитирующего теплопередачу процесса теплоотдачи со стороны греющего теплоносителя – дымовых газов.

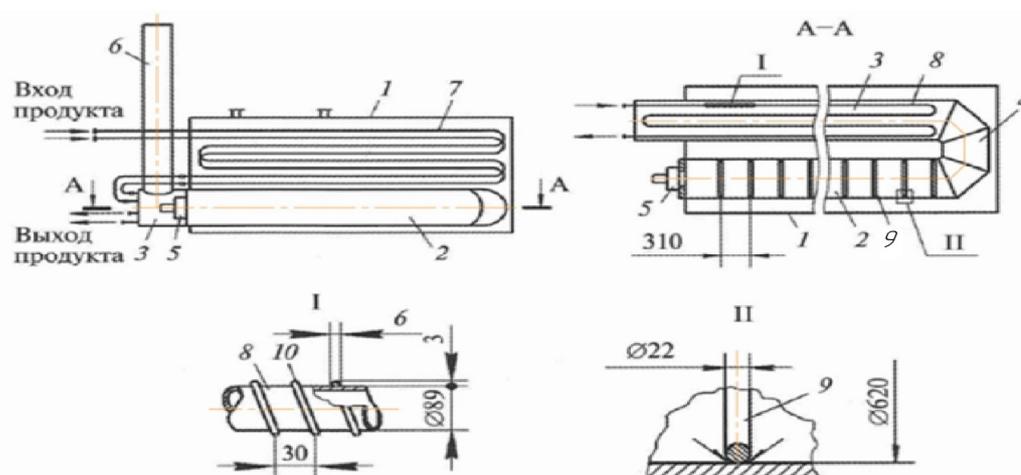


Рис. 1. Схема подогревателя: 1 – корпус; 2 и 3 – высокотемпературная и низкотемпературная зоны жаровой трубы; 4 – поворотная камера; 5 – горелка; 6 – дымовая труба; 7 – часть продуктового змеевика, размещенная в промежуточном теплоносителе; 8 – часть продуктового змеевика, обтекаемая продуктами сгорания топлива; 9 – кольца-турбулизаторы; 10 – выступы-турбулизаторы.

Ниже приводятся результаты расчетов, цель которых состояла в определении рабочих характеристик подогревателя ПНК-1,9 при оснащении его дополнительными средствами интенсификации теплоотдачи дымовых газов к поверхностям нагрева.

Схема подогревателя ПНК-1,9 приведена на рис. 1. Дымовой газ в U-образной жаровой трубе последовательно проходит ее высокотемпературную часть,

снабженную размещенными на стенках кольцами-турбулизаторами для интенсификации конвективного теплообмена, поворотную камеру, где поток разворачивается на 180°, и низкотемпературную часть. В низкотемпературной части жаровой трубы располагается выходной участок продуктового змеевика, наружные поверхности труб которого имеют искусственную шероховатость в виде спиральной наплавки, которая служит интенсификатором конвективного теплообмена. Входной для продукта участок змеевика размещен в промежуточном теплоносителе – воде над жаровой трубой. Поверхность теплопередачи со стороны дымовых газов включает в себя стенки жаровой трубы и выходной части продуктового змеевика.

На основании результатов сравнительных расчетов по определению эффективности различных пассивных способов интенсификации теплоотдачи дымовых газов рекомендованы к реализации следующие решения:

- в хвостовой зоне высокотемпературной части жаровой трубы, примыкающей к поворотной камере, устанавливается вторичный излучатель в виде крестовины из листов жаростойкой стали или из чугуна; на поверхностях крестовины имеются выступы-турбулизаторы;
- в поворотной камере устанавливается в диаметральной направлении вертикальная перегородка из листа жаростойкой стали или из чугуна;
- на стенках низкотемпературной части жаровой трубы размещаются проволочные турбулизаторы.

При выполнении расчетов использовались методические рекомендации по определению характеристик конвективного и радиационного теплообмена, приведенные в [2, 3]. Размеры турбулизаторов определены как оптимальные в соответствии с рекомендациями [3]. Теплота сгорания топливного газа принималась равной 46,7 МДж/м³.

Схема жаровой трубы с интенсификаторами теплообмена приведена на рис. 2.

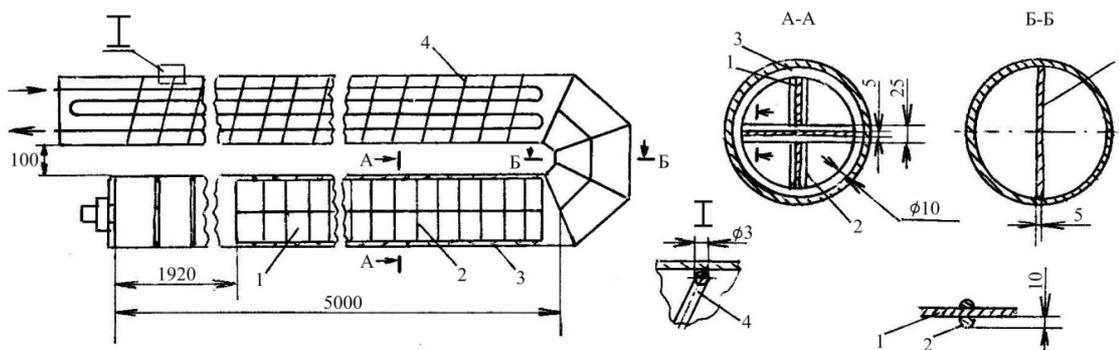


Рис. 2. Жаровая труба с интенсификаторами теплообмена: 1 – крестовина; 2 – выступы-турбулизаторы; 3 – кольцевые турбулизаторы; 4 – проволочные турбулизаторы; 5 – перегородка.

Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 3-5.

Из рис. 3 видно, что с увеличением тепловой мощности Q подогревателя удельный расход топливного газа B/Q возрастает и он выше для исходного подогревателя (до модернизации), чем для подогревателя, оснащенного дополнительными интенсификаторами теплообмена (после модернизации). Такому характеру зависимости $B/Q = f(Q)$ соответствует представленное на рис. 4 изменение коэффициента полезного действия η подогревателя от Q .

Из рис. 4 видно, что с ростом Q (или расходом топлива B) величина η уменьшается. Это обусловлено увеличением температуры уходящих из подогревателя газов t_{yx} по мере возрастания Q . Так, при $B = 174$ м³/ч, что соответствует номинальной тепловой мощности подогревателя $Q = 1,9$ МВт, температура уходящих газов $t_{yx} = 240$ °С до модернизации и $t_{yx} = 184$ °С после модернизации, а при $B = 305$ м³/ч она составляет соответственно 324 °С и 252 °С.

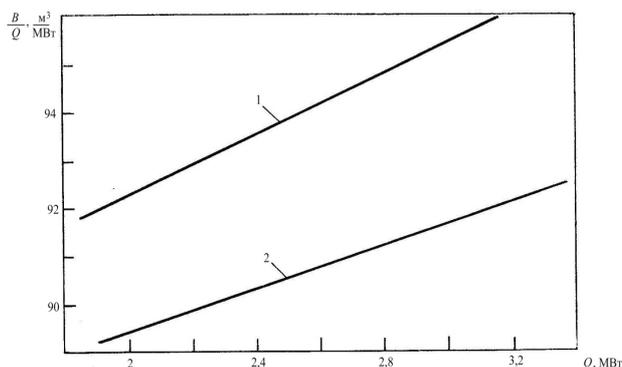


Рис. 3. Зависимость B/Q от Q : 1 – до модернизации; 2 – после модернизации.

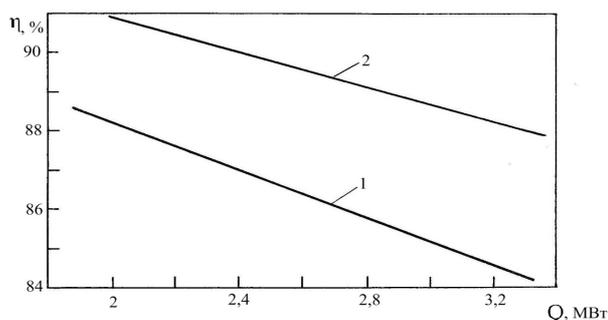


Рис. 4. Зависимость η от Q : 1 – до модернизации; 2 – после модернизации

Из рис. 5, где представлена зависимость максимальной температуры крестовины t_{\max} на стороне натекания на нее продуктов горения топлива от Q модернизированного подогревателя, видно, что $t_{\max} \geq 1000$ °С. Это потребует применения жаростойких материалов для изготовления крестовины.

Увеличение тепловой мощности подогревателя приводит к росту скорости и потери давления потока нагреваемого продукта в змеевике и к возрастанию противодавления ΔP_T в точном объеме жаровой трубы. Величина ΔP_T при $B = 261$ м³/ч, например, составляет 75 мм.вод.ст. Горелка ГСАУ-3000, которой оснащен подогреватель, вполне обеспечит такое и даже большее противодавление в топке. Номинальные характеристики горелки следующие: тепловая мощность – 3 МВт; давление газа перед горелкой – $P_T \geq 20$ кПа; давление воздуха перед горелкой $P_B \geq 1,2$ кПа. Коэффициент рабочего регулирования горелки по паспортным данным равен 3.

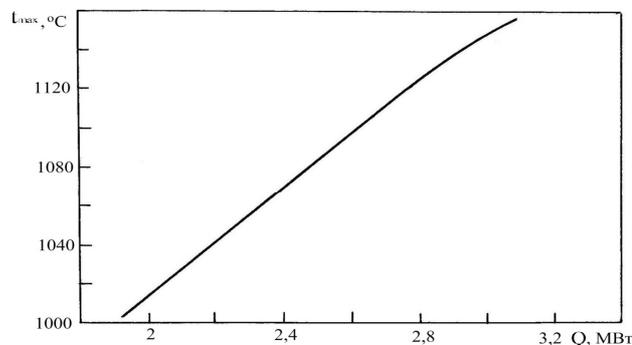


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры крестовины t_{\max} от Q

Испытания подогревателя, результаты которых приведены в [1], показали, что горелка устойчиво работает при снижении тепловой мощности Q подогревателя в четыре раза по отношению к номинальной величине. При проведении испытаний [1] расход природного газа доводили до $B = 50$ м³/ч.

Таким образом, можно заключить, что подогреватель ПНК-1,9 с установленными в нем дополнительными интенсификаторами теплообмена дымовых газов может обеспечить устойчивую работу в широком диапазоне тепловых нагрузок при изменении расхода топливного газа от 50 до 300 м³/ч. Соответственно, расход продукции нефтяных скважин через модернизированный подогреватель может варьироваться в широких пределах и изменяться не менее, чем в шесть раз.

Литература

- [1] Печенегов Ю.Я., Мыдлык А.Л., Бутузов А.В. и др. Результаты испытаний подогревателя нефти ПНК-1,9 с интенсифицированным теплообменом продуктов горения топлива. Тр. Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена. М.: Издательский дом МЭИ. 2006. С.274-277.
- [2] Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. М.: Энергия. 1975. 280с.
- [3] Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение. 1990. 208с.

ОПТИМАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА ТИПА «ГАЗ-ГАЗ»

Печенегов Ю.Я., Першина Ю.В., Малышева Е.А.
*Энгельсский технологический институт (филиал СГТУ им. Гагарина Ю.А.).
E-mail: mxp@techn.sstu.ru*

В [1] предложен новый пластинчатый теплоутилизатор для газовых сред, работающий по схеме противотока и обладающий рядом преимуществ по отношению к известным аналогам. Теплоутилизатор состоит из набора однотипных гладких пластин, выполненных из теплопроводного материала (металл или пластмасса). Пластины образуют прямые щелевые каналы. Потоки охлаждаемого и нагреваемого газовых теплоносителей перемещаются навстречу друг другу по смежным каналам. Передача теплоты от одного потока к другому осуществляется через разделяющие их гладкие пластины.

В данной работе приводятся результаты расчетов по определению оптимальных скорости и средней разности температур теплоносителей.

Выполненные расчеты показывают, что энергетическая эффективность теплообмена в щелевом канале увеличивается при уменьшении ширины канала a . Учитывая технологические ограничения при изготовлении и эксплуатации теплоутилизаторов, можно рекомендовать принимать a в интервале от 2 до 10 мм.

Согласно [2], при одинаковых расходах горячего G_1 и холодного G_2 теплоносителей ($G_1 = G_2 = G$, кг/с) коэффициент теплопередачи в теплоутилизаторе $k = 0,5\alpha$, где коэффициент теплообмена α для турбулентных потоков определяется по формуле $\alpha = 3,34w^{0,8} / a^{0,2}$, Вт/(м²·К), а отношение затрачиваемой на перемещение теплоносителей мощности N к площади поверхности теплопередачи $N/F = 0,0027w^{2,8} / a^{0,2}$, Вт/м².

Формулы для k и N/F записаны с учетом численных значений теплофизических свойств теплоносителей, которые определены для воздуха при температурных условиях работы приточно-вытяжных вентиляционных систем.

Определение оптимальной скорости теплоносителей производилось по критерию оптимальности, в качестве которого принималась переменная часть годовых приведенных затрат, руб./год:

$$Z = (C_m M_m + C_n N)(p_n + p_a) + \tau \cdot C_{эл} \cdot N, \quad (1)$$

где C_m – цена на материал теплопередающих пластин с учетом стоимости их монтажа; M_m – масса материала пластин, $M_m = F \cdot \delta \cdot \rho_m$, кг; δ – толщина пла-

стин, м; ρ_m – плотность материала пластин, кг/м^3 ; C_n – стоимость единицы установленной мощности вентиляторов с учетом стоимости их монтажа (принималось 4000 руб/кВт); ρ_n – нормативный коэффициент (равен 0,12 год⁻¹); ρ_a – коэффициент амортизационных отчислений (равен 0,13 год⁻¹); τ – число часов работы в год; $C_{эл}$ – стоимость электроэнергии, затраченной на привод вентиляторов (принято 4 руб/(кВт·ч)).

Исследование функции (1) на экстремум привело к зависимости для оптимальной скорости, м/с:

$$w_{\text{опт}} = 1,8 C_M^{0,35} \cdot a^{0,07} \quad (2)$$

Минимум 3 по скорости выражен достаточно четко и отклонения от более чем на $\pm 0,2$ м/с приводят к существенному увеличению совокупных затрат.

На рис. 1 приведены результаты расчета $w_{\text{опт}}$ по уравнению (2) при разных C_M и a . Видно, что особенно значительно изменение $w_{\text{опт}}$ в области $C_M < 100$ руб/кг.

Для квадратной формы поперечного сечения теплоутилизатора число теплопередающих пластин при оптимальной скорости теплоносителей

$$n = 0,935 G^{0,5} / (C_M^{0,175} \cdot a^{1,035}) \quad (3)$$

При этом ширина утилизатора составит $a \cdot n$, высота $h = a \cdot n$, а его длина

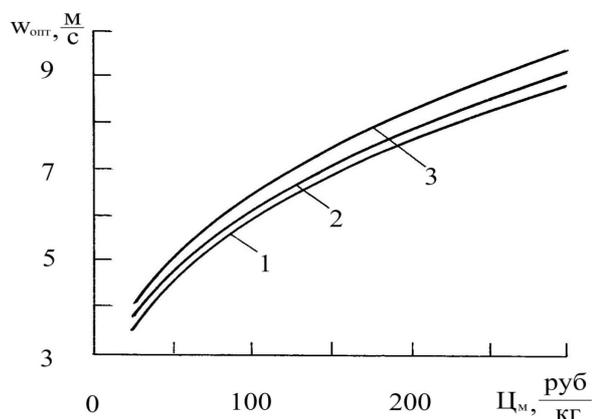


Рис. 1. Зависимость $w_{\text{опт}}$ от C_M : 1 – $a = 3$ мм; 2 – 5 мм; 3 – 10 мм.

$b = Q / (h \cdot n \cdot k \cdot \Delta t)$, где Q – передаваемая тепловая мощность; Δt – средняя разность температур теплоносителей:

$$\Delta t = \frac{1 - \varepsilon}{t_{1,н} - t_{2,н}}, \quad (4)$$

ε – коэффициент рекуперации теплоты, равен отношению Q к теоретически возможной тепловой мощности в данных температурных условиях; $t_{1,н}$ и $t_{2,н}$ – начальные температуры горячего и холодного теплоносителей.

Оптимальное значение Δt определялось по максимуму получаемой в течение года экономии

$$\Xi = \Xi_Q - 3, \quad (5)$$

где Ξ_Q – стоимость переданной тепловой энергии, $\Xi_Q = Q \cdot C_Q \cdot \tau$;

C_Q – цена тепловой энергии.

Расчеты с использованием (5) и (1) при оптимальной скорости $w_{\text{опт}}$ и $C_Q = 477$ руб./ГДж показали, что функция (5) имеет максимум, соответствующий оптимальной разности температур $\Delta t_{\text{опт}}$. Полученные значения $\Delta t_{\text{опт}}$ представлены на рис. 2 в виде зависимости от ширины каналов a при $C_m = 50$ и 300 руб/кг. Видно, что $\Delta t_{\text{опт}}$ увеличивается с ростом a и C_m .

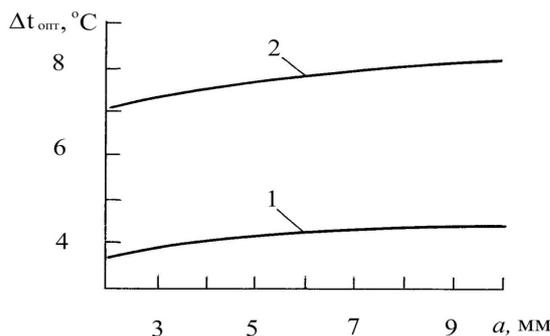


Рис. 2. Зависимость $\Delta t_{\text{опт}}$ от a : 1 – $C_m = 50$ руб/кг; 2 – 300 руб/кг.

Реализация оптимальных характеристик для теплоутилизатора [1] дает возможность обеспечивать наибольшую его экономическую эффективность.

Согласно расчетам, величина Ξ по (5), приходящаяся на один канал теплоутилизатора с оптимальными характеристиками, составляет $2,95 \cdot 10^3$ руб/год при $C_m = 50$ руб/кг и она равна $3,7 \cdot 10^3$ при $C_m = 300$ руб/кг. Совокупная экономия, получаемая при использовании теплоутилизатора, может быть определена умножением данных значений Ξ на число каналов n , которое определяется формулой (3) и зависит от расходов G потоков теплоносителей.

Литература

- [1] Патент №2416764 РФ, МПК F 24 F 7/0. Теплоутилизатор/ Печенегов Ю.Я., Яковлева В.М., Шаров А.В., Абакумов Ю.В. *Открытия. Изобретения.* 2011. №11.
- [2] Печенегов Ю.Я. Технико-экономический анализ и методика расчета оптимизированных пластинчатых теплоутилизаторов. *Промышленная теплоэнергетика.* 2013. №3. С.46-49.

УВЕЛИЧЕНИЕ МАССООБМЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ОБОРУДОВАНИИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Дмитриева О.С., Камалиева К.В.

Нижекамский химико-технологический институт (филиал КНИТУ). E-mail: ja_deva@mail.ru

В настоящее время энергоэффективность и энергосбережение входят в пять стратегических направлений приоритетного технологического развития экономики России. Согласно оценкам Международной финансовой корпорации и Всемирного

банка, потребление энергоресурсов в России может быть уменьшено в промышленности более чем в 2 раза [1]. Стратегической задачей является снижение удельной энергоёмкости валового внутреннего продукта не менее чем в 2.3 раза к 2030 году [2]. Одним из наиболее эффективных способов энергосбережения является модернизация существующих теплообменных аппаратов, которая заключается в использовании современных высокоэффективных контактных устройств взамен устаревших. При этом главными недостатками тарельчатых устройств является высокое гидравлическое сопротивление, недостатком насадочных устройств – узкий диапазон устойчивой работы. Гидравлическое сопротивление возникает при прохождении газом контактных элементов и слоя жидкости. Для его преодоления требуется создать избыточное давление, на которое расходуется большая часть энергии.

Исходя из вышеперечисленного, можно сделать вывод, что снижение затрат на энергию будет возможно только лишь при внедрении в производство новых массообменных устройств, имеющих высокую производительность и низкое гидравлическое сопротивление. Для решения этой задачи может быть использовано струйно-барботажное контактное устройство, конструкция которого представлена на рис. 1 и предложена авторами в работе [3]. Контактное устройство состоит из сливных стаканов, расположенных в шахматном порядке. Стаканы в каждом ряду соединены между собой с помощью стержня, при этом стаканы открыты с верхнего своего конца, а днище снабжено некоторым множеством сливных отверстий для жидкости. Стержень может нести требуемое количество сливных стаканов, располагаясь в одном слое на одном горизонтальном уровне, образуя тарелку. Расстояния между соседними стержнями определяются размерами сливных стаканов.



Рис. 1. Вид сверху на струйно-барботажное контактное устройство

Через отверстия в днищах жидкость стекает на нижележащие тарелки в виде струй, которые при падении распадаются на капли. Стекающая жидкость создает в пространстве между тарелками завесу из струй и капель, вызывая на поверхности нижележащих тарелок активное перемешивание жидкости. Падающие капли увлекают за собой в слой жидкости отдельные пузырьки газа вызывая дополнительную интенсификацию процесса за счет перемешивания жидкости и дополнительного контакта фаз на поверхности пузырьков.

Разработанное авторами контактное устройство может быть использовано в теплообменной аппаратуре с целью повышения интенсивности массообменных

процессов в оборудовании теплоэнергетических установок, в частности в декарбонизаторах для удаления из воды растворенной угольной кислоты, являющейся катализатором кислородной коррозии.

Производительность массообменных процессов напрямую связана с площадью поверхности контакта между фазами и эффективностью передачи вещества из одной фазы в другую. В струйно-барботажном контактном устройстве эти факторы зависят от того как происходит распад струй. Целью данного исследования является моделирование и оценка распада струи воды при истечении через отверстия разных форм в днище тарелки. При этом истечение струй из отверстий и их последующий распад на капли является сложным гидродинамическим процессом. Распад струи был смоделирован в программном комплексе FlowVision. На рис. 2 показана модель отдельно взятого отверстия диаметром 4 мм, размер сливного стакана 60×60 мм, температура воды 30 °С, плотность орошения 5,8–14,2 м³/(м²·ч), температура воздуха 70 °С, удельный расход воздуха 20 м³/м³.

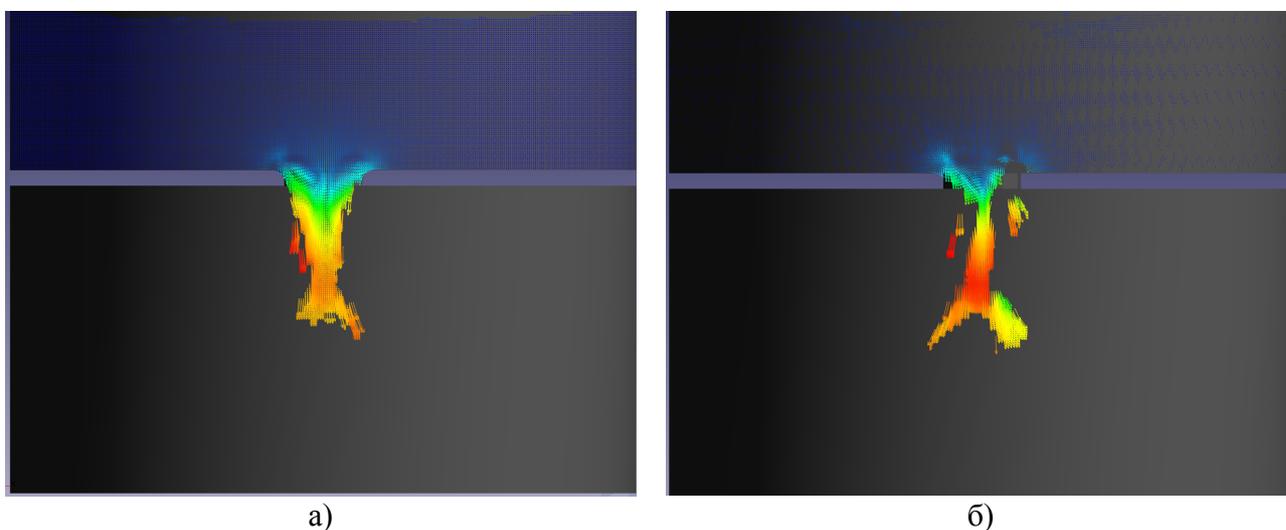


Рис. 2. Модель истечения воды через круглое отверстие:
а) с закругленной кромкой, б) с прямой кромкой

На рис. 2а видно, что в начале истечения струя распадается более активно из отверстия с закругленной кромкой. При выходе из отверстия под действием шероховатостей его наружной кромки струя воды приобретает небольшие возмущения (рис. 2б). На характер возмущения влияет также следующие факторы: отклонение выходного отверстия от правильной цилиндрической формы, наличие пузырьков воздуха в струе, степень сжатия струи и тому подобное. Под воздействием возмущений частицы воды, находящиеся на поверхности струи, испытывают различного рода смещения, что приводит к деформации струи. Между тем силы поверхностного натяжения стремятся сократить общую поверхность струи; и возмущенные частицы воды возвращаются в прежнее положение. В результате взаимодействия внешних возмущений и сил поверхностного натяжения воды на поверхности струи возникают колебания. По мере истечения амплитуда колебаний увеличивается, и струя распадается на отдельные частицы.

Результаты исследований показали, что при прочих равных условиях изменение количества отверстий в сливном стакане существенно влияет на коэффициент массоотдачи в жидкой фазе. Увеличение количества отверстий и их диаметра приводит к

росту коэффициента массоотдачи в жидкой фазе, так как растет площадь поверхности, вовлекаемой жидкости в контактном элементе.

Таким образом, применение разработанного контактного устройства в декарбонизаторах позволяют обеспечить нормативное качество декарбонизации 3–5 мг/дм³ при минимально необходимых для этого затратах, увеличить массообменную эффективность протекающего процесса.

Литература

- [1] Энергоэффективность в России: скрытый резерв. Отчет, подготовленный экспертами Всемирного банка, Международной финансовой корпорации и Центра по эффективному использованию энергии. **2008**.
- [2] Энергетическая стратегия России на период до 2030 года (ЭС-2030), утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 г. № 1715-р.
- [3] Заявка № 2015119123 на полезную модель «Струйно-барботажное контактное устройство для тепломассообменных процессов». А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев, Г.С. Сагдеева, А.Н. Николаев, заявл. 30.04.2015.

АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ

Степанов А.Ю., Алешин А.В., Карпов Д.С.
Тамбовский государственный технический университет.
E-mail: mahp@tambov.ru

Одним из перспективных методов экстрагирования из твердого в жидкость является процесс экстрагирования в роторном импульсном аппарате (РИА), где экстрагирование осуществляется за счет механических, гидродинамических и акустических факторов воздействия на обрабатываемую суспензию. Интенсивное физическое воздействие инициировано пульсациями давления и скорости потока в каналах ротора и статора, в рабочей камере, больших градиентов скоростей в зазоре между ротором и статором, турбулентности и развитого эффекта кавитации. Данные виды воздействия способствуют увеличению поверхности фазового контакта и относительных скоростей движения фаз, что в свою очередь, способствует интенсификации экстрагирования целевых компонентов при относительно низких энергетических затратах.

Лабораторная установка на базе РИА-250 показана на рис. 1. Основными рабочими элементами установки являются: поз.1 – РИА-250, поз.2 – центробежный насос К50/30, поз.3 – емкость для исходных компонентов, оборудованная ленточной мешалкой.

РИА предназначен для импульсной энергетической многофакторной обработки гетерогенных жидкостей. В аппарате возможна обработка жидкостей, содержащих включения с объемной концентрацией до 50%, размером частиц до 0,1 мм, кинематической вязкостью до 30×10^{-6} м²/с, температурой от -20⁰С до +100⁰С.

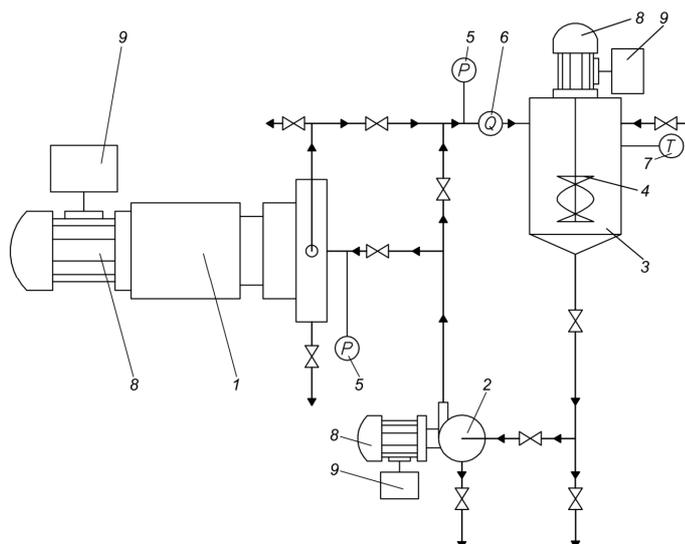


Рис. 1. Схема установки РИА-250: 1 – РИА; 2 – насос; 3 – емкость; 4 – ленточная мешалка; 5 – манометр; 6 – расходомер; 7 – термометр; 8 – электродвигатель; 9 – частотный преобразователь

Увеличение концентрации твердой фазы и размера частиц в обрабатываемой жидкости возможно, но при условии, что твердость частиц меньше твердости материала.

Технические данные РИА-250, приведены в таблице.

Таблица

Диаметр ротора, мм	Число каналов ротора, статора	Зазор между ротором и статором, мм	Частота вращения, об/мин	Производительность (по воде), м ³ /ч	Эл. двигатель, кВт	Масса аппарата с эл. двигателем, кг
250	36	0,1-0,2	3000	40	18,5	180

РИА приводится во вращение асинхронным электродвигателем: АИР-160М2У3, 380 В, мощностью 18,5 кВт. Для плавного пуска и плавного регулирования скорости вращения вала асинхронного электродвигателя, управление происходит с использованием частотного преобразователя ВЕСПЕР EI-7011-100Н (мощностью до 75 кВт). Центробежный насос К50/30 обеспечивает подачу компонентов производительностью 50 м³/ч, и приводится во вращение асинхронным электродвигателем: 5АИ160S2У2, 380 В, мощностью 15 кВт. Пуск и регулирование частоты вращения вала насоса осуществляется частотным преобразователем TOSHIBA TOSVERT VF-S11(мощностью до 15 кВт). Ленточная мешалка, установленная в емкости исходных компонентов (поз.3,4), необходима для предотвращения забивания выходного штуцера в следствии оседания твердых частиц на дно емкости. Приводится во вращение асинхронным электродвигателем: АИР80Е4У3, 380 В, мощностью 1,5 кВт. Пуск и регулирование частоты вращения вала привода мешалки осуществляется частотным преобразователем ВЕСПЕР EI-9011-007Н (мощностью до 5,5 кВт).

На данной установке выполнен ряд экспериментальных исследований по экстрагированию гуминовых кислот из различного типа гуматосодержащего сырья (биогуруса и сапропеля). Выполнялось щелочное экстрагирование, с добавлением 1% гидроксида калия (КОН).

В результате проведенных экспериментов на основе суспензии биогуруса в про-

центном соотношении 20/79/1 (биогу́мус, вода, щелочь), при щелочном экстрагировании в РИА-250 и в аппарате с ленточной мешалкой, получены данные по выходу ГК, представленные диаграммами 1, 3, 5, на рис. 2.

Данные по щелочному экстрагированию из сапропеля в процентном соотношении 50/49,5/0,5 (сапрпель, вода, щелочь) представлены диаграммами 2, 4, 6, на рис. 2.

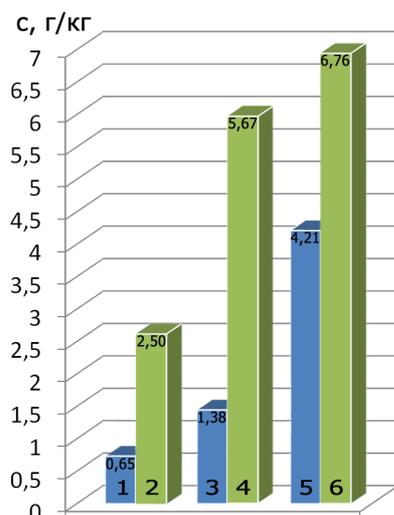


Рис. 2. Концентрация гуминовых кислот в воде при щелочной обработке суспензии биогу́муса (1, 3, 5) и суспензии сапропеля (2, 4, 6)

Обработка суспензий ленточной мешалкой: **1** – рН = 12,6; **2** – рН = 10,6.

Обработка суспензий в роторном импульсном аппарате со слабым кавитационным режимом: **3** – рН = 12,5; **4** – рН = 10,5.

Обработка суспензий в роторном импульсном аппарате с интенсивным кавитационным режимом: **5** – рН = 12,5; **6** – рН = 10,5.

Анализируя данные по результатам экстрагирования, показанные на рис. 2, можно сделать вывод, что в РИА-250, при интенсивной кавитационной обработке, процесс щелочной экстракции ГК из биогу́муса происходит в 6 раз интенсивнее по сравнению с обработкой в аппарате с ленточной мешалкой (диаграммы 1 и 5). А процесс щелочной экстракции ГК из сапропеля происходит почти в 3 раза интенсивнее (диаграммы 2 и 6). При режиме работы РИА-250 со слабым кавитационным эффектом, результаты экстрагирования в 2 раза выше по сравнению с обработкой в аппарате с ленточной мешалкой.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали интенсификацию процесса экстрагирования ГК в воду при обработке на РИА-250 по сравнению с обработкой в аппарате с ленточной мешалкой.

ПЕРЕРАБОТКА ОТРАБОТАННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ШПАЛ

Тунцев Д.В., Хайруллина М.Р., Хайруллина Э.К., Романчева И.С.
*Казанский национальный исследовательский технологический университет.
E-mail: 09111991m@gmail.ru*

Сложившаяся в стране ситуация с образованием, обезвреживанием, хранением и захоронением промышленных отходов ведет к ухудшению состояния природной среды.

Большинство видов производств и отраслей народного хозяйства не может переработать все количество собственных отходов. К таким производствам относится и железнодорожная отрасль, где образуется достаточно большое количество отходов, в том числе и опасных. Отходы железнодорожного транспорта могут быть загрязнены нефтепродуктами, содержать различные органические соединения, а также тяжелые металлы и ртуть [1].

Практически все наиболее опасные отходы 1 и 2 классов железнодорожной отрасли передаются для обезвреживания специализированным сторонним организациям. Отходы 4 и 5 классов опасности, как практически неопасные, не создают для ОАО "РЖД" больших проблем по вторичному использованию и захоронению. Основные проблемы возникают при работе с отходами 3 класса опасности, для использования и утилизации которых требуются экологически чистые технологии.

Согласно федеральному классификационному каталогу отходов отработанные древесные шпалы - это готовые изделия, потерявшие свои потребительские свойства (Код 1712060013013), относящиеся к твердым органическим отходам 3 класса опасности [2]. Ежегодно после ремонта железнодорожных путей скапливается огромное количество деревянных шпал, отслуживших свой срок, а решений об их утилизации пока нет. Нередко отработанные деревянные шпалы складывают на территории предприятий путевого хозяйства или оставляют разбросанными вдоль железнодорожных путей, законодательство Российской Федерации за такое несанкционированно размещенные отходы, в местах, не предусмотренных для их хранения, предусматривает строгую административную ответственность и огромные размеры штрафных санкций, которые постоянно ужесточаются [3, 4].

На базе кафедры «Переработки древесных материалов» была разработана технологическая схема утилизации отработанных деревянных шпал методом термокондуктивного пиролиза, схема которой представлен на рис. 1.

Термокондуктивный пиролиз – это одна из развивающихся направлений термохимической переработки различного вида сырья. Такой вид пиролиза целесообразно использовать для получения жидких продуктов с высоким выходом [5].

Основные условия процесса термокондуктивного разложения:

- высокие потоки тепла, интенсивная теплопередача достигается измельчением сырья и механоактивацией процесса;
- тщательный контроль температуры (500-550 °С) и времени пребывания ПГС в реакторе (не более 1с);
- быстрое охлаждение парогазовой смеси [6].

Предварительно измельченное сырье из приемного бункера подается в загрузочное устройство, откуда поступает в реактор пиролиза, где при $T=500-550$ °С происходит его полное разложение. Уголь, полученный в результате разложения ОДШ, собирается в приемник твердых остатков, парогазовая смесь проходя через теплообменник

конденсируется, жидкая часть собирается в приемный резервуар для жидких продуктов, а неконденсированные газы сжигаются на факеле.

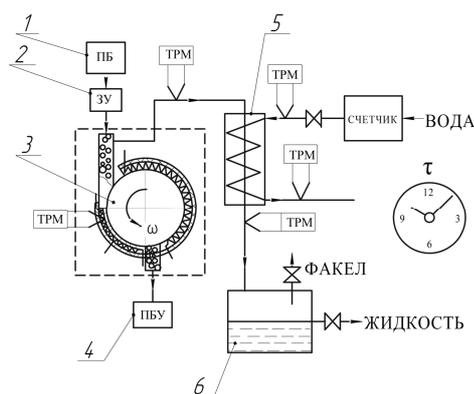


Рис. 1. Схема быстрого термокондуктивного пиролиза: 1 – приемный бункер биомассы лигнина; 2 – загрузочное устройство; 3 – реактор; 4 – приемник; 5 – теплообменник; 6 – приемный резервуар

Общий вид лабораторной установки термокондуктивного пиролиза ОДШ представлен на рис. 2.

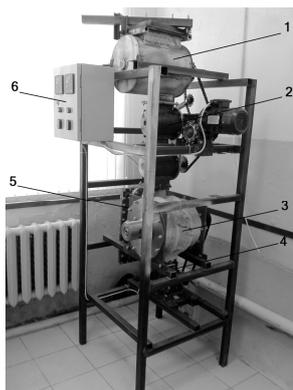


Рис. 2. Общий вид лабораторной установки термокондуктивного пиролиза ОДШ: 1 – приемный бункер сырья; 2 – загрузочное устройство; 3 – реактор пиролиза; 4 – приемный бункер угля; 5 – теплообменник; 6 – панель управления

В основе в основе работы установки лежит процесс передачи энергии от рабочей нагретой металлической поверхности на частицу ОДШ при непосредственном их контакте, при этом температура пиролиза определяется температурой металла. Эффективность процесса определяется, температурой поверхности металла и длительностью контакта металла с частицей [7]. Выход жидких продуктов пропорционально зависит от скорости химических превращений и обратно пропорционально – от времени пребывания продуктов в реакционной зоне [8].

Технические характеристики лабораторной установки термокондуктивного пиролиза ОДШ приведены в таблице.

Данная установка позволяет исследовать кинетику процесса термокондуктивного пиролиза ОДШ и получить материальный баланс процесса.

Таблица

Параметр, единица измерения	Величина
Производительность, кг/ч	5
Средний размер перерабатываемого сырья, мм	6
Рабочая температура, °С	450-600
Время пребывания частиц материала в реакторе, сек	0,7-6,0
Габаритные размеры, мм: ДхШхВ	721x717x2187

Литература

- [1] Тимербаев, Н.Ф. Утилизация твердых отходов деревопереработки, содержащих токсичные вещества [Текст]. Н.Ф. Тимербаев, Р.Г. Сафин, З.Г. Сатарова. *Вестник Казанского технологического университета*. **2011**. №4. С.79-84.
- [2] Тунцев, Д.В. Утилизация отработанных деревянных шпал методом пиролиза [Текст]. Д.В. Тунцев, М.Р. Хайруллина, Э.К. Хайруллина, А.С. Савельев, И.С. Романчева. *Stredoevropsky Vestnik pro Vedu a Vyzkum*. **2015**. Т.73. С.23.
- [3] Тунцев, Д.В. Ресурсосбережение при утилизации отработанных деревянных шпал [Текст]. Д.В. Тунцев, Р.Г. Сафин, Р.Г. Хисматов, М.Р. Хайруллина, Э.Е. Антипова, И.Ф. Гараева. *Вестник Казанского технологического университета*. **2015**. Т.18. №5. С.248-250.
- [4] Тунцев, Д.В. Современные направления переработки древесной биомассы [Текст]. Д.В. Тунцев, Р.Г. Хисматов, М.Р. Хайруллина, А.С. Савельев, И.С. Романчева. *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. **2015**. Т.3. №2-1(13-1). С.464-468.
- [5] Тунцев Д.В. Совершенствование технологии и оборудования процесса термического разложения древесины в кипящем слое: дис. ... канд. тех. наук: Казан. нац. исслед. технол. Ун-т. *Казань*. **2011**.
- [6] Тунцев, Д.В. Схема контактного пиролиза отходов лесозаготовки [Текст]. Д.В. Тунцев, Р.Г. Хисматов, А.М. Касимов, И.С. Романчева, А.С. Савельев. *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. **2014**. Т.2. №2-3(7-3). С.146-149.
- [7] Тунцев, Д.В. Разработка комплексной технологии термохимической переработки древесных отходов [Текст]. Д.В. Тунцев, А.М. Касимов, Р.Г. Хисматов, И.С. Романчева, А.С. Савельев. *Деревообрабатывающая промышленность*. **2014**. №4. С.50-55.
- [8] Tuntsev D.V., Filippova F.M., Khismatov R.G., Timerbaev N.F. Pyrolyzates: Products of plant biomass fast pyrolysis. *Russian Journal of Applied Chemistry*. **2014**. Vol.87. No.9. P.1367-1370.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ОТ УГЛА ОБТЕКАНИЯ КАПЕЛЬ И РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ НИМИ

Дугина А. В., Шипеева А.С.

Казанский государственный энергетический университет. E-mail: kgeu@kgeu.ru

Смесительными называются такие теплообменники, в которых теплопередача между горячей и холодной жидкостями осуществляется путем их непосредственного соприкосновения и перемешивания. Такие аппараты имеют довольно широкое распространение и применяются главным образом для охлаждения и нагревания газов при помощи воды или охлаждения воды при помощи воздуха. В частности, они при-

меняются в газовом производстве при кондиционировании воздуха при охлаждении воды в градирнях при конденсации пара.

Одним из определяющих факторов в работе смесительных теплообменников является поверхность соприкосновения. С этой целью жидкости обычно разбрызгиваются на мелкие капельки. Однако степень дробления в каждом случае должна выбираться в соответствии с конкретными условиями работы аппарата. Чем мельче капли, тем больше поверхность соприкосновения, но вместе с этим меньше и скорость падения капли. При этом скорость газа должна быть мала, в противном случае, капли будут летать или уноситься с воздухом. Поэтому степень разбрызгивания воды должна быть в соответствии со скоростью воздуха и производительностью аппарата.

Одним из видов конструкции, работающего по типу смесительных аппаратов, является струйно-барботажное контактное устройство для тепло-массообменных аппаратов, показанное на рис. 1. Предлагаемое контактное устройство состоит из сливных стаканов 1, имеющих вертикальные стенки, необходимые для поддержания уровня жидкости внутри них. Стаканы 1 в каждом ряду соединены между собой с помощью стержней 2, открыты с верхнего своего конца, а нижний конец (днище) снабжен некоторым множеством отверстий 3, необходимых для слива жидкости на расположенный ниже сливной стакан 1. Схема взаимодействия потоков газа и жидкости в предлагаемом струйно-барботажном контактном устройстве представлена на рис. 2.

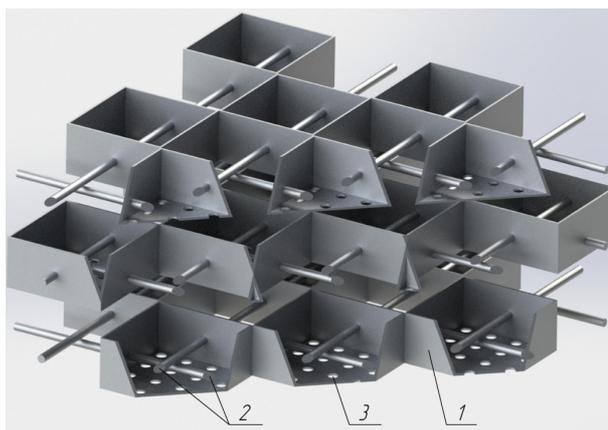


Рис. 1. Струйно-барботажное контактное устройство:
1 – сливной стакан; 2 – стержень; 3 – отверстия

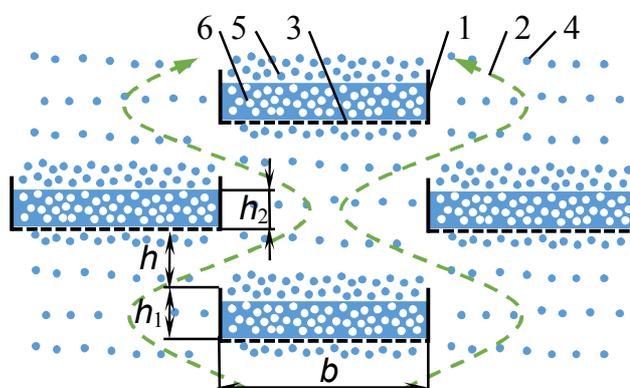


Рис. 2. Схема взаимодействия потоков газа и жидкости в струйно-барботажном контактном устройстве: 1 – сливной стакан; 2 – поток газа; 3 – перфорированное днище; 4 – капли, образованные перфорированным устройством; 5 – капли, вылетающие из жидкости; 6 – пузыри

Струйно-барботажное контактное устройство работает следующим образом. Жидкость через множество отверстий 3, выполненных в днище сливных стаканов 1, диспергируется в виде струй на расположенный ниже сливной стакан 1. При этом в указанных сливных стаканах 1 поддерживается уровень жидкости h_2 за счет наличия вертикальных стенок высотой h_1 сливных стаканов. Сливные стаканы 1 располагают горизонтально в шахматном порядке, образуя тарелку. Причем ниже расположенная тарелка имеет смещение стаканов, формируя шахматное их расположение по вертикали. По этой причине, газ, поступающий снизу под тарелку, приобретает зигзагообразный характер движения (рис. 2).

При движении струй жидкости происходит их распад с образованием множества капель. Последние, соударяясь о поверхность жидкости, находящейся внутри стаканов 1, разлетаются в разные стороны брызгами. Таким образом, создается развитая постоянно обновляющаяся поверхность контакта фаз, которая определяется наличием относительно небольших газовых пузырей в слое жидкости и вылетающими каплями с поверхности. Кроме того, восходящий поток газа контактирует с падающими струями или каплями жидкости, при этом образуется вторая зона контакта газа и жидкости. Принимая расстояние между сливными стаканами на одном уровне, равными ширине сливного стакана, обеспечивается равнопроточность для прохода газа, что приводит к снижению гидравлического сопротивления, предлагаемого струйно-барботажного контактного устройства. Для обеспечения максимальной эффективности тепло-массообменных процессов сливные стаканы в поперечном сечении имеют форму квадрата. Таким образом, организация оригинального взаимодействия между газом и жидкостью позволяет интенсифицировать тепло- и массообменные процессы как в жидкой, так и в газовой фазах при относительно простом аппаратном оформлении.

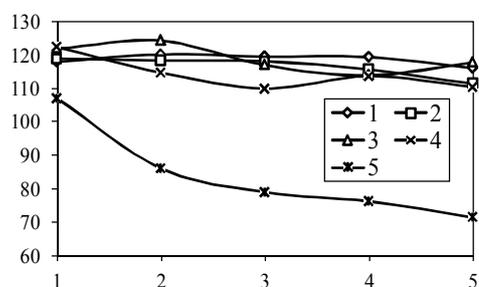


Рис. 3а

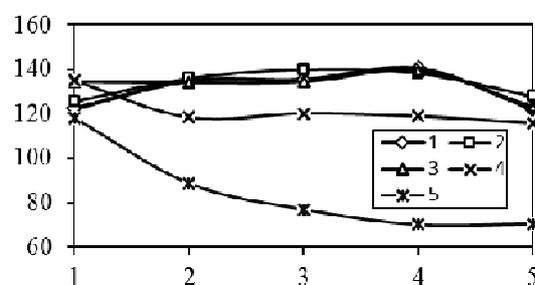


Рис. 3б

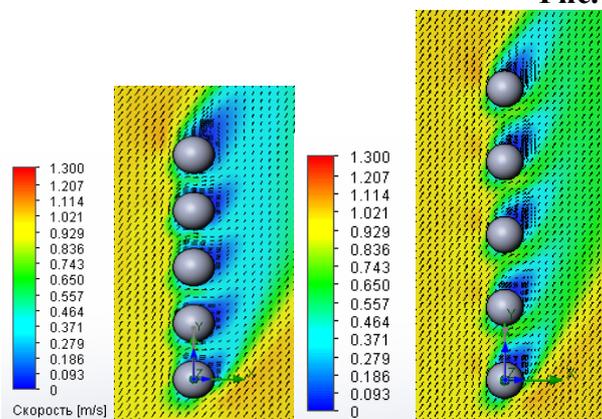


Рис. 4

В данном контактном устройстве, мы решили рассмотреть зависимость коэффициента теплоотдачи группы капель в зависимости от их порядкового номера и

угла обдувания: 1 – 0°; 2 – 30°; 3 – 45°; 4 – 60°; 5 – 90° при расстоянии между ними – 2 мм (рис. 3а) и при расстоянии – 1,5 мм (рис. 3б).

Из рис.4 мы видим, что капли жидкости непрерывно взаимодействуют друг с другом при меньшем расстоянии между ними, образующих при этом определенную среду. В случае с большим расстоянием между каплями взаимодействие почти не происходит.

При исследованиях коэффициента теплоотдачи от первой и последней капель к воздуху не учитывались, так как в рабочем процессе их не будет.

В результате исследований по расчету коэффициента теплоотдачи группы капель в зависимости от расстояния между ними и угла обдувания можно заключить что, коэффициент теплоотдачи значительно изменяется в зависимости от расстояния между каплями, но ни при разных значениях угла. Наибольшим отклонением от среднего значения, при расстоянии между каплями 1,5мм, является значение – 10, а при расстоянии 2мм – 6, общий диапазон колебаний составляет от 0,1-3.

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В КОМПАКТНЫХ ЗМЕЕВИКАХ

Мансурова Р. Р., Денисенко И. П., Печенегов Ю.Я.*

БИТИ (филиал) НИЯУ «МИФИ». E-mail: irishka.den@mail.ru

*Энгельсский технологический институт (филиал СГТУ им. Гагарина Ю.А.).

E-mail: y.pechenegov@mail.ru

В новой конструкции змеевика [1], отличающейся повышенной компактностью прямые трубы соединяются между собой П-образными поворотными камерами. Известные зависимости для определения коэффициента теплообмена в таких трубах не могут быть применимы при проектировании устройств без экспериментальной проверки. Для изучения теплообмена была создана экспериментальная установка (рис. 1), включающая прямую трубу и четыре варианта поворотных камер, имеющих внутренний диаметр $d = 6$ мм и толщину стенки (медь) $\delta = 1$ мм. Рабочая длина l прямой трубы составляла 320 мм. Варианты поворотных камер различались между собой конструктивными размерами a , b и c ($a = 5-10,2$ мм, $b = 9-18$ мм и $c = 6-8,9$ мм). Прямая труба и поворотные камеры размещались в корпусе с водой, находящейся под атмосферным давлением, которая во время опытов приводилась в состояние активного кипения с помощью встроенного электронагревателя. Рабочей жидкостью (нагреваемый теплоноситель) служила вода, подаваемая из бака постоянного уровня.

При установившихся режимах в опытах измерялись расход рабочей жидкости, ее температура на входе и выходе исследуемого элемента с помощью дублирующих друг друга термометров расширения и термопар типа ХК. Для измерения температуры стенки прямой трубы использовались девять термопар типа ХК с диаметром электродов 0,2 мм. Вторичным прибором для термопар служил цифровой милливольтметр типа ТРМ 101 класса точности 0,5, проградуированный в °С. С помощью двух термометров расширения измерялась и контролировалась температура ($t_k = 100$ °С) кипящей воды (греющий теплоноситель) в корпусе. Установленная при наладке установки мощность электронагревателя в опытах не изменялась, оставаясь постоянной.

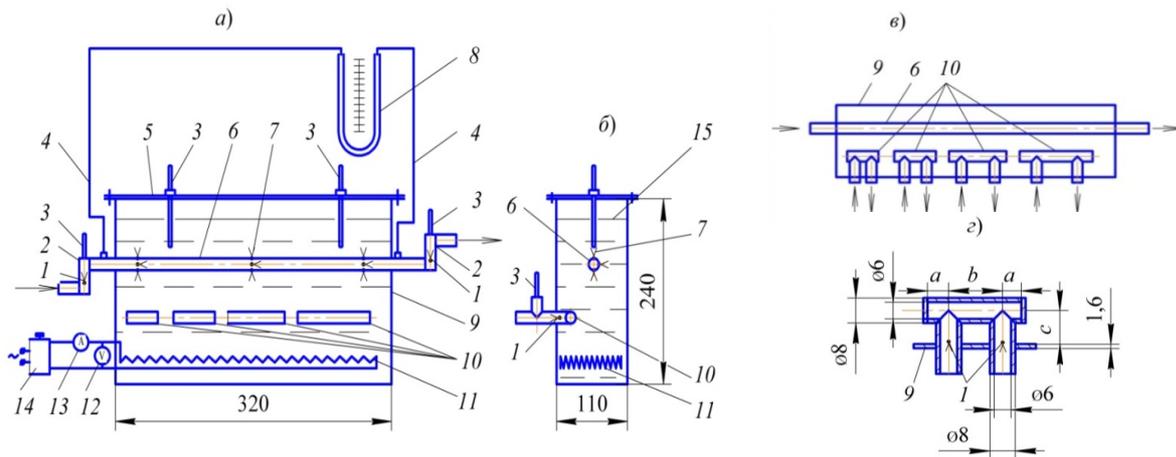


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *а* – продольный разрез; *б* – поперечный разрез; *в* – вид сверху; *г* – поворотная камера; *1* – термопары для измерения температуры потока; *2* – смесительные камеры; *3* – термометры расширения; *4* – импульсные соединительные трубки; *5* – крышка; *6* – прямая труба; *7* – термопары для измерения температуры стенки трубы; *8* – U-образный дифманометр; *9* – корпус; *10* – поворотные камеры; *11* – электронагреватель; *12* – вольтметр; *13* – амперметр; *14* – автотрансформатор; *15* – уровень воды; стрелками показано направление движения потока

Обобщение полученных опытных данных проводилось для установления зависимостей между числами подобия Nu и Re . На рис. 2 приведены опытные значения числа Нуссельта Nu от числа Re потока в прямой трубе и поворотных камерах.

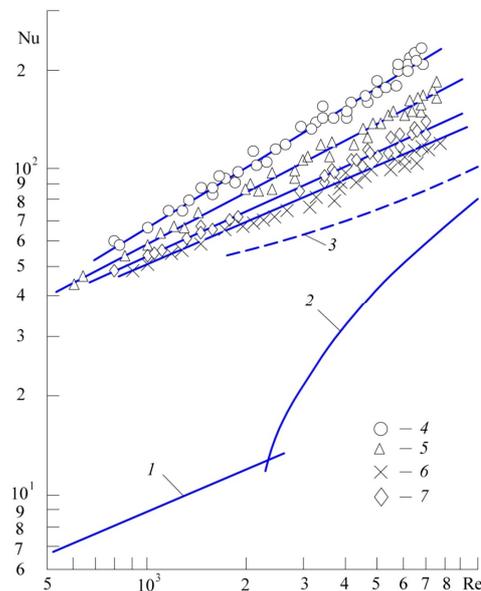


Рис. 2. Зависимость Nu от Re : *1* – расчет по (1); *2* – по (2); *3* – опытные данные [2] для плавного поворота на 180° ; *4* – поворотная камера №1; *5* – №2; *6* – №3; *7* – №4.

$$Nu = 1,55 \cdot \left(Re \cdot \frac{d}{l} \right)^{0,333} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,14} \cdot \varepsilon_l, \quad (1)$$

где μ , $\mu_{ст}$ – динамические коэффициенты вязкости воды при средней температуре потока и стенки трубы соответственно; ε_l – поправка на длину трубы.

$$Nu = 0,116 \cdot (Re^{0,667} - 125) \cdot Pr^{0,333} \cdot \left[1 + \left(\frac{d}{l} \right)^{0,667} \right] \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,14} \quad (2)$$

Опытные точки группируются возле обобщающих прямых, своих для каждой из исследованных поворотных камер. Видно, что теплообмен в поворотных камерах имеет высокую интенсивность. Во всем исследованном интервале чисел Рейнольдса от 600 до $8 \cdot 10^3$ характер зависимостей $Nu=f(Re)$ одинаков. Можно сделать вывод о ранней турбулизации потока в поворотных камерах, вызванной наличием отрывных зон за острыми кромками поворотов и влиянием ниш в камерах. Очевидно, при всех числах Re в интервале $600 \div 8 \cdot 10^3$ идет активное перемешивание потока в камерах.

Обработка опытных данных по теплообмену в поворотных камерах привела к уравнению подобия

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Pr^{0,43} \quad (3)$$

где для камеры №1 – $c = 0,36$ и $n = 0,63$, №2 – $c = 0,66$ и $n = 0,59$, №3 – $c = 0,96$ и $n = 0,45$, №4 – $c = 0,89$ и $n = 0,47$.

Влияние числа Прандтля на Nu специально не изучалось. Показатель степени 0,43 при числе Pr в (3) принят по данным [3] для турбулентного режима течения.

Для сравнения на рис. 2 проведена линия 3, соответствующая опытным данным В.К. Щукина и В.А. Филина [2], полученным для плавного поворота на 180° с эквивалентным диаметром канала 49 мм и радиусом кривизны оси канала $R = 150$ мм.

Экспериментально установлено, что интенсивность теплообмена в поворотных камерах с нишами предложенного змеевика выше, чем в плавно изогнутых отводах традиционных змеевиков. Наибольшее превышение наблюдается в области малых чисел Re .

Литература

- [1] Пат. 2382973 (RU). МПК F28F1/00. Однопоточный трубчатый змеевик. Печенегов Ю.Я, Денисенко И.П. *Открытия. Изобретения.* 2010. №6.
- [2] Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. М.: *Машиностроение.* 1970. 331с.
- [3] Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: *Энергия.* 1973. 320с.

АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ВАКУУМНО-КОНДУКТИВНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Мухаметзянов Ш.Р., Хасаншина Р.Т., Мухаметзянова З.Р., Сафин Р.Р.
 Казанский национальный исследовательский технологический университет.
 E-mail: Olambis@rambler.ru

В настоящее время наблюдается интенсивный рост потребления топливно-энергетических ресурсов, в связи с чем возникает необходимость проведения энергосберегающих мероприятий производства. Проблема снижения энергозатрат весьма актуальна как для России, так и за рубежом, поскольку энергоемкость промышленно-

го производства находится на высоком уровне, что, в конечном счете, приводит к увеличению себестоимости конечного продукта.

Отметим, что значительную роль в энергосбережении является создание новых технологических устройств и комплексов, позволяющих рационально использовать побочную тепловую энергию, возникающую на разных стадиях технологических процессов производства. Среди множества промышленных процессов, сушка является одним из самых энергоемких процессов.

На сегодняшний день анализ существующих сушильных технологий показывает, что наибольшие потери тепловой энергии предопределяются отходящим сушильным агентом в окружающую среду. В связи с этим, возникают очевидные пути повышения эффективности сушильных установок: исключение потери теплоты с испаряющейся влагой (улавливание уходящей теплоты с использованием теплового насоса) и ограничить потери теплоты в окружающую среду путем модернизации сушильной установки (например, вакуумная сушильная камера).

Для исследования процесса вакуумной сушки пиломатериалов на кафедре архитектуры и дизайна изделий из древесины был создан экспериментальный стенд, схема и внешний вид которой представлены на рисунке.

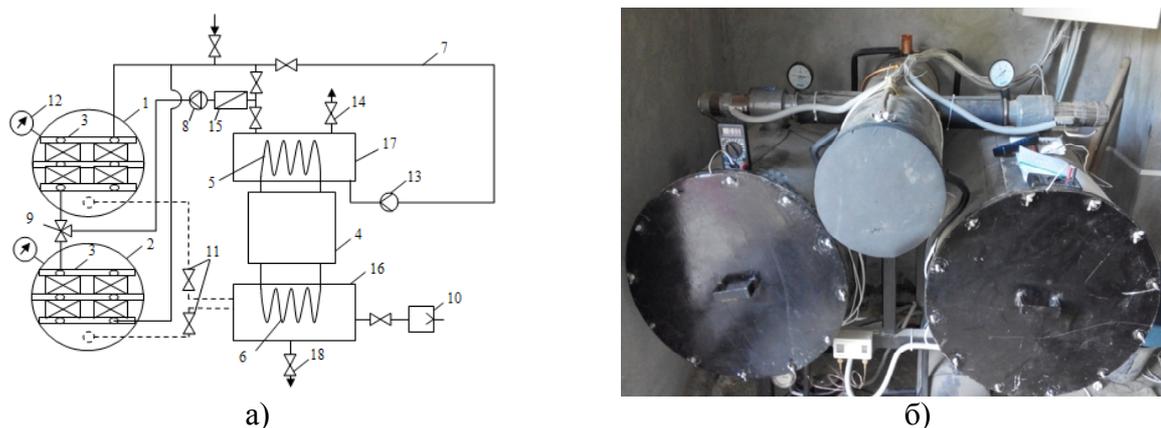


Рисунок. Схема (а) и общий вид (б) установки вакуумно-кондуктивной сушки с тепловым насосом

Установка состоит: первая камера сушки (1); вторая камера сушки (2); плиты с жидкостным нагревом (3); тепловой насос (4); конденсатор теплового насоса (теплопередача «фреон-жидкость») (5); испаритель теплового насоса (6); жидкостной трубопровод (7); циркуляционный жидкостной насос (8); трехходовой кран (9); вакуумный насос (10); электромагнитные клапаны (11); вакуумметр (12); расходомер (13); вентиль (14); электроподогреватель жидкого теплоносителя (15); конденсатор сушильной установки (16); теплообменник (17); ручной клапан слива конденсата (18).

Предложенная конструкция установки работает следующим образом. Высушиваемые пиломатериалы после подготовки укладываются в камерах сушки 1 и 2 между нагревательными плитами 3 для двухстороннего нагрева. При этом с целью предотвращения интенсивного удаления влаги с торцов, древесина закрашивается быстро сохнущей краской. Далее камеры герметизируются закрытием крышек с уплотнителями. Включением дополнительного электронагревателя 15 для нагрева жидкого теплоносителя осуществляется пусковая стадия нагрева пиломатериалов в камере 1. Нагретый теплоноситель циркулирует по малому кругу с помощью жидкостного насоса 8.

При этом для регулирования направления потока теплоносителя к нагревательным плитам конкретной камеры используется автоматический трехходовой кран 9, перекрывающий подачу агента в другую камеру.

Нагрев материала продолжается до тех пор, пока температура внутри образца не достигнет заданного значения, что регистрируется заранее установленной внутри контрольного пиломатериала термопарой. После достижения материалом заданной температуры происходит смена стадии нагрева на стадию вакуумирования. Система вакуумирования подключается к конкретной камере через соответствующий электромагнитный клапан 11. В работу вступает вакуумный насос 10, удаляющий воздух из камеры, что позволяет в дальнейшем поддерживать пониженное давление при выключенном вакуумном насосе 10 с помощью конденсатора установки 16. Испаренная из древесины влага поступает в конденсатор установки 16 и конденсируется на поверхности испарителя 6, отдавая тепловую энергию холодильному агенту.

Далее тепловой насос в теплообменнике передает тепловую энергию жидкому теплоносителю, циркулирующему через нагревательные плиты 3 камеры 2, что вызывает нагрев пиломатериала, находящегося в данной камере.

Таким образом, в первой камере начинается стадия вакуумирования и удаление влаги из материала, а во второй – стадия нагрева за счет тепловой энергии испаренной из древесины влаги, отведенной из первой камеры.

В процессе вакуумирования происходит постоянное снижение скорости сушки материала, что отражается на интенсивности нагрева материала, находящегося в другой камере, поэтому для ускорения стадии нагрева и компенсации тепловых потерь в окружающую среду во второй половине стадии нагрева периодически включается дополнительный нагреватель 15. После достижения материалом, находящемся в камере 2, заданного температурного режима происходит смена стадий в камерах.

Сушку проводят до достижения пиломатериалом заданного конечного значения влагосодержания (8%). После завершения процесса сушки материалы корпусов камер разгерметизируют.

Отличительной особенностью предложенной конструкции установки от аналогичных таких же сушильных камер является использование одного теплового насоса, который представляет собой замкнутую систему парокомпрессионного типа, где испаритель служит для улова испаренной из материала влаги, ее конденсации и охлаждения, а конденсатор является теплообменным аппаратом, выделяющим тепловую энергию для нагрева жидкого теплоносителя, циркулирующего в нагревательных плитах сушильной установки.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЕРЕНОСЧИКА КИСЛОРОДА НА РОСТ СПИРТОВЫХ ДРОЖЖЕЙ

Нуретдинова Э.И., Шурбина М.Ю., Красильникова О.В.,
Валеева Р.Т., Емельянов В.М.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: valrt2008@rambler.ru

Перспективным направлением в биотехнологии является интенсификация действующих технологических процессов за счет применения веществ, улучшающих усло-

вия аэрации в ферментационной среде [1], так как в большинстве случаев аэробные биохимические процессы лимитированы массопередачей кислорода.

Работы по интенсификации массопередачи кислорода в биотехнологических процессах с помощью переносчиков кислорода – поверхностно-активных веществ занимают одно из центральных мест, и нашли практическое применение в усовершенствовании процессов производства рибоксина, аминокислот, спиртовых дрожжей, ферментов [2].

Культивирование микроорганизмов в промышленных условиях требует интенсивной аэрации для обеспечения микроорганизмов кислородом в количестве, необходимым дифференцированной по возрасту растущей популяции [3]. Поэтому одним из важнейших путей интенсификации процессов биосинтеза является регулирование скорости переноса кислорода из газовой фазы к клетке, определяющее выход целевого продукта. Для достижения этой цели в основном используют способы регулирования переноса кислорода, основанные либо на повышении объемного коэффициента массопередачи за счет изменения удельных затрат энергии на аэрацию и перемешивание, либо на изменение парциального давления кислорода [4]. Это, как правило, приводит к существенному усложнению ферментационного оборудования и способов управления технологическим процессом. В то же время предельные скорости транспорта кислорода часто остаются все еще недостаточными в отношении использования возможностей имеющихся штаммов, что ограничивает продуктивность процесса.

В этой связи представляет большой интерес поиск принципиально новых подходов к регулированию скорости переноса кислорода, которые не требовали бы сложных технических решений и повышенных энергетических затрат для достижения необходимых режимов аэрации.

Принципиально ресурсосберегающим и экономически выгодным подходом является метод интенсификации процессов ферментации с использованием переносчиков [5], регулирующие скорость переноса кислорода.

Идея данного метода заключается во введении в необходимые моменты в культурную среду веществ (переносчиков кислорода), обладающих способностью лабильно связывать кислород из газовой фазы и, перемещаясь в ферментационной среде, отдавать его в жидкость или клетке. При этом переносчик может существовать в ферментационной среде в виде самостоятельных гетерогенных включений жидкой или твердой фазы, в виде гомогенных комплексов.

В лаборатории «Инженерные проблемы биотехнологии» проводились и проводятся [6,7] экспериментальные исследования по проверке влияния переносчика кислорода на процесс роста спиртовых дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-1986 с использованием компонентов среды Ридер и гидролизатов растительного сырья, таких как свекловичный жом, кукурузные кочерыжки и пшеничная солома. В работе в качестве переносчика кислорода использовали один из эффективных ПАВ «Проксанол», представляющий собой блок-сополимер окиси этилена и окиси пропилена [8]. Проксанолы имеют большую по сравнению с водой кислородную емкость, обусловленную только физическим растворением кислорода.

Исследования по выращиванию дрожжей проводили в качалочных колбах объемом 750 мл, на качалке со скоростью встряхивания 220 мин⁻¹, установленной в термощкафу. Продолжительность культивирования в качалочных колбах составляла 24 часа. В процессе проведения экспериментов пробы для анализа отбирали сразу после засева (нулевая проба) и по истечении 4 часов через каждые 2 часа роста. Значения

pH поддерживали 5% раствором аммиака в интервале 4,5-4,8. Культивирование проводили в термостате при температуре 28-30 °С.

Эксперименты по выращиванию дрожжей на минеральной среде Ридера с глюкозой показали положительное влияние переносчиков кислорода на скорость роста микроорганизмов и достигаемую концентрацию их биомассы.

Наилучший прирост оптической плотности получили у процесса с использованием компонентов среды Ридер и спиртовой барды.

Литература

- [1] Еникеев, Ш.Г. Метод «Диффузионного шунта» для интенсификации транспорта кислорода в процессах ферментации. Ш.Г. Еникеев, В.М. Емельянов. *Микробиологическая промышленность*. 1977. №9. С.6-9.
- [2] Валеева Р.Т. Интенсификация производства кормовых дрожжей на основе спиртовой барды: Дисс...канд. техн. Наук. *Казань*. 2007.
- [3] Aiba, S. Biochemical engineering. S. Aiba, A.E. Humphrey, N. Millis. *University of Tokyo press*. 1973. 183p.
- [4] Виестур У.Е. Аэрация и перемешивание в процессах культивирования микроорганизмов. *ОНИТЭИмикробиома. Москва*. 1972. 67с.
- [5] Емельянов В.М. Изучение возможности активного транспорта кислорода в системах ферментации: Дисс...канд.техн.наук. 05.17.08. Защищена 29.04.78. *Казань*. 1978. 180с.
- [6] Хусаенова Г.Р. Исследование процессов наращивания биомассы дрожжей с использованием переносчиков кислорода. XIV международная конференция молодых ученых. Пищевые технологии и биотехнологии. *Казань*. 2015. С.132.
- [7] Харина М.В. Использование переносчиков кислорода в микробиологических производствах. XII Международная конференция молодых ученых Пищевые технологии и биотехнологии. *Казань*. 2012. С.166-167.
- [8] Шенфельд, Н. Поверхностно-активные вещества на основе оксиэтилена. *М.: Химия*. 1982. 748с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЕРЕНОСЧИКА КИСЛОРОДА НА РОСТ КОРМОВЫХ ДРОЖЖЕЙ

Шурбина М.Ю., Нуретдинова Э.И., Красильникова О.В.,
Валеева Р.Т., Емельянов В.М.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.
E-mail: valrt2008@rambler.ru

Для обеспечения нормального роста микроорганизмов необходимо поддерживать в культуральной жидкости относительно высокий уровень концентраций растворенного кислорода. Один из многих способов повышения массообмена в аппаратах наиболее простой и не требующих изменений в конструкциях аппарата дополнительных энергетических затрат и капитальных вложений является использование переносчиков кислорода, таких как проксанол.

К переносчикам кислорода предъявляются следующие основные требования:

- в области высокого парциального давления переносчик должен принять кислород, а в области низкого – освободить;

- сохранять свою химическую структуру в ферментационной среде, т.е. иметь высокую химическую устойчивость;
- кислородоёмкость должна сохраняться без изменений в течение длительного периода;
- переносчик должен легко отделяться от жидкости либо быть безвредным при использовании целевого продукта [1];
- вещество должно быть нетоксичным для микроорганизмов [1 - 3];
- для создания высоких коэффициентов массопередачи переносчик должен иметь развитую поверхность контакта [3];
- не вступать в реакцию с кислородом т.е. обладать способностью обратимо сорбировать кислород [1];
- обладать большей растворимостью кислорода, чем вода ($\gg 7$ мг/л) [2];
- иметь в своей структуре гидрофобные и (или) гидрофильные фрагменты;
- должны обратимо сорбировать кислород [3, 4];
- быть стойкими при стерилизации и хранении [1];
- в среде должна сохраняться его химическая структура [3];
- быть доступными в большом количестве при невысокой стоимости [1].

В лаборатории «Инженерные проблемы биотехнологии» проведены экспериментальные исследования по проверке влияния переносчика кислорода на процесс роста кормовых дрожжей *Rhodospiridium diobovatum* ВКПМ У-3158 с использованием компонентов синтетической среды Ридер и гидролизатов растительного сырья, таких как свекловичный жом, кукурузные кочерыжки и пшеничная солома. В работе в качестве переносчика кислорода использовали один из эффективных ПАВ «Проксанол» - оксиэтилированный полипропиленгликоль [8].

Проведенные экспериментальные исследования по выращиванию кормовых дрожжей с использованием минеральных сред показали положительное влияние переносчиков кислорода на скорость роста микроорганизмов и достигаемую концентрацию их биомассы.

В процессах культивирования кормовых дрожжей *Rhodospiridium diobovatum* ВКПМ У-3158 наилучший прирост оптической плотности получили у процесса с использованием компонентов среды Ридер, спиртовой барды и фосфорнокислого гидролизата свекловичного жома.

Литература

- [1] Характеристика переносчиков кислорода в современных заменителях крови. Н.В. Шевченко, С.Н. Худяков, А.А. Зырянов, Д.А. Пыренков. *Казанский медицинский журнал*. 2012. №2. С.398
- [2] Шарифуллин В.Н. Повышение эффективности массопередачи и моделирование ферментационных аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казан. хим. – технол. ин-т. *Казань*. 1994.
- [3] Владимирова И.С. Интенсификация технологических процессов: автореф. дис. ... канд. техн. Наук. Казан. Хим. – технол. ин-т. *Казань*. 1989.
- [4] Хьюз М. Неорганическая химия биологических процессов. М.: Мир. 1983. 414с.
- [5] Шенфельд, Н. Поверхностно-активные вещества на основе оксиэтилена. М.: Химия. 1982. 748с.
- [6] Харина, М.В. Использование переносчиков кислорода в микробиологических производствах. XII Международная конференция молодых ученых Пищевые технологии и биотехнологии. *Казань*. 2012. С.166-167.

- [7] Хусаенова Г.Р. Исследование процессов наращивания биомассы дрожжей с использованием переносчиков кислорода. XIV международная конференция молодых ученых. Пищевые технологии и биотехнологии. Казань. 2015. С.132.

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ АБСОРБЦИИ ФОРМАЛЬДЕГИДА В ПРОИЗВОДСТВЕ ФОРМАЛИНА

Сайфутдинов Т.А., Махоткин А.Ф., Павлова К.А.,
Исхакова Д.Р., Мамадиев Р.А.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: tim142009@yandex.ru

Формальдегид получил широкое распространение в деревообрабатывающей, бумажной промышленности, металлообработке, медицине, в производстве каучука и резины и многих других отраслях, благодаря своей высокой реакционной способности и многообразию химических превращений.

Впервые формальдегид был получен в 1859 году А. М. Бутлеровым, а в 1967 году Гофман получил формальдегид при пропускании смеси паров метанола с воздухом, через накалившую платиновую спираль, что послужило основой методов промышленного синтеза формальдегида[1].

Основным сырьем для производства формальдегида на настоящий момент продолжает оставаться метанол. Процесс синтеза формальдегида проводят на серебряном или железо-молибденовом катализаторах. Рабочая температура серебряного катализатора составляет 600-700 °С. Концентрация метанола в газовой смеси при производстве формальдегида на серебряном катализаторе должна быть выше верхнего предела взрываемости [2]. Из-за высокой температуры работы серебряного катализатора имеют место побочные реакции: часть метанола и образовавшегося формальдегида сгорает до оксида и диоксида углерода на катализаторе. Преимуществом железооксидных катализаторов является более низкая рабочая температура (порядка 300-400 °С), это снижает вероятность протекания побочных реакций (разложение формальдегида и метанола на стадии синтеза), но данный тип технологии работает на концентрации ниже взрывоопасной и имеет низкую производственную мощность по сравнению с серебряным.

Газ после стадии синтеза поступает в абсорбционную колонну, где абсорбируется водой при температуре в первой зоне 80 °С, во второй зоне 60 °С, в третьей зоне 20 °С до концентраций 37% по формальдегиду. Формалин (водно-метанольный раствор формальдегида, с концентрацией формальдегида 37%)

В настоящий момент остро стоит необходимость увеличения мощности производства формальдегида. Существует несколько подходов к решению проблемы увеличения мощности. Можно смонтировать еще одну технологическую нить параллельно с аналогичной единичной мощностью по формальдегиду. Однако это требует значительных капитальных затрат. Также анализируя действующую технологию можно предположить, что увеличение объемов реактора повлечет за собой увеличение единичной мощности действующей технологии. Однако, имеются ряд трудностей. В первую очередь увеличение рабочего объема реактора ухудшит отвод тепла, что приведет к увеличению выхода побочных реакций. Кроме того, следует отметить,

что при увеличении размеров реактора увеличивается возможность, и соответственно мощность взрыва, что недопустимо. Следовательно, при необходимости увеличения единичной мощности установки следует принципиально менять конструкцию реактора. Однако при увеличении скорости и расхода газового потока после реактора действующий абсорбер становится неработоспособным. так как достигнута максимальная пропускная способность на настоящий момент.

Рассмотрим подробнее работу насадочной колонны абсорбций формальдегида. Согласно данным (2) по равновесию подобран оптимальный температурный режим на ступенях колонны: на первой ступени абсорбций при 70 °С, на вторую ступени при 40 °С, а на последней ступени абсорбируется при 20 °С. Не абсорбированный формальдегид идет на сжигание. На последней ступени происходит доулов формальдегида, однако имеет место брызгоунос капель жидкости, содержащих формальдегид, и степень абсорбции данного типа аппарата не позволяет нам достигать уровня газовых выбросов, не превышающих ПДК.

На действующих предприятиях наловленный формальдегид отправляют на факельное сжигание. Порядка 2-3% формальдегида теряется на факельном сжигании, при производительности порядка 180000 тонн формальдегида в год, потери формальдегида будут составлять примерно около 3600 т формальдегида в год.

Для уменьшения потерь продукта, требуется снижать брызгоунос и увеличивать степень абсорбции.

В ходе работы были проанализированы закономерности процесса абсорбции формальдегида. Было установлено, что лимитирующей стадией абсорбции формальдегида является диффузия в жидкости. Молекулы формальдегида и гидратов просто не успевают раствориться в объеме жидкости, создавая тем самым локальное переизбыщение по формальдегиду на поверхности контакта фаз. Кроме того, за счет того, что процесс абсорбции формальдегида водой сопровождается выделением тепла, поверхность жидкости при контакте с газом перегревалась, что также снижало движущую силу процесса абсорбции. Следовательно, для эффективной абсорбции формальдегида необходимо обеспечивать теплоотвод и увеличивать обновление поверхности контакта фаз. Для ликвидации брызгоуноса предлагается после стадии абсорбции установить брызготуманоловушку с волокнистыми фильтрами.

Вихревые установки, разработанные сотрудниками кафедры “Оборудование химических заводов” КНИТУ, соответствуют данным требованиям и позволяют интенсифицировать процесс абсорбций формальдегида с уменьшением брызгоуноса.

Литература

- [1] Уокер Дж. Ф. Формальдегид. М.: Госхимиздат. 1957. 608с.
- [2] Огородников С.К., Формальдегид. Л.: Химия. 1984. 280с.

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРАТА ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ВИХРЕВЫХ РЕАКТОРАХ

Филина Ю.А., Гречушкин А.Н.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана.

Обратноосмотические установки находят широкое применение при опреснении морских и солоноватых вод, снижении жесткости воды, получении деионизированной воды и др. По сравнению с распространёнными альтернативными технологиями, такими как ионообменная технология и дистилляция [1], технология обратного осмоса обладает рядом преимуществ:

- отсутствие агрессивных стоков;
- малый расход реагентов;
- простота автоматизации процессов.

Вместе с тем имеются и недостатки: прежде всего большой объем сточных вод (концентрата). По этой причине исследования в области снижения объема концентрата следует признать актуальными.

В настоящее время имеется ряд технологий, позволяющих снизить объем концентрата за счет снижения его жесткости и солесодержания и дальнейшего подмеса части обработанного концентрата к исходной воде. К таким технологиям можно отнести:

- нанофльтрационная обработка концентрата;
- реагентная обработка с последующим отстаиванием;
- обработка в вихревом реакторе и др.

Метод обработки в вихревом реакторе позволяет проводить процесс в аппаратах малых размеров, малочувствителен к остановам, осадок не требует обезвоживания [2]. Однако, как показали мои исследования, в настоящее время в литературе отсутствуют надежные методики расчета таких аппаратов применительно к обработке концентрата обратноосмотических установок, в частности отсутствуют данные по влиянию на процесс ингибиторов осадкообразования на мембранах.

Целью моей работы является экспериментальное исследование процесса обработки воды в вихревом реакторе применительно к концентрату обратноосмотической установки, корректировка расчетных зависимостей применительно к этой задаче.

Для этой цели была использована экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1.

Условно стенд разделён на два узла.

Первый узел служит для проведения экспериментальных работ на обратном осмосе низкого давления (осуществляется контроль процесса по электропроводности, расходам, температуре с выводом значений всех показателей на шкаф управления).

Второй узел работает в ручном режиме с необходимыми приборами - манометры, ротаметры – для высоконапорного обратноосмотического разделения и концентрирования растворов с высоким солесодержанием. Стенд оборудован двумя многоцелевыми емкостями, являющимися общими как для первого, так и для второго узла обратноосмотического разделения. Ёмкость E1 предназначена для заполнения исходным (предназначенным для очистки) раствором, сбора концентрата в процессе концентрирования и оборудована теплообменником для охлаждения раствора, приборами контроля температуры, а также датчиком уровня. Ёмкость E2 предназначена для сбора пермеата или концентрата (в зависимости от целей эксперимента), также обо-

рудована теплообменником, прибором контроля температуры. В схеме предусмотре-
 на возможность слива пермеата и/или концентрата в дренаж (канализацию).

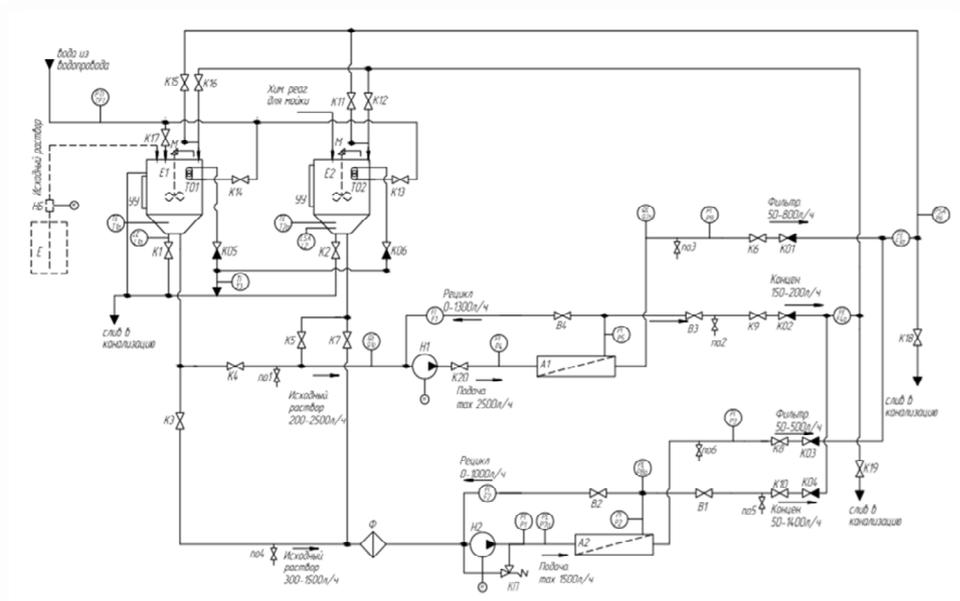


Рис. 1. Гидравлическая схема установки обратного осмоса

Первый узел и второй узел одновременно работать не могут.

На рис. 2 представлены фотографии обратноосмотической установки, на которой проводился эксперимент.



Рис. 2. Экспериментальная
 обратноосмотическая установка

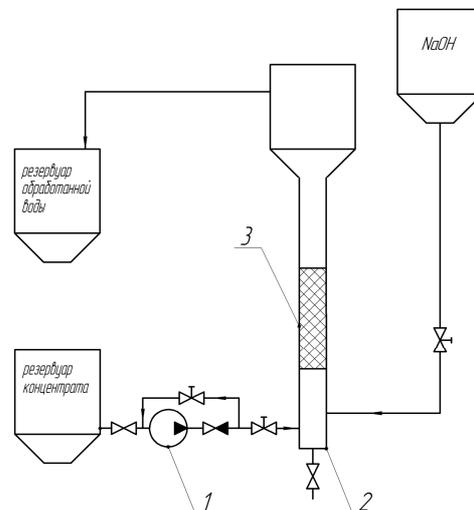


Рис. 3. Схема обработки концентрата

Далее концентрат обрабатывается в установке, схема которой представлена на рис. 3. При помощи насоса 1 с системой регулирования расхода вода подаётся в вихревой реактор 2, в котором за счёт подачи раствора NaOH, при величине рН около 10, из пересыщенного раствора происходит выпадение карбоната кальция на взвешенных зёрнах кварцевого песка 3 фракции 0,3-0,5 мм. Обработанный концентрат с пониженной до 1,4-1,6 мг-экв/л жёсткостью и частично сниженным содержанием поступает в резервуар обработанной воды.

В ходе работы на установке (рис. 2) был выполнен следующий эксперимент. Исходная вода из емкости Е1 насосом Н1 подавалась для разделения на аппарат А1 с низконапорной обратноосмотической мембраной типа ESPA1-4040. В процессе разделения поток разделялся на две части: пермеат – очищенная с пониженным содержанием и концентрат – обогащенный солями и другими примесями. С помощью теста на жёсткость НИЛПА определялась жесткость концентрата, таким образом были получены экспериментальные данные для построения графика, приведенного на рис. 4. Теоретические данные были рассчитаны с помощью программы IMSDesign-2015.

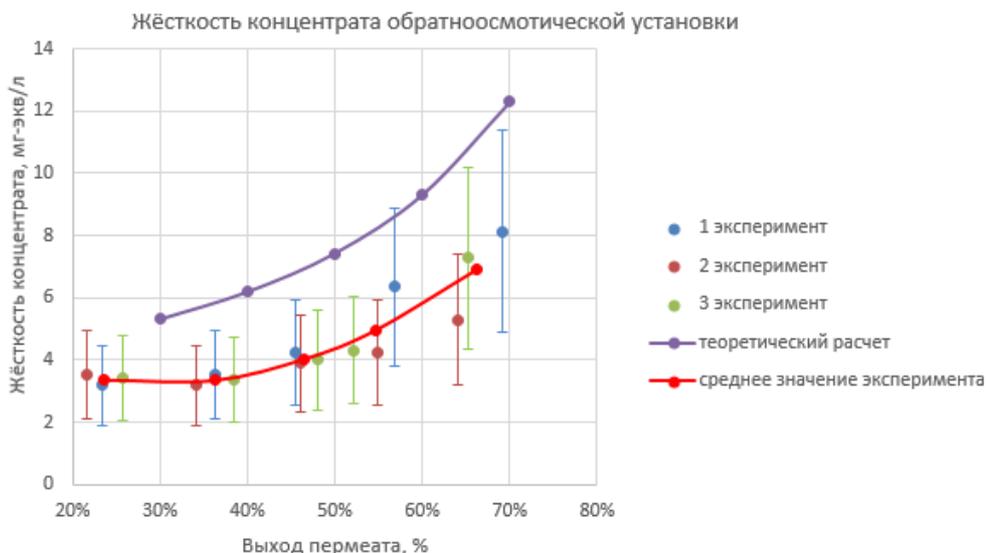


Рис. 4. Жесткость концентрата обратноосмотической установки в зависимости от выхода пермеата

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что применительно к воде московского городского водопровода при обработке в вихревом реакторе жесткость концентрата при $t=17^{\circ}\text{C}$ снижается до величины 1,4-1,6 мг-экв/л и практически не зависит от исходной жёсткости. Часть обработанного концентрата может быть подмешана к исходной воде. При этом процент использования исходной воды обратноосмотической установки в зависимости от требований к пермеату и с учетом периодического сброса всего объема концентрата может быть в диапазон 85-95%.

Литература

- [1] Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. М.: ДеЛи принт. 2004. 328с.
- [2] Исследование процесса разделения водных растворов неорганических солей обратным осмосом. Дытнерский Ю.И., Кочаров Р.Г., До Ван Дай. Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по мембранным методам разделения смесей. МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1973. Режим доступа: http://membrane.msk.ru/books/?id_b=10&id_bp=223, свободный. Загл. с экрана.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА ЧАСТИЦ АНТРАЦЕНА, ПРОИСХОДЯЩЕГО В СВОБОДНОЙ СТРУЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ФЛЮИДНОГО РАСТВОРА

Сандугей Н.С., Кузнецова И.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: office@kstu.ru

В настоящее время, фармацевтическая промышленность заинтересованно в создании лекарственных препаратов с более существенным фармакологическим действием. Однако существует проблема, связанная с плохой растворимостью многих препаратов. Одним из способов решения данной задачи является диспергирование веществ с целью получения частиц нано и микронного размеров, так как размер и распределение частиц по размерам в фармацевтике существенно влияют на скорость растворения и, следовательно, биодоступность. Одним из методов по получению наночастиц, является метод быстрого расширения сверхкритического раствора (RESS). Данный метод основан на растворении вещества в сверхкритическом флюиде и дальнейшем быстром сбросе давления с помощью расширительного устройства (дроссель вентеля). Чаще всего в качестве растворителя используют экологически чистый диоксид углерода (CO_2), который имеет сравнительно небольшие сверхкритические параметры. Для осуществления процесса достаточно иметь данные по растворимости лекарственного препарата в CO_2 . Быстрый сброс давления с помощью дроссель вентиля позволяет перевести CO_2 из сверхкритического в газообразное состояние. Тем самым, на конечном этапе мы получаем продукт, полностью очищенный от используемого растворителя и готовый к использованию. Также метод RESS прост в аппаратной реализации и не требует использования сложного оборудования, что может привести к дополнительным затратам при эксплуатации и ремонте оборудования. Данная работа посвящена исследованию зародышеобразования и роста зародышей антрацена в процессе быстрого расширения сверхкритического раствора в зависимости от термодинамических параметров.

Для экспериментальной реализации данного процесса использовалась модернизированная экспериментальная установка RESS-100-2 Base фирмы Thar Technologies Inc., представленная на рис. 1.

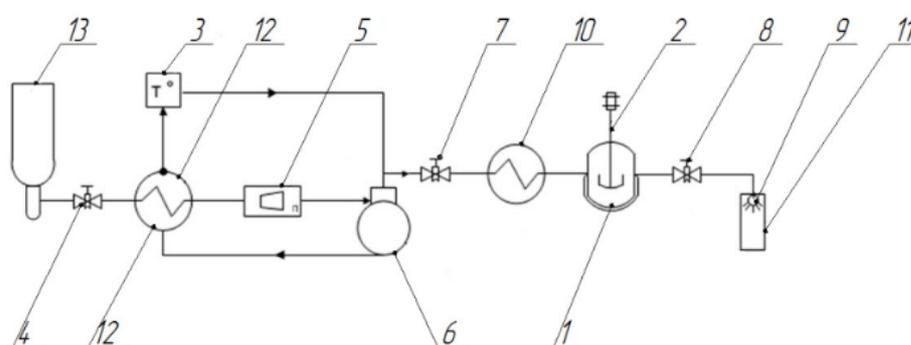


Рис. 1. Экспериментальная установка Thar RESS-100-2 Base

Экспериментальная установка включает в себя: насытитель (1), мешалка (2), термостат (3), вентиль (4,7,8), расходомер (5), насос высокого давления (6), устройст-

во расширения (9), теплообменник для нагрева (электронагреватель) (10), камера расширения (11), теплообменник для охлаждения (12), баллон с CO_2 (13). Установка обладает следующими техническими характеристиками: рабочее давление 6÷60 МПа (с мешалкой до 40 МПа), номинальный массовый расход сверхкритического растворителя $8 \cdot 10^{-4}$ кг/с (пиковое значение расхода может достигать $1,6 \cdot 10^{-3}$ кг/с), рабочая температура от комнатной до 393 К.

В конструкцию камеры расширения (11) имеется предметное стекло, которое условно делится на несколько участков и устанавливается вдоль распространения струи, что, в свою очередь, позволяет частицам осаждаться на нем в виде монослоя. Далее полученные образцы были проанализированы на микроскопе Levenhuk T670D. С помощью фотокамеры, фиксируемой на объективе, мы получили ряд изображений, которые в дальнейшем обрабатываются с помощью программы AxioVision фирмы CarlZeiss, либо с помощью программного обеспечения фирмы Levenhuk. Так как, по мере увеличения расстояния распыления, уменьшается количество частиц, осевших на пластину, то начальные участки имеют более малый размер: 1 мм, 2 мм, 5 мм, 10 мм. Для каждого участка сделано около 100 измерений.

Полученные результаты экспериментов представлены на рис. 2-5. На рис. 2 и 3 показаны зависимости среднего размера частиц от расстояния распыления при различных давлениях и температурах расширительного устройства, где ось абсцисс представлена отношением расстояния распыления (x) к диаметру сопла (D).

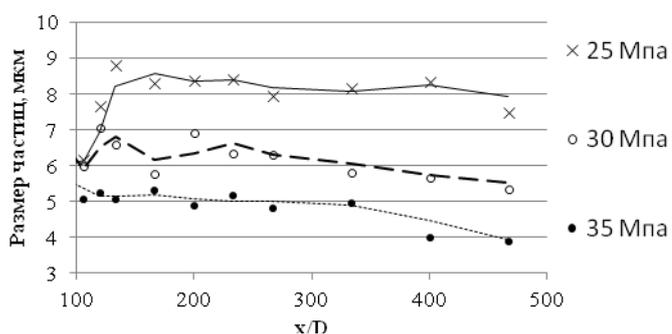


Рис. 2. Влияние расстояния распыления на средний размер частиц при различных давлениях, при $t=50$ °С, $t_{y.p.}=70$ °С, $D=150$ мкм, $L=2000$ мкм

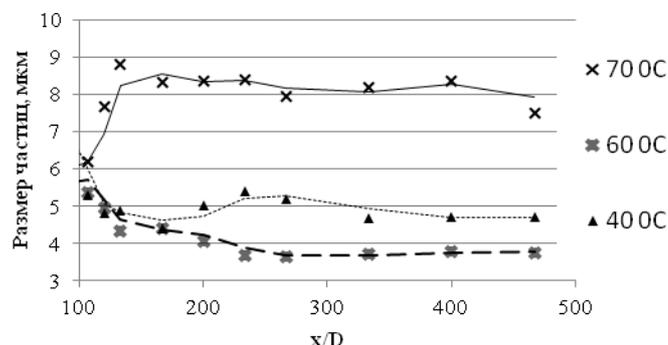


Рис. 3. Влияние расстояния распыления на средний размер частиц при различных температурах устройства расширения, при $t=50$ °С, $P=25$ МПа, $D=150$ мкм, $L=2000$ мкм

Наиболее интенсивное изменение наблюдается на участке x/D от 0 до 100, далее с увеличением расстояния распыления средний размер изменяется незначительно.

Сами процессы зародышеобразования, роста и коагуляции протекают одновременно во всем объеме. Для более объективной оценки преобладания того или иного процесса были построены гистограммы распределения по размерам, представленные на рис. 4 и 5.

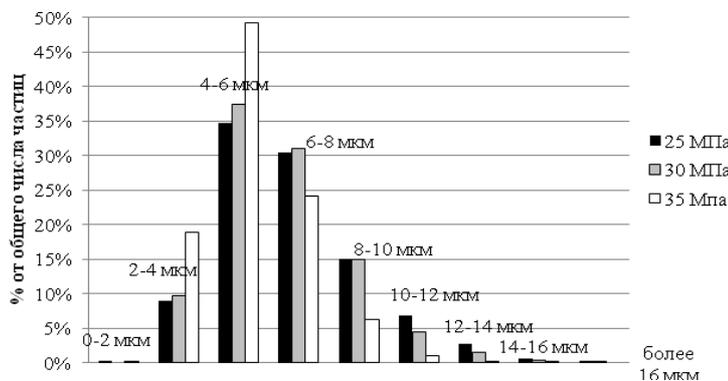


Рис. 4. Гистограмма распределения по размерам при различных давлениях, при $t=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{y.p.}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $D=150\text{ мкм}$, $L=2000\text{ мкм}$

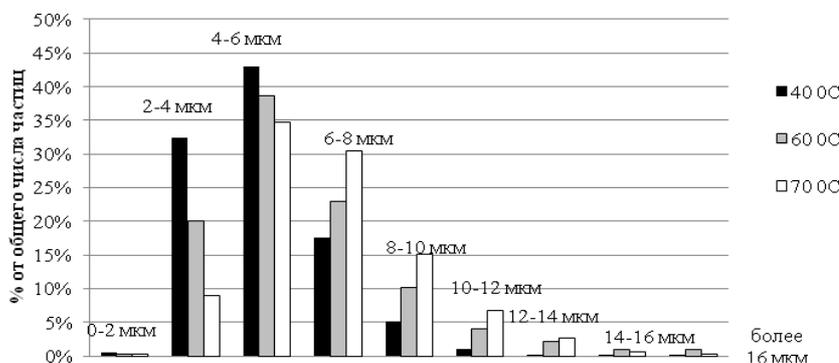


Рис. 5. Гистограмма распределения по размерам при различных температурах расширительного устройства, при $t=50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=25\text{ МПа}$, $D=150\text{ мкм}$, $L=2000\text{ мкм}$

Полученные результаты показывают, что на всем этапе формирования частиц преобладает процесс зародышеобразования, о чем нам говорит большое количество частиц с диапазоном размеров от 4 до 6 мкм (34-49%).

Также выявлено, что с повышением давления увеличивается количество частиц в диапазоне размеров 2-6 мкм и сокращается в диапазоне 8-16 мкм. С повышением температуры расширительного устройства наблюдается обратный эффект. Происходит уменьшение количества частиц с размерами в диапазонах от 2 до 8 мкм и увеличение в диапазонах от 8 до 16 мкм, что говорит о частичной интенсификации процесса роста частиц.

На изменение среднего размера частиц влияет сразу ряд факторов. В первую очередь это геометрия потока. Высокая скорость потока на начальных этапах приводит к возникновению диска Маха, где разрушаются частицы, образованные в результате коагуляции, и кластеры. Встречающиеся далее турбулентные потоки также влияют на скорость зародышеобразования и роста.

Вторым фактором является сложное строение теплового поля струи. Понижение температуры увеличивает скорость зародышеобразования и уменьшает размер частиц, одновременно с этим происходит понижение вязкости, так как мы имеем дело с

газами. В свою очередь низкая вязкость соответствует высокой частоте столкновения молекул, что также интенсифицирует процесс зародышеобразования.

Третий фактор - концентрация растворенного вещества в области формирования частиц. Для достижения более высокой скорости зародышеобразования следует добиваться как можно большей степени перенасыщения. Говоря о растворении антрацена в сверхкритическом диоксиде углерода, с повышением давления повышается и его растворимость. Соответственно при более высоких давлениях на выходе мы получим систему с большей концентрацией антрацена, что приведет к увеличению скорости зародышеобразования и уменьшению среднего размера.

Вывод

Размер микрочастиц существенно зависит от параметров используемого сверхкритического флюида и условий проведения опыта. Экспериментально установлено, что при повышении давления средний размер частиц уменьшается, при повышении температуры расширительного устройства наблюдается отрицательный эффект. Во всех случаях большинство получаемых частиц имеют размеры в диапазоне от 2 до 8 микрометров, что говорит о преобладании процесса зародышеобразования. В свою очередь это доказывает эффективность метода RESS при производстве лекарственных препаратов.

Благодарность

Работа выполнена в рамках Соглашения №14-08-31319\15 от 05.05.2015 с федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский фонд фундаментальных исследований».

Литература

- [1] Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии. М.: «Химия». 1975. 512с.
- [2] Кузнецова И.В. Диспергирование ибупрофена методом быстрого расширения сверхкритического раствора. И.В. Кузнецова, Р.Р. Илалов, И.И. Гильмутдинов, И.М. Гильмутдинов, А.А. Мухамадиев, Сабирзянов А.Н. Вестник Казанского технологического университета. *Казань*. 2011. №3. С.38-43.
- [3] Кузнецова И.В. Гидродинамика и зародышеобразование в канале и свободной струе в процессе быстрого расширения сверхкритического раствора. И.В. Кузнецова, И.И. Гильмутдинов, И.М. Гильмутдинов, А.А. Мухамадеев, А.Н. Сабирзянов. Вестник Казанского технологического университета. *Казань*. 2012. №1. С.111-118.
- [4] Мустаев Т.Т. Влияние температурных полей в процессе быстрого расширения сверхкритического флюидного раствора из микронных сопловых каналов на зародышеобразование и рост частиц. Л.О. Плигускин, И.В. Кузнецова, И.И. Гильмутдинов, И.М. Гильмутдинов, А.Н. Сабирзянов. Вестник Казанского технологического университета. *Казань*. 2014. №21. С.128-131.

СОЗДАНИЕ ПОРИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Сандугей Н.С., Кузнецова И.В, Гильмутдинов И.И,
Гильмутдинов И.М, Сабирзянов А.В.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.
E-mail: office@kstu.ru*

Пористые материалы имеют широкое применение в современной промышленности. Так в фармацевтике из пористых материалов создаются имплантаты костной ткани, а источники медленного высвобождения лекарственных препаратов в организме человека; в химическом и пищевом производстве пористые материалы используются как мембраны и фильтры для улавливания различных веществ. Создание же пористой структуры достаточно энергоемкий процесс. Традиционные методы предполагают использование органических растворителей, что в свою очередь создает необходимость к дополнительной очистке и более сложной аппаратной реализации. Использование сверхкритических флюидных технологий является альтернативным способом, который уже успел зарекомендовать себя в некоторых странах. Благодаря низкой вязкости и высокой диффузии сверхкритический флюид способен проникать вглубь обрабатываемого материала и обеспечить более равномерное распределение пор в образце. Также получаемый на выходе продукт полностью избавляется от остаточного растворителя, так как при сбросе давления сверхкритический флюид переходит в газообразное состояние и улетучивается.

В данной работе было проведено исследование по созданию пористой структуры на основе полиэтилена 1000, в качестве сверхкритического флюида использовался диоксид углерода (CO₂). Для данного исследования была разработана установка, позволяющая обрабатывать образцы статическим методом. Для анализа образцов использовались: конфокальный лазерный сканирующий микроскоп марки LEXTOLS 4000 (производство фирмы Olympus) для определения структуры волокон. Для получения срезов полимеров используется ротационный микротом «Ротмик 2П». Микротом предназначен для быстрого, качественного получения тончайших срезов объектов толщиной от 0,25 до 60 мкм.

Первый этап исследования заключался в определении оптимальных параметрах проведения процесса, при которых достигается максимальное значение пористости образца, определяемое путем измерения объема образца до и после эксперимента. Эксперименты проводились при изменении одного из термодинамических параметров, таких как давление системы, температура выдержки, время выдержки, температура выдержки после сброса давления, время сброса давления, время выдержки образца после сброса давления. На рис. 1 представлены изображения срезов образцов до и после эксперимента.

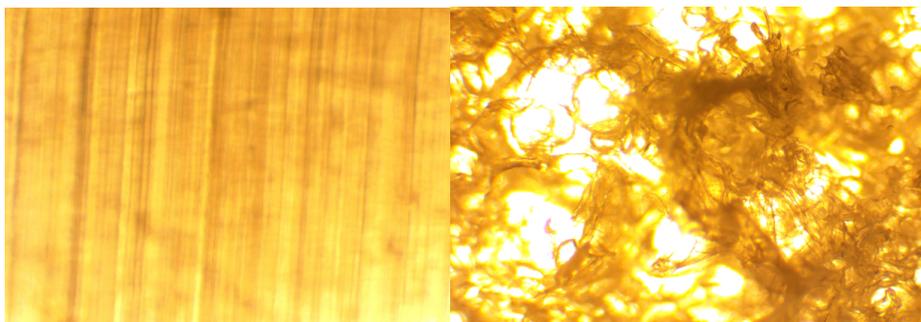


Рис. 1. Экспериментальные образцы до и после эксперимента

Было замечено, что при повышении температуры и давления в системе приводит к увеличению пористости образца. Это объясняется тем, что в ходе приближения к температуре плавления образца (130-135 °С), образец становится более пластичным, позволяя сверхкритическому CO₂ проникать в глубь образца. Также был сделан вывод что для получения равномерного и большого количества пор в материале, необходимо затрачивать большее время на обработку образца и сброс давления, с целью развития и сохранения пористой структуры.

Второй этап исследования заключался в определении среднего размера пор внутри полученного образца. Срезы, полученных образцов, подвергались обработке под микроскопом, далее с помощью микроскопа программного обеспечения компании Levenhuk определялся размер пор и выявлялся их средний размер. На рис. 2 представлены изображения срезов на определенном расстоянии от края образца.

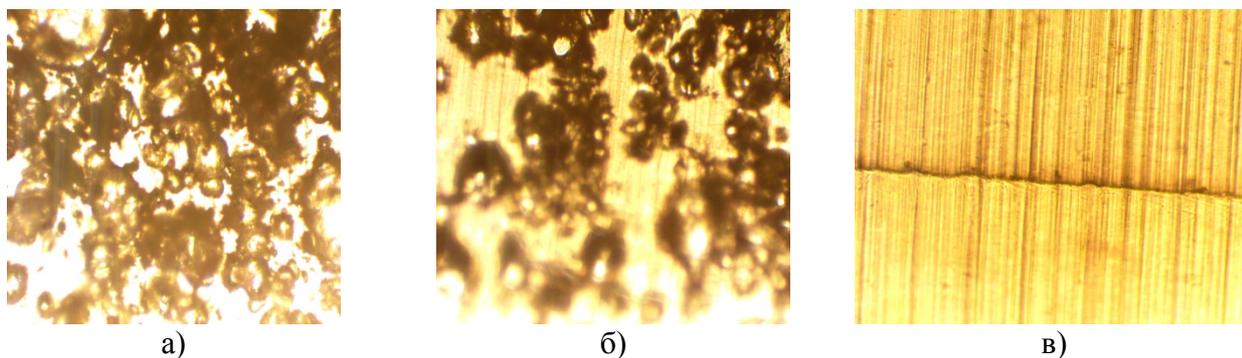


Рис. 2. Изображение срезов образца: а) 0,3 мм от края, б) 0,6 мм от края, в) 0,9 мм от края

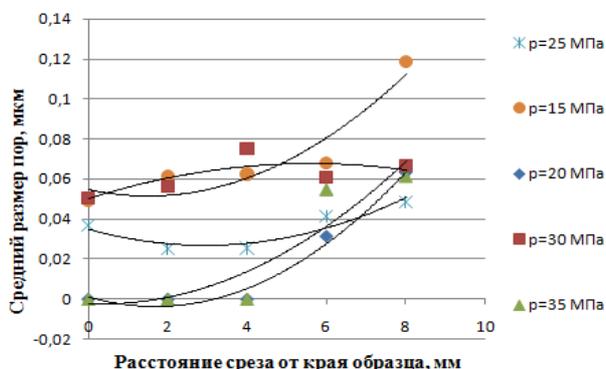


Рис. 3. Зависимости среднего размера пор от расстояния среза при $T_{\text{выд}}=130\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{выд}}=180\text{ мин}$, $T_{\text{сб.д}}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{сб.д}}=30\text{ мин}$, $t_{\text{выд.сб}}=120\text{ мин}$

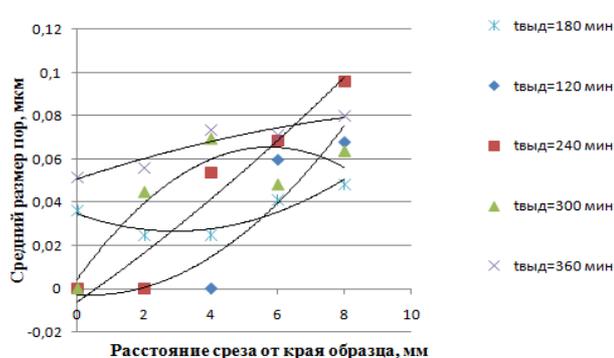


Рис. 4. Зависимости среднего размера пор от расстояния среза при $T_{\text{выд}}=130\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=25\text{ МПа}$, $T_{\text{сб.д}}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{сб.д}}=30\text{ мин}$, $t_{\text{выд.сб}}=120\text{ мин}$

Из рис. 2 видно, что распределение пор неравномерно и по мере увеличения расстояния среза наблюдается меньшее количество пор. Это объясняется тем, что края образца максимально подвержены взаимодействию сверхкритического CO_2 под высоким давлением. Ближе к центру проникающая способность CO_2 падает. Это связано с тем, что на образец со всех сторон действует высокое давление, которое в свою очередь и не позволяет проникнуть диоксиду углерода вглубь.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости среднего размера пор от расстояния среза при различных параметрах проведения процесса.

Выводы

Наиболее оптимальное значение температуры выдержки 130 °С, так как образец становится более пластичным облегчая диффузию сверхкритического CO_2 . Давление выдержки в системе 15 МПа также позволяет CO_2 лучше проникать вглубь образца обеспечивая более равномерное распределение пор. Более длительное время обработки и сброса давления обеспечивают более развитую и целостную пористую структуру образца.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-4440.2014.8.

Литература

- [1] Гумеров Ф.М. Суб- и сверхкритические флюиды в процессах переработки полимеров. Ф.М. Гумеров, А.Н. Сабирзянов, Г.И. Гумерова. *Казань. изд-во «ФЭН»*. 2007.
- [2] Никитин Л.Н. Формирование пористости в полимерах с помощью сверхкритического диоксида углерода. Л.Н. Никитин, А.Ю. Николаев, Э.Е. Саид-Галиев и др. СКФ ТП. Т.1. №1. 2006.
- [3] Патент РФ №2263894.
- [4] Абдуллин И.Ш. Исследование пористости сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного в среде сверхкритического диоксида углерода. И.Ш. Абдуллин, И.А. Сунгатуллин, И.А. Гришанова и др. *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т.16. №4. С.152-154.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫТЕСНЕНИЯ НЕФТИ ПРИ ПОМОЩИ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО CO_2

Ханмурзин Б.С., Закиев И.Д., Давлетшин А.А., Сабирзянов А.Н., Радаев А.В.
Казанский национальный исследовательский технологический университет.
E-mail: trapgo@gmail.com

На сегодняшний день в нефтяной отрасли России можно отметить завершение этапа «легкой» добычи нефти. Большинство месторождений характеризуются высокой обводненностью и нефтенасыщенность нефтяных пластов. При этом вторичные методы увеличения нефтеотдачи не имеют достаточной эффективности, что наталкивает на разработку и введение в промышленную эксплуатацию новых третичных технологий и методов увеличения нефтеотдачи.

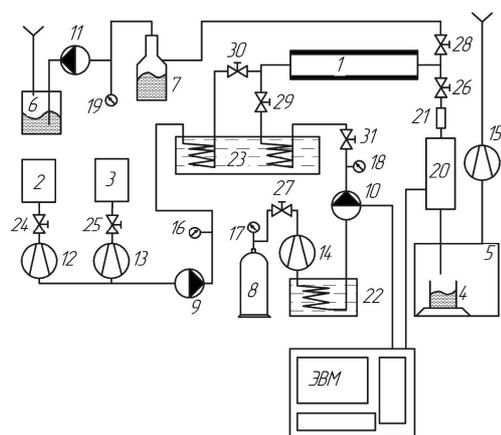


Рисунок. Схема экспериментальной установки [1]: модель пласта (1); бак питательный с водой (2); бак питательный с нефтью (3); нефтесборник (4); приемную емкость газов (5); приемная емкость нефти (6); колба Бунзена (7); баллон с CO_2 (8); насосы высокого давления для нефти/воды (9) и для CO_2 (10); насос вакуумный (11); расходомер для воды (12); расходомер для нефти (13); расходомеры массовые для CO_2 (14, 15); манометры (16-19); Back Pressure Regulator (20); фильтр (21); криостат (22); термостат (23) и вентили запорные (24-30).

Одной из перспективных технологий является технология вытеснения нефти при помощи сверхкритического диоксида углерода. Для получения достоверной математической модели, описывающей поведение нефтеотдачи нефтяного пласта, необходимо определить эмпирические зависимости вытеснения нефти при помощи сверхкритического диоксида углерода. Наиболее доступным способом получения таких зависимостей является проведение серии экспериментов на физических моделях нефтяного пласта.

Лабораторная установка (рисунок) [1] позволяет моделировать вытеснение нефти из терригенных однородных пластов сверхкритическим CO_2 и оторочками сверхкритического CO_2 и воды. Установка представляет собой совокупность узлов контроля температуры и давления, пробоотбора и закачки вытесняющих агентов.

Литература

[1] Радаев А.В. Экспериментальная установка для исследования процесса вытеснения нефти при термобарических условиях реальных пластов с использованием сверхкритических флюидных систем. А.В. Радаев, Н.Р. Батраков, А.А. Мухамадиев, А.Н. Сабирзянов. Вестник Казанского технологического университета. Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та. 2009. №3. С.96-102.

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛО-МАССООБМЕННА КОМПЛЕКСНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ

Исламгулов И.Р., Мухачев С.Г., Шагивалеев И.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

Устранение недостатков известных способов гидролиза для получения моносахаридов (глюкозы), этанола, фурфурола, фурана, чистого лигнина, уксусной кислоты и муравьиной кислоты, остатков спиртового брожения и окиси углерода обеспечива-

ется с помощью технологического и экономичного способа гидролиза целлюлозного сырья паром под давлением в сочетании с неорганической кислотой.

В комплексной установке, гидролиз могут проводить с использованием либо одноступенчатого, либо двухступенчатого метода гидролиза в зависимости от требований к оборудованию, при этом процесс гидролиза основан на специальной технологии, заключающейся в следующем: целлюлозное сырье, измельченное до частиц размером от 1 до 5 мм, загружают в стакан реактора; одновременно сырье смачивают раствором неорганической кислоты, составляющей от 0,3 до 10 % масс. исходного сырья; весь объем сырья нагревают до температуры 130-220 °С [1].

В случае проведения одноступенчатого гидролиза раствор полученной смеси веществ, лишенной легколетучих компонентов в результате отдувки водяным паром, имеющий гидромодуль 1:4-1:5, сливается в колбу, расширяясь до атмосферного давления, в результате чего происходит испарение жидкого раствора. Смесь гидролитических сахаридов отделяется от взвешенных твердых частиц фугированием. Непрореагировавшая фаза будет подвергнута ферментному гидролизу и переработана в глюкозу и чистый лигнин.

Ниже приведено описание процесса двухступенчатого гидролиза. На первом этапе гемицеллюлозу расщепляют до пентозы при температуре в диапазоне от 160 до 185 °С и давлении 0,6-1,0 МПа, спустя 30-50 мин, отгоняются легколетучие компоненты паром, открывая нижний клапан сливается жидкая фаза, которая проходит процесс объемного расширения и, в конечном счете получаем более концентрированный гидролизат. Твердая непрореагировавшая целлюлозная фаза остается в реакторе, в который заливается разбавленный раствор неорганической кислоты в отношении 0,1-1% к суспензии, и в реактор подается перегретый водяной пар. В процессе гидролиза происходит достижение равновесия твердой и жидкой фазы. В комплексной установке происходит конденсация водяных паров, в результате чего осуществляется подогрев сырья. При этом достигается рабочая температура 180-220 °С, давление 1,6-3,3 МПа и гидромодуль 1:2-1:3,5, в течение 20-40 мин. В гидролизере происходит гидролитическое расщепление целлюлозы на гидролитические сахариды в виде глюкозы и расщепленную не прореагировавшую целлюлозную фазу.

Дополнительным преимуществом настоящей установки является отгонка легколетучих компонентов, что положительно сказывается на качестве гидролизатов [2]. Паровую смесь, содержащую воду, метанол, уксусную кислоту и муравьиную кислоту, подают на охлаждение в водяной холодильник. Кислоту низкой концентрации используют для проведения гидролиза в объеме 0,3-1 % масс. Наиболее приемлемым является использование фосфорной кислоты, соли которой выступают в качестве нутриентов во время ферментации исходного сырья с получением реализуемой продукции, такой как этанол.

Дополнительным преимуществом производства данного продукта является создание компактной производственной установки и то, что при данном способе используют лигноцеллюлозное и крахмалосодержащее сырье, в результате чего отходы растениеводства могут быть полностью переработаны с использованием безотходного процесса.

Литература

[1] Исламгулов, И.Р. Лабораторный комплекс для исследования процессов гидролиза растительного сырья. Пищевые технологии и биотехнологии: тез. докл. XIV межд. конф. молодых уч. Казань. 13-14 мая 2015г. *Казань: БРИГ. 2015.* С.101.

- [2] Исламгулов И.Р. Комплексная установка для переработки целлюлозосодержащих отходов сельскохозяйственной и лесной промышленности. «Экология и рациональное природопользование агропромышленных регионов»: тез. докл. III межд. мол. науч. конф. Белгород, 10-11 ноября 2015 г. *Белгород*. 2015. С.108.

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ПАРОЭЖЕКТОРНОЙ ВАКУУМСОЗДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ (ВСС) НА ПРИМЕРЕ ВСС УСТАНОВКИ ГИДРОКРЕКИНГА

Осипов Э.В., Теляков Э.Ш., Садыков К.С., Кашифразов Д.И.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: mahp_kstu@mail.ru

Задачей проектирования в рамках данного проекта являлось определение оптимальных рабочих параметров функционирования ВСС, при которых достигались наименьшие затраты энергоресурсов (рабочего агента и хладагента). Поэлементное исследование системы является малоэффективным, поскольку все элементы системы обладают своими характеристиками, конкретные значения которых устанавливаются только в рамках интегративной характеристики сложной химико-технологической системы (СХТС) [1, 2]. На рис. 1 представлена принципиальная технологическая схема проектируемой ВСС.

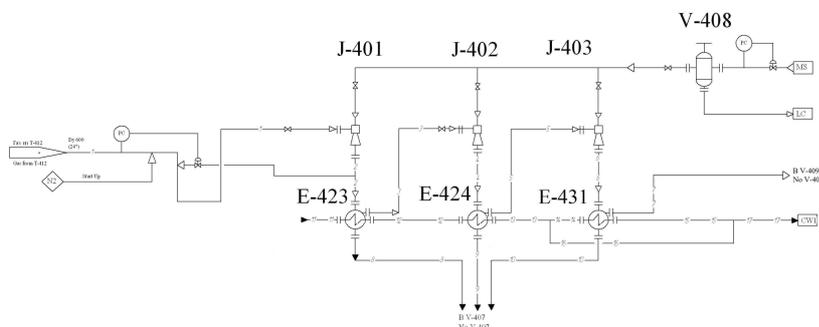


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема проектируемой ВСС

Обозначения аппаратов: J-401 – эжектор первой ступени; E-423 – холодильник-конденсатор первой ступени; J-402 – эжектор второй ступени; E-424 – холодильник-конденсатор второй ступени; J-403 – эжектор третьей ступени; E-431 – холодильник-конденсатор третьей ступени; V-408 – каплеуловитель.

От компоновки основных элементов вакуумного насоса зависит общее энергопотребление системы и её работоспособность. Так как откачиваемая смесь в основном состоит из водяных паров (94 % масс.) то наиболее целесообразнее в первой ступени сконденсировать максимальное количество водяных паров для снижения потребления пара последующими ступенями. Для этого всю оборотную воду требуется подать в трубное пространство холодильника-конденсатора первой ступени, а за тем последовательно подавать в остальные промежуточные конденсаторы. В последней ступени не обязательно обеспечивать низкую температур конденсации, поэтому на эту сту-

пень ставят небольшой теплообменник, а для снижения гидравлических сопротивлений обратную воду разделяют и смешивают после конденсатора последней ступени.

Принцип действия ВСС. Парогазовая смесь с верха вакуумной колонны подаётся на всасывание в паровой эжектор J-401, где смесь сжимается до промежуточного давления за счёт кинетической энергии водяного пара.

Смесь водяного пара и откачиваемой смеси подаётся в межтрубное пространство холодильника- конденсатора E-423, где происходит разделение паровой и жидкой фаз. Сконденсированная жидкая фаза направляется в V-407.

Несконденсированная часть направляется на всасывание в паровой эжектор J-402, где сжимается до промежуточного давления за счёт кинетической энергии водяного пара. Образовавшаяся смесь подается в межтрубное пространство холодильника-конденсатора E-424, где происходит разделение газовой и жидкой фаз. Сконденсированная часть сбрасывается в V-407.

Несконденсированная в холодильнике E-424 парогазовая смесь подаётся на всасывание в паровой эжектор J-403, где сжимается до давления выхлопа за счет кинетической энергии водяного пара. Смесь рабочего тела и откачиваемой жидкости после эжектора поступает в межтрубное пространство холодильника-конденсатора E-431, где происходит разделение газовой и жидкой фаз. Сконденсированная часть сбрасывается в V-407.

Основное влияние на откачные характеристики разрабатываемого ПЭНа будут оказывать следующие элементы насоса: паровой эжектор и промежуточный холодильник-конденсатор первой ступени. Согласно литературным данным оптимальное давление нагнетания первой ступени насоса является $P_{наг1}=80$ мм Нг. Однако, данные, представленные в таблице, необходимо корректировать для расчёта конкретной установки, так как в составе откачиваемой смеси содержится значительное количество водяного пара, конденсируемого в конденсаторе первой ступени. Согласно, удовлетворительная конденсация смеси (порядка 90%) достигается при температурах 33-36 °С в интервалах давления 65-75 мм Нг.

Как было изложено выше, откачиваемая смесь сжимается в паровых эжекторах, куда в качестве активной среды подаётся водяной пар. Пар под давлением истекает через расширяющееся сопло со сверхзвуковой скоростью в виде турбулентной или ламинарной струи. Вследствие турбулентного перемешивания вихревых масс паровой турбулентной струи с молекулами откачиваемого газа или вязкостного трения между граничными слоями вязкостной струи и прилегающими слоями газа последний увлекается во входной конус – конфузоре, служащий для обеспечения возможно более полного перемешивания пара с газом. Этот процесс характеризуется равномерностью значений всех параметров смеси (давления, плотности, скорости и температуры) по сечению потока. Вследствие обмена энергиями и возникновения скачка уплотнения давление откачиваемого газа возрастает, достигает статического давления смеси, а скорость потока уменьшается до звуковой. В горле диффузора завершается выравнивание значений параметров смеси, и в расширяющемся выходном конусе происходит дальнейший переход кинетической энергии смеси в потенциальную, который сопровождается уменьшением скорости и увеличением давления смеси до выпускного давления.

Общепринято работу эжектора рассматривать по одномерной теории движения газа, в которой используются несколько безразмерных параметров:

- коэффициент эжекции n – отношение расхода сжимаемого газа к расходу рабочего газа;
- степень расширения E – отношение полных давлений рабочего и сжимаемого газов;
- степень сжатия ε – отношение давления за эжектором к давлению откачиваемой среды;
- геометрический параметр эжектора α – отношение площадей потоков рабочего и сжимаемого газов в камеру смешения;
- отношение температур сжимаемого и рабочего газов θ .

Коэффициент эжекции и степень сжатия, которые и будут определять требуемый расход водяного пара, определяется по уравнениям (1)-(3).

$$n = \frac{A_2}{A_1} \frac{1}{E\alpha\sqrt{\bar{c}}\theta} \frac{q(\lambda_2)}{q(\lambda_1)} \quad (1)$$

$$A = k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{A_3}{A_1} \frac{\sqrt{(n+1) \left(1 + n\bar{c} + v \right)}}{1 + \frac{1}{\alpha}} \frac{q(\lambda_2)}{q(\lambda_3)} \quad (3)$$

$\bar{c} = \frac{c_{p2}}{c_{p1}}$ – отношение теплоёмкостей, а индексы 1,2 и 3 относятся к параметрам рабочего, откачиваемого и смешанного потоков соответственно.

Количество водяного пара, необходимого для сжатия откачиваемой смеси до промежуточного давления, а также само промежуточное давление смеси после парового эжектора, определялись по формулам (1) и (3). Графическая зависимость количества, затрачиваемого водяного пара от достигаемого давления после эжектора представлена на рис. 2. Явление конденсации рабочего тела при истечении через активное сопло эжектора учитывалось в соответствии с [2].

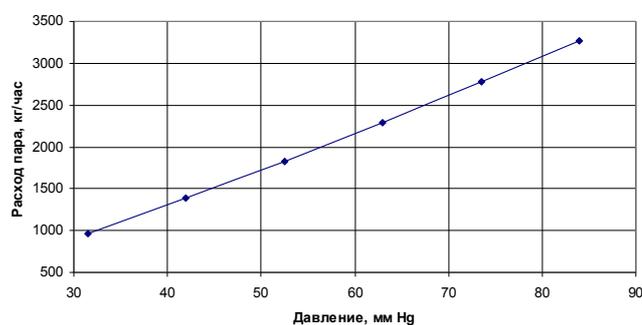


Рис. 2. Количество затрачиваемого водяного пара от давления нагнетания

Тепловая нагрузка на конденсатор, в зависимости от давления нагнетания за первой ступенью при температуре конденсации 320 °С, приведена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, с уменьшением давления нагнетания снижаются затраты водяного пара, однако при давлениях ниже 50 мм Нг водяные пары конденсируются не полностью, что приводит к дополнительной нагрузке на последующие ступени. Для

увеличения степени конденсации (отношение количества образовавшегося конденсата к исходному количеству смеси) в первую ступень необходимо подавать больше оборотной воды, что ведёт к дополнительным затратам.

Расчёт ВСС проводился с использованием системного подхода, когда исходная система «разделялась» на несколько более низкие иерархические объекты.

При ориентировочном значении коэффициентов теплопередачи $k_{op} = 150$ ккал/($m^2 \cdot ^\circ C$), требуемая площадь теплообмена приведена на рис. 3.

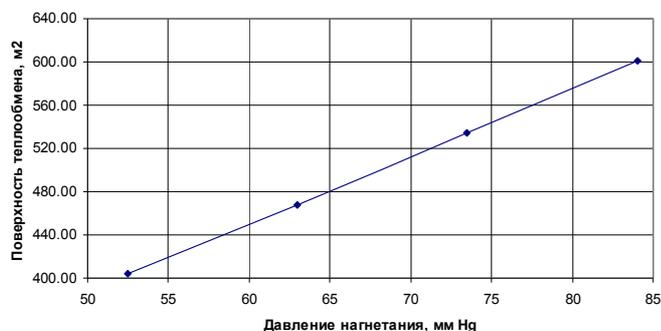


Рис. 3. Поверхность теплообмена в зависимости от давления нагнетания

Для обеспечения заданного съёма тепла из нормального ряда конденсаторов по ТУ 3612-023-00220302-011200 «Аппараты теплообменные кожухотрубчатые с плавающей головкой, кожухотрубчатые с U-образными трубами» выбираем конденсатор КП-1.6-2.5-М1/20Г-6-Т-2-У-И с поверхностью теплообмена 609.7 м².

Данный теплообменник представляет собой горизонтальный кожухотрубчатый поверхностный горизонтальный конденсатор с плавающей головкой, длина теплообменных труб 6 м, число ходов по трубам 2, расположение труб в трубной решетке по вершинам квадрата, диаметр труб 20 мм, с креплениями для теплоизоляции, климатического исполнения У.

Однако данный теплообменник необходимо пересчитать на конкретные производственные условия. Основными требуемыми результатами расчета являются количество несконденсированной среды, гидравлические сопротивления, температуры в трубном и межтрубном пространствах

Дальнейшее увеличение степени сжатия нецелесообразно, так как количество смеси, несконденсированной в конденсаторе практически не изменяется, а расход пара увеличивается на 494 кг/час. В соответствии с подходом, изложенным выше, определялись степени сжатия по оставшимся ступеням насоса.

Для учета подсоса инертного газа (атмосферного воздуха) не было данных по геометрии основной колонны, так как эти сведения являются «ноу-хау» фирмы изготовителя. Однако величина подсоса воздуха будет влиять решающее значение на величину несконденсированной на первой ступени насоса смеси, которая идет на всасывание во II ступень.

Таким образом, определение оптимальных степеней сжатия позволило снизить общее энергопотребление на 494 кг/час при сохранении требуемых параметров работы ВСС. Следует так же отметить, что температура хладагента достаточно высока и характерна для летних месяцев работы ВСС. В зимние месяцы работы, когда температура оборотной воды меньше, а также при загрузке колонны по сырью на уровне 60% от номинала следует ожидать снижение остаточного давления вверху колонны.

Литература

- [1] Осипов Э.В., Шоипов Х.С., Теляков Э.Ш. Реконструкция вакуумсоздающей системы (ВСС) колонны разделения мазута. Вестник Казанского технологического университета. №3; Казан. гос. технол. ун-т. *Казань: КГТУ. 2014. С.209-212.*
- [2] Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М., Наука. 1969. 824с.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ КОЛОННЫ РАЗДЕЛЕНИЯ МАЗУТА НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ВАКУУМСОЗДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Осипова А.И., Салин А.А.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.
E-mail: mahp_kstu@mail.ru*

В данной работе в качестве объекта исследования выбран блок вакуумной ректификации мазута (рис. 1) установки первичной переработки нефти одного из нефтеперерабатывающих заводов России. Вакуумная часть установки состоит из:

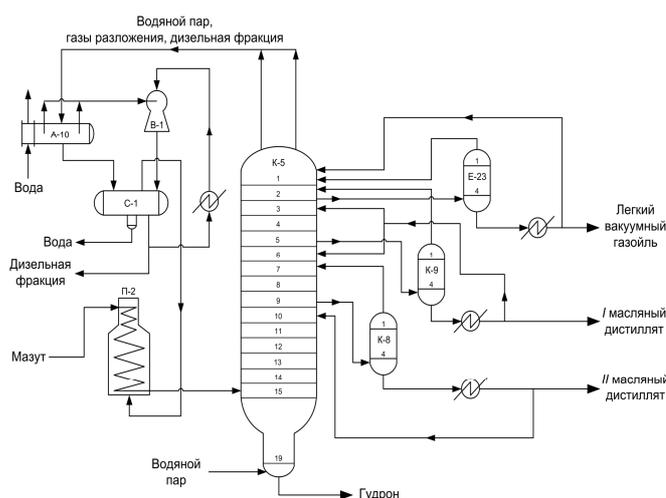


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема блока вакуумной переработки мазута: К-5 – вакуумная колонна; Е-23, К-8, К-9 – стриппинги; П-2 – трубчатая печь; С-1 – сепаратор; А-10 – конденсатор вакуумный; В-1 – вакуумный насос.

- печи подогрева мазута;
- вакуумной колонны (ВК) для разделения мазута на масляные дистилляты и гудрон;
- системы, создающей вакуум в колоннах;
- системы регенерации тепла масляных дистиллятов и гудрона.

Поэлементное исследование системы является малоэффективным, поскольку все элементы системы обладают своими характеристиками, конкретные значения которых устанавливаются только в рамках интегративной характеристики СХТС. В настоящее время исследование подобных систем наиболее эффективно проводится в средах специальных моделирующих систем (например, в среде CHEMCAD, HYSYS и PRO/II) [3].

Пакет ChemCad обладает достаточно мощной базой для моделирования самых разнообразных процессов и аппаратов химической технологии, в том числе и ректификационных колонн. Однако специализированного модуля для расчета ВСС в пакете нет. В настоящее время в установках вакуумной ректификации в области вакуума 40 мм рт. ст. и выше наиболее перспективно использование в качестве ВСС гидроциркуляционных систем на базе или жидкостно-кольцевых вакуумных насосов (ЖКВН), или жидкостных эжекторов (ЖЭ). В обоих случаях в качестве рабочего тела используются дистиллятные продукты самих ректификационных колонн, имеющие максимальное термодинамическое сродство между рабочей жидкостью и откачиваемыми средами, поскольку они имеют одну и ту же физико-химическую природу. Поэтому возникает задача разработки специализированных модулей ВСС с использованием возможностей базы данных пакета ChemCad.

На основании вышеприведенной схемы (рис. 1) и данных технологического режима в среде программного комплекса CHEMCAD синтезирована расчетная схема блока вакуумной ректификации мазута (рис. 2). Цифры, заключенные в круглую рамку, характеризуют номера аппаратов, а заключенные в квадратные рамки – номера материальных потоков.

Трубчатая печь (аппарат 1) нагрева исходного сырья моделировалась при помощи модуля Fired Heater (FIRE), который рассчитывает тепловую нагрузку, необходимую для проведения процесса, и, следовательно, потребление топлива, требуемого для нагрева целевого потока до заданной температуры. Водяной пар (поток 2), подаваемый в змеевики печи П-2, и газы разложения (поток 4), образующиеся при термической деструкции мазута, подавались к основному сырьевому потоку 3 с помощью модуля Stream Mixer (MIXE) (аппарат 2). Модуль MIXE смешивает несколько входных потоков и выполняет расчет фазового равновесия адиабатически при заданном выходном давлении смесителя.

Моделирование вакуумной колонны (аппарат 3) в данной работе проведено с использованием модуля точного расчета колонны Tower Plus (TPLS), который позволяет проводить расчет массообменных колонн любого типа. При этом боковые стриппинги, циркуляционное орошение, подача водяного пара в куб колонны и теплообменники на линии вывода боковых продуктов рассматриваются как часть модуля TPLS, и рассчитываются одновременно с основной колонной без выполнения рецикловых вычислений.

Расчет вакуумного конденсатора (аппарат 4) проводился при помощи модуля Heat Exchanger (HTXR). Данный модуль рассчитывает материальный и тепловой баланс конденсационного блока, и возможности программы позволяют провести поверочный расчет теплообменного оборудования.

Вакуумный насос (аппарат 5) рассчитывался с использованием модуля MIXE. Сепаратор (аппарат 7) моделировался с использованием модуля Three Phase Flash (LLVF), который предназначен для точного расчета трехфазного равновесия системы жидкость-жидкость-пар. В аппарате 4 происходит разделение парогазовой смеси (ПГС) на три фазы: газы разложения, дизельная фракция, вода.

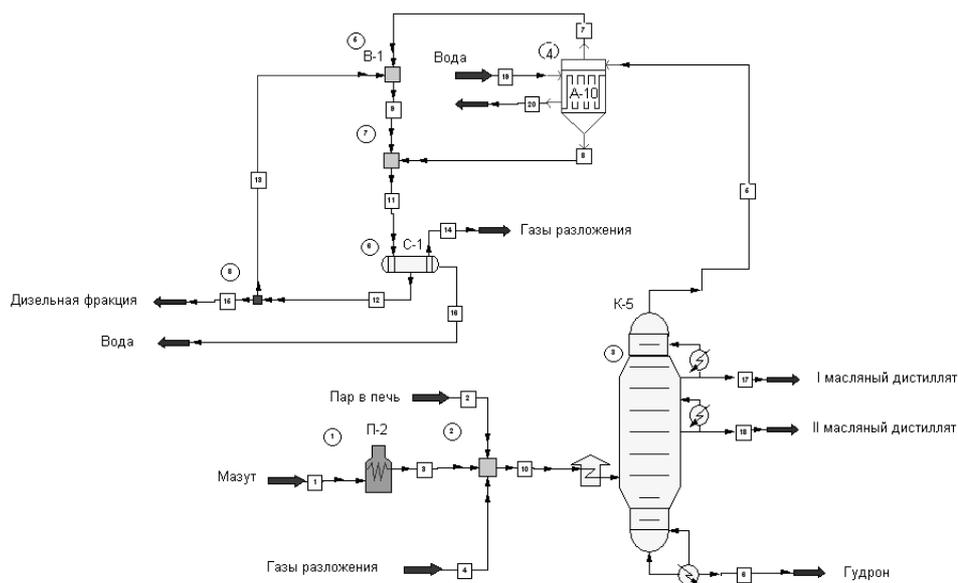


Рис. 2. Модель блока вакуумной переработки мазута. Обозначения аппаратов приведены цифрами в круглом обрамлении: 1 – трубчатая печь; 2, 6, 8 – смесители; 3 – вакуумная колонна; 4 – вакуумный конденсатор; 5 – вакуумный насос; 7 – сепаратор

В рамках оптимизации технологического оформления действующей схемы переработки мазута, изучены следующие параметры СХТС:

- Зависимость температуры верха колонны T_B от количества отбора легкого вакуумного газойля (ЛВГ) $L_{ЛВГ}$ (рис. 3);
- Зависимость количества дизельной фракции (ДФ) $L_{ДФ}$ от количества отбора легкого вакуумного газойля $L_{ЛВГ}$ (рис. 4);
- Зависимость количества дизельной фракции $L_{ДФ}$ от температуры верха колонны T_B (рис. 5).

ДФ и ЛВГ близки по фракционному составу и состоят из углеводородов (УВ), выкипающих в пределах 260-360 °С. Часть углеводородов, которая должна выводиться как ЛВГ, вследствие недостижимости условий конденсации в колонне, выводится в составе ДФ с верха вакуумной колонны. Повышение отбора на 2-ой тарелке ЛВГ приводит к увеличению концентрации в нем углеводородов, уходящих наверх К-5 в составе ДФ. Это, в свою очередь, вызывает снижение T_B , и объясняется тем, что на 1-ую тарелку поступают более низкокипящие УВ, а УВ с более высокой температурой кипения концентрируются в ЛВГ. При последующем увеличении количества, отбираемого ЛВГ, наблюдается закономерное понижение температуры верха колонны. Данная закономерность наглядно описывается зависимостью $T_B = f(L_{ЛВГ})$ (рис. 3).

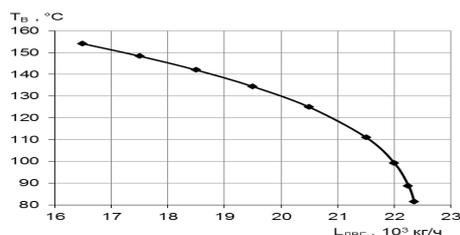


Рис. 3. Зависимость температуры верха колонны от количества отбора легкого вакуумного газойля



Рис. 4. Зависимость количества дизельной фракции от количества отбора легкого вакуумного газойля

Распределение УВ между ДФ и ЛВГ характеризуется линейной зависимостью (рис. 4). Это означает, что количество ДФ, уходящей наверх колонны К-5, прямо пропорционально количеству отбираемого ЛВГ.

Увеличение температуры верха колонны приводит к повышенному уносу компонентов ДФ, входящих в ПГС, отходящей с верха колонны. ПГС поступает на откачку в ВСС через вакуумный конденсатор А-10. Большое содержание ДФ в ПГС создает дополнительную нагрузку на конденсатор А-10 и, следовательно, на ВСС. Данное явление описывается зависимостью $L_{ДФ} = f(T_B)$ и представлено в графическом виде на рис. 5.

Проведенный численный эксперимент показывает, что режим работы блока определяется температурой верха колонны, которая в свою очередь зависит от мощности ВСС. Оптимизация работы вывода ЛВГ поможет понизить нагрузку на ВСС и увеличит глубину создаваемого вакуума.

Количество циркуляционного орошения, подаваемого на 1-ую тарелку не оказывает заметного влияния на температуру верха, однако, для устойчивой работы вакуумной колонны на тарелке должно находиться определенное количество жидкости, при котором не происходит провала жидкой фазы на нижележащую тарелку.

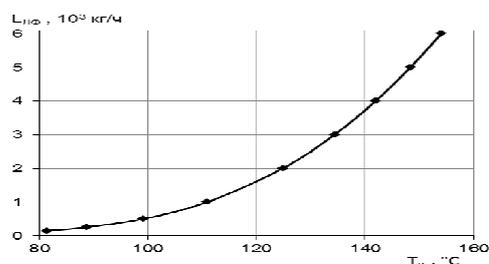


Рис. 5. Зависимость количества дизельной фракции от температуры верха колонны

Синтезированная схема блока разделения мазута позволяет рассматривать отдельные свойства составных частей системы с учетом совокупных свойств всей системы, что позволит составить интегративную характеристику системы.

Литература

- [1] Осипов Э.В., Шоипов Х.С., Теляков Э.Ш. Технологическое обследование вакуумной ректификационной колонны разделения мазута К-3 ТПП «Когалымнефтегаз» (ОАО «Лукойл - Западная Сибирь»). Вестник Казанского технологического университета. №21; Федер. агентство по образованию, Казан. гос. технол. ун-т. *Казань: КГТУ. 2013.* С.283-286.
- [2] Осипов Э.В., Теляков Э.Ш., Поникаров С.И., Садыков К.С. Реконструкция вакуумсоздающих систем отделения переработки отходов производства фенола-ацетона. Вестник Казанского технологического университета. №18; Федер. агентство по образованию, Казан. гос. технол. ун-т. *Казань: КГТУ. 2011.* С.193-201.
- [3] Ефремов Р.А., Сайрутдинов Ф.М., Шоипов Х.С., Теляков Э.Ш. Оценка выхода газов термического разложения мазутов из различных типов нефтей. Вестник Казанского технологического университета. 2013. №2. С.164-167.

ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ АППАРАТА С ЗАВИХРИТЕЛЕМ ПОТОКА ГАЗА ДЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЖИДКИХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Абусев Ф.М., Харьков В.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: v.v.kharkov@gmail.com

Анализ публикаций последних лет показывает, что научный интерес к закрученным потокам по-прежнему растет. Это обусловлено тем, что особые свойства закрученных течений имеют широкий диапазон технических приложений в энергетическом, теплообменном, технологическом оборудовании химической и нефтеперерабатывающей промышленности, промышленной теплоэнергетики, пищевой промышленности. Эти свойства закрученных течений выражаются в их способности интенсифицировать процессы тепло- и массообмена, выравнивать локальные температурные неоднородности за счет конвективного перемешивания, стабилизировать процессы течения в условиях сложного теплообмена при протекании химических реакций.

Большие перспективы имеет использование закрутки потока в технологическом оборудовании линии производства жидких пищевых продуктов. В работе [1] разработан аппарат вихревого типа с тангенциально-лопаточным завихрителем теплоносителя для концентрирования соков в «щадящем» режиме. Схема аппарата представлена на рис. 1.

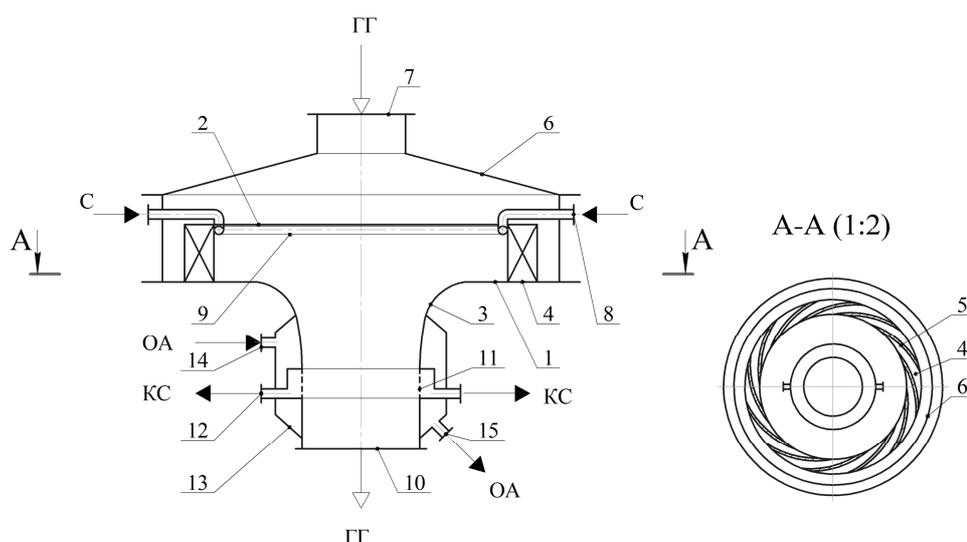


Рис. 1. Вихревой аппарат для концентрирования соков: С – сок; ГГ – газ греющий; ОА – агент охлаждающий; КС – сок концентрированный; 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – днище; 4 – завихритель; 5 – лопасти; 6 – устройство газораспределительное; 7 – патрубок ввода газа; 8 – патрубок ввода жидкости; 9 – ороситель трубчатый; 10 – патрубок выхода газа; 11 – отсекаль щелевой; 12 – патрубок выхода концентрата; 13 – рубашка охлаждающая; 14, 15 – технологические патрубки

Вихревой аппарат [2] состоит из цилиндрического корпуса, плоской крышки, днища, образующих рабочий объем камеры, причем днище может иметь различный профиль (плоский, конический, гиперболический и разные их сочетания); тангенциального завихрителя, изготовленного из профилированных по дуге окружности направляющих лопастей. Газораспределительное устройство, смонтированное над крышкой камеры, имеет осевой патрубок ввода греющего газа. Подвод сока осуществ-

вляется через патрубки в кольцевой трубчатый ороситель, расположенный по периферии внутри рабочей камеры. Центральный патрубок выхода газа содержит сепарационные щели и сливные карманы для отвода концентрированного сока. На наружной обечайке днища и выходном патрубке находится рубашка охлаждения, питаемая охлаждающим агентом через технологические патрубки ввода и вывода.

Аппарат для концентрирования жидких пищевых продуктов в закрученном газовом потоке работает следующим образом.

Газ, предварительно нагретый в калорифере, подается через осевой патрубок газораспределительного устройства в вихревую камеру. Проходя через тангенциально-лопаточный завихритель, газ немедленно закручивается, и в рабочей зоне камеры образуется вращающийся газовый поток. Жидкий продукт на входе в камеру моментально дробится высокоскоростным потоком газа на капли, образуя вращающийся газожидкостный слой. Такое взаимодействие обеспечивает высокую теплообменную эффективность процесса испарения воды с поверхности капель жидкого продукта, что способствует интенсификации процесса концентрирования. Газ удаляется через центральный патрубок. В выходном патрубке капли жидкости отделяются от газового потока, жидкость через щелевой отсекающий стакан попадает в сливной стакан, откуда самотеком выводится из камеры. Чтобы избежать распада витаминов и других полезных веществ, а также к пригоранию продукта и карамелизации сахаров, стенка выходного патрубка постоянно охлаждается.

Вихревые аппараты являются высокоэффективным видом технологического оборудования, но сложная гидроаэродинамическая обстановка и сочетание различных по своей сущности процессов затрудняют создание надежной методики расчета оборудования данного типа и прогнозирование режимов их работы.

В работе [3] приводится метод инженерного расчета с помощью номограмм, основанный на использовании наиболее простых схем математического моделирования закрученных потоков в полых аппаратах вихревого типа. В соответствии с условием взвешивания всех капель жидкости в рабочей зоне камеры радиуса R и функциональной зависимостью для равновесного радиуса капель получены соотношения, объединяющие технологические и конструктивные параметры вихревой камеры для концентрирования соков. Число лопастей завихрителя n варьировалось от 6 до 18 шт., угол наклона лопастей α – от 0 до 45°. Скорость воздуха в живом сечении $W_{вх}$ изменялась от 10 до 40 м/с, а отношение расходов жидкости и газа L/G – от 0,1 до 0,5. Вязкость воздуха ν_r бралась в пределах от $1,95 \cdot 10^{-5}$ до $2,15 \cdot 10^{-5}$ м²/с, отношение плотностей воздуха и сока $\rho_{ж}/\rho_r$ – от 1091 до 1418. Минимальный и максимальный диаметры капли, соответственно, $a_{мин} = 0,1$ мм и $a_{макс} = 0,6$ мм.

На рис. 2 изображена номограмма для определения комплекса Ψ , характеризующего тангенциально-лопаточный завихритель.

На рис. 3-4 изображены номограммы для нахождения технологических комплексов T_1 , T_2 , включающих режимные параметры работы аппарата и физические свойства сред, и конструктивного комплекса K , характеризующего геометрические параметры рабочей камеры.

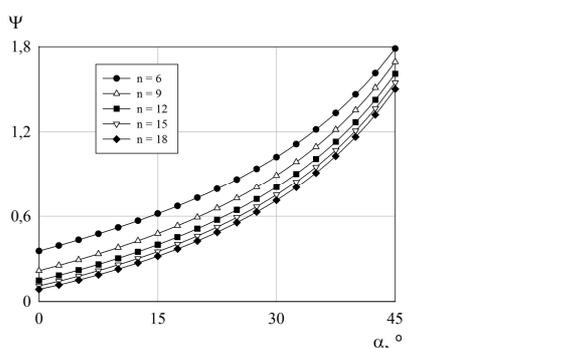


Рис. 2. Номограмма №1

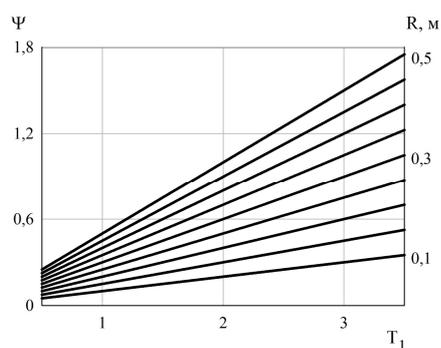


Рис. 3. Номограмма №2

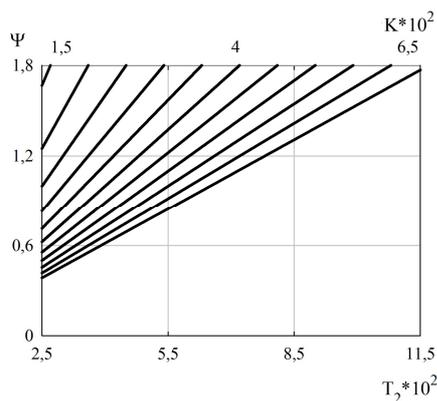


Рис. 4. Номограмма №3

Номограммы просты в использовании, и рекомендуются к применению как на стадии проектирования, так и при выборе оптимальных режимных параметров действующего технологического оборудования для концентрирования жидких пищевых продуктов.

Литература

1. Харьков, В.В. Разработка и исследование аппарата вихревого типа для концентрирования фруктовых соков. В.В. Харьков, А.Н. Николаев. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т.17. №14. С.445-448.
2. Вихревая камера для концентрирования жидких пищевых продуктов в закрученном газовом потоке: пат. 156401 Рос. Федерация: МПК В01D 1/14. В.В. Харьков, А.Н. Николаев; заявл. и патентообладатель В.В. Харьков, А.Н. Николаев. № 2015105533/05; заявл. 18.02.2015; опубл. 10.11.2015. Бюл. № 31. 2с.
3. Харьков, В.В. Расчет конвекционного аппарата с закрученным потоком теплоносителя для концентрирования соков. В.В. Харьков, А.Н. Николаев. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2015. №1. С.94-97.

ЭКСТРАКЦИЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО СЫРЬЯ, ДЕФОРМИРУЕМОГО ПУЛЬСИРУЮЩИМ ПОТОКОМ РАСТВОРИТЕЛЯ

Ефремов И.Б., Николаев А.Н.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.
E-mail: SRV@rambler.ru*

Актуальными задачами производств, перерабатывающих растительное сырьё, являются разработка ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий, а также утилизация их вторичных материальных ресурсов. Такое сырьё используется в лесотехнических комплексах, ликёроводочных предприятиях и заводах по переработке однолетних растений. Из отходов древесины перегретой водой выщелачивают таннины, являющиеся основой дубителей кож. Из плодов экстрагируют фруктовые кислоты, сахара и пищевые красители для ликёроводочных изделий. Из соломы однолетних растений получают отбеленную целлюлозную массу, которую используют в качестве пищевой добавки.

Основными аппаратами этих производств являются диффузоры, в которых гранулированное сырьё обрабатывается растворителем в слое. Эти массообменные аппараты имеют существенные недостатки, связанные с неравномерностью обтекания твёрдых частиц экстрагентом и образованием застойных зон, с уносом частиц сырья и значительным возрастанием гидравлического сопротивления слоя при набухании и деформации частиц сырья [1], что приводит к большому расходу энергии на осуществление технологического процесса.

Недостатки аппаратов устранены в конструкции пульсационного экстрактора [2], схема которого представлена на рисунке. В промышленном экстракторе, обычно, импульсы давления, изменяются по закону гармонических колебаний. При возрастании давления происходит сжатие клетчатки частиц сырья, у плоскости тарелки, ограничивающей высоту слоя, а при сбросе давления полное восстановление деформированной структуры происходит за счёт упругих свойств клетчатки.

Экстрактор работает следующим образом (см. рисунок). Загрузка аппарата 1 осуществляется при поднятой тарелке 2. С целью исключения всплытия сырья тарелку опускают на его поверхность и через патрубок 3 заливают экстрагент. Для создания пульсирующего движения жидкости в слое сырья, прижатого тарелкой, подают импульс сжатого газа в коаксиальный цилиндр через пульсатор, находящийся вне аппарата. Частота пульсации давления газа и жидкости в слое устанавливается в соответствии с технологическим режимом для данного сырья.

Жидкость, находящаяся в коаксиальном цилиндре 4 экстрактора, выдавливается газом в заполненную гранулированным сырьём кольцевую часть аппарата, омывая его. При сбросе давления растворитель с извлечёнными из сырья веществами по закону сообщающихся сосудов возвращается в начальное положение, омывая сырьё обратным потоком. Такое движение растворителя повторяется с заданной частотой.

По мере экстрагирования частицы сырья пропитываются растворителем и разбухают. Порозность слоя уменьшается, гидравлическое сопротивление последнего возрастает.

Поплавок 5 в коаксиальном цилиндре всплывает, перемещая турбину 6 в коаксиальный цилиндр малого диаметра.

Турбина приобретает вращательное движение за счёт возросшей скорости газа. Вал 7 турбины 6 приводит в движение гайку 8 механизма типа “домкрат”, который

поднимает, посредством штанг 9 и коромысла 10, тарелку 2 экстрактора и тем самым восстанавливает прежнюю высоту слоя сырья, его гидравлическое сопротивление и проницаемость. Скорость пульсирующего движения растворителя в слое восстанавливается. Слив готового экстракта производится через патрубок 12.

Аналитически была установлена [3] связь между напряжённым состоянием слоя гранулированного сырья, частицы которого имеют пористую структуру, и усилиями деформации σ , формируемыми колебаниями давления P_0 пульсации растворителя.

$$\sigma = -\frac{P_0}{2\sqrt{1+\beta^2}} \left(\left(\xi - \frac{1}{2} \right) \sin 2\pi\tau + \frac{1}{2} \left| \sin 2\pi\tau \right| \right), \text{ где}$$

β и ξ – безразмерные величины: $\beta = \alpha(1+S)/2\pi$; $\alpha = \kappa\rho gT / \mu\delta S$; κ – константа проницаемости слоя частиц; ρ, μ – плотность и динамическая вязкость растворителя; T – период колебания давления пульсации растворителя; S – площадь сечения слоя сырья; $\xi = x/\delta$; x, δ

Опытным путём показано, что напряжения, возникающие в слое, вызывают объёмные макродеформации, приводящие к переупаковке частиц, изменению проницаемости слоя, а также к деформации скелета их клеточной структуры. Деформации в частицах изменяют их пористость ε за счёт отжима жидкости, поэтому реологические свойства частиц, определяемые связью напряжение-деформация, близкой к упругой, могут быть представлены зависимостью вида $\varepsilon = \varepsilon(\sigma_{xx}^f)$. σ_{xx}^f – компонента тензора эффективных напряжений в слое. Для каждого вида сырья эта зависимость определяется экспериментально, а в аппарате проще отследить напряжённо-деформационное состояние объёма зернистого слоя и самих частиц т.е. $v = v(\sigma_{xx}^f)$.

Изменение проницаемости слоя, в свою очередь, изменяет и скорость существенного влияния на процесс переноса массы от частиц в экстрагент. Деформации же самих частиц оказывают значительное влияние на процесс экстрагирования.

При деформировании частиц с пористой структурой процесс массопередачи, определяется не сколько диффузией, то есть разностью концентраций $(c_2 - c_1)$ сколько объёмами жидкости, выходящей при сжатии из частиц с концентрацией экстрагируемых веществ c_2 и поступающей в них c_1 при следующей за сжатием разгрузкой.

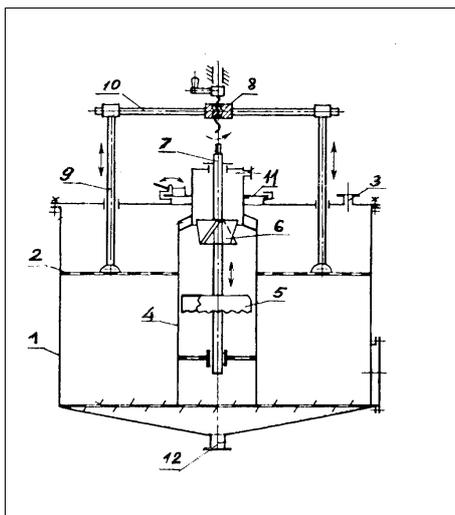


Рисунок. Схема пульсационного экстрактора – границы начала и конца слоя сырья

Наблюдаемая деформация гранулированного природного сырья составляла (15-35)%, при этом эффект “губки” клеточной структуры ускорял на 20% процесс извлечения целевых компонентов растворителем, что в 4 раза превысило скорость диффузионного процесса в производственных аппаратах. Новые пульсационные аппараты были использованы для извлечения дубильных веществ из отходов древесины, для получения экстрактов в ликёроводочной промышленности. Заменив промышленные диффузоры и настоянные чаны на действующих предприятиях, была решена проблема

экологической чистоты и обеспечено ресурсосбережение технологий.

Литература

- [1] Сафин Р.Г. Технологические процессы и оборудование дерево перерабатывающих производств. МГУЛ. Москва. 2002. 688с.
- [2] Патент РФ 2268767. 2006.
- [3] Ефремов И.Б., Шарафутдинов В.Ф., Николаев Н.А., Ефремов Б.А. Экстракция растворимых компонентов из плодов и ягод пульсирующим потоком водно-спиртовой смеси. ХИПС. 2011. №5. С.23-26.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Казанцева Н.С., Кузнецова И.В., Каратаева Е.С.*

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

*Казанский государственный энергетический университет. E-mail: kns1993@mail.ru

На сегодняшний день достаточно остро стоит вопрос о максимально эффективном сохранении тепла, оптимизации параметров микроклимата в помещении, а также об увеличении энергосбережения. Современное общество приходит к пониманию о необходимости внедрения в практику отопления и кондиционирования зданий инновационных устройств, способных обеспечить снижение уровня энергопотребления при сохранении современных требований к тепловому комфорту.

Максимальный эффект следует ожидать при внедрении децентрализованных систем приточновытяжной вентиляции с рекуперацией тепла (СПВВР). В ходе эксплуатации данной системы большое практическое значение приобретают вопросы полезного использования энергетического потенциала отработанных потоков воздуха, загрязненных поллютантами. При этом осуществляется принцип регенерации энергии, результатом которого является снижение тепловых потерь непосредственно в

самом изолированном помещении.

Для определения эксплуатационных характеристик и показателя энергоэффективности системы приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепловой энергии (СПВВР) были проведены научные исследования, в ходе которых использовался экспериментальный образец СПВВР, представляющий собой устройство для утилизации тепла вентиляционных выбросов (рис. 1).

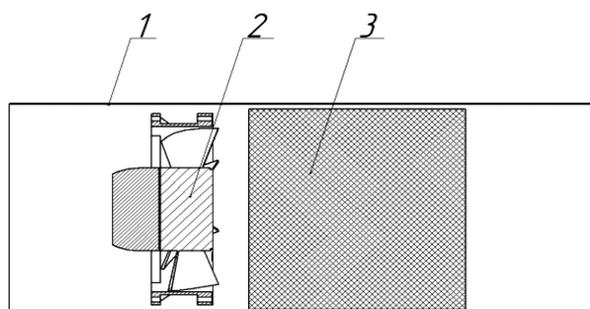


Рис. 1. Экспериментальная модель СПВВР: 1 – металлическая труба; 2 – осевой вентилятор; 3 – насадочный рекуператор

Устройство состоит из металлической трубы с установленным в ней осевым вентилятором и регенерирующей насадкой. На входе и выходе встроены фильтры. Кроме того, на выходе (в помещении) устанавливается решетка (жалюзи). С внешней стороны металлический корпус покрыт пенополиэтиленовой изоляцией. Работа системы утилизации тепла управляется входящим в комплект блоком управления. Блок управления позволяет работать в трех режимах: режим вытяжки; режим притока и энергосберегающий режим. Блок управления в каждом из выше перечисленных режимов позволяет устанавливать на выбор пяти скоростей вращения лопастей вентилятора.

Вставка представляет собой цилиндрический керамический блок с однонаправленными регулярными продольными каналами прямоугольного сечения в виде сот.

Расход воздуха, создаваемый вентилятором приточно-вытяжной установки, определялся на экспериментальной установке (рис. 2), которая состояла из СПВВР 1, измерительного трубопровода 2 длиной 2500 мм и внутренним диаметром 100 мм, лопастного анемометра 3 и тахометра 4. Измерительный

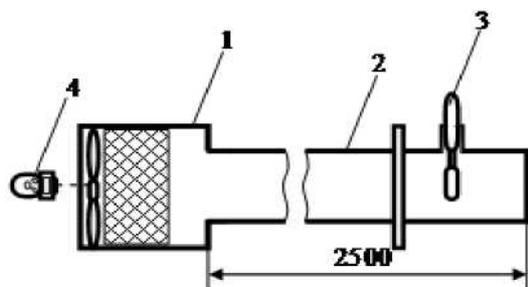


Рис. 2. Установка для определения расхода: 1 – СПВВР, 2 – измерительный трубопровод, 3 – анемометр лопастной MD-12, 4 – тахометр лазерный типа 2790

трубопровод с установленным на нем лопастным анемометром, откалиброванным по эталонной диафрагме ($10-120 \text{ м}^3/\text{ч}$).

Заданием требуемого режима СПВВР по показаниям анемометра определялся расход воздуха, создаваемый вентилятором, а с помощью тахометра измерялась частота вращения вентилятора.

Таким образом, были получены следующие результаты, приведенные в таблице.

КПД рекуператора в режиме энергосбережения определялся на экспериментальной установке (рис. 3), в которую была помещена исследуемая модель устройства (рис. 1).

Таблица. Результаты экспериментальных исследований

Скорость, задаваемая на блоке управления СПВВР	Частота вращения вентилятора, об/мин, в режиме вытяжки	Расход воздуха в режиме вытяжки F , м ³ /ч	Частота вращения вентилятора, об/мин в режиме вытяжки	Расход воздуха в режиме притока F , м ³ /ч
1	1300	17,9009	1300	31,8995
2	1560	22,3449	1560	43,4539
3	2900	27,8999	1850	64,5629
4	2900	31,2329	2300	84,5609
5	2900	88,7827	2900	119,0019

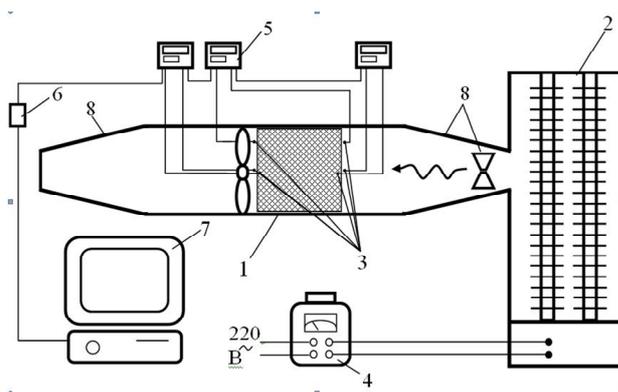


Рис. 3. Экспериментальная установка: 1 – СПВВР; 2 – ТЭН-ы; 3 – безоболочные термопары; 4 – ЛАТР; 5, 6 – система сбора данных; 7 – персональный компьютер; 8 – выравниватель потока

Разность температур создавалась с помощью ТЭН-ов 2, ЛАТР 4 служил для регулирования мощности ТЭН-ов, что позволяло устанавливать необходимую температуру воздуха входящего в СПВВР. Для измерения температуры воздуха на входе и выходе из рекуператора были установлены по три безоболочные термопары 3 с каждой стороны. Измерения на периферии производилось (на расстоянии 60 мм от центра) кордиеритового блока. Система сбора данных 5,6 служила для передачи экспериментальных данных на персональный компьютер 7. Для выравнивания температурного поля по сечению со стороны ТЭН-ов был установлен выравниватель потока 8 со стационарным завихрителем.

Измерения проводились при установившихся температурах на входе и выходе из рекуператора, графики изменения температуры от времени всех термопар высвечивались на мониторе персонального компьютера.

Замер температур производился по центру и на периферии. Измерения по центру велось в двух точках, в 1-ой точке производился замер воздуха (на расстоянии 10 мм от матрицы), во 2-ой точке замерялась, непосредственно температура матрицы (на расстоянии 10 мм перпендикулярно от края матрицы). Температуре воздуха входящего в рекуператор со стороны тэнов $T_v \approx 45$ °С, температура в комнате $T_k \approx 27$ °С. Эксперимент проводился на 3-ей скорости в энергосберегающем режиме МЗ период составлял 60 сек. (заданный режим выбирался на блоке управления СПВВР).

Температурная эффективность (КПД) регенератора определяется следующим образом [1]:

$$\varepsilon_h = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_c = \frac{T_{c,0} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_r} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\varepsilon_h} + \frac{1}{\varepsilon_c} \right), \quad (5)$$

где ε_h – эффективность периода нагрева, ε_c – эффективность периода охлаждения, ε_r – общая эффективность регенератора, $T_{h,i}$, $T_{c,i}$ – температура горячего и холодного воздуха на входе, $T_{h,0}$, $T_{c,0}$ – температура горячего и холодного воздуха на выходе.

На основании полученных данных:

$$T_{h,i} = 46,91 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T_{c,i} = 31,82 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T_{h,0} = 37,55 \text{ }^\circ\text{C}, \quad T_{c,0} = 45,05 \text{ }^\circ\text{C},$$

проведем расчет по формулам (3) и (4):

$$\varepsilon_h = \frac{46,91 - 37,55}{46,91 - 31,82} = 0,62; \quad \varepsilon_c = \frac{45,05 - 31,82}{46,91 - 31,82} = 0,87;$$

И, согласно формуле (5), получаем температурный КПД установки:

$$\varepsilon_c = \frac{1}{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{0,62} + \frac{1}{0,87} \right)} = 0,73$$

На рис. 4 представлен график изменения средних температур по сечению на входе ($T_{\text{ср.гор}}$) и на выходе ($T_{\text{ср.хол}}$) СПВВР в процессе работы в энергосберегающем режиме.

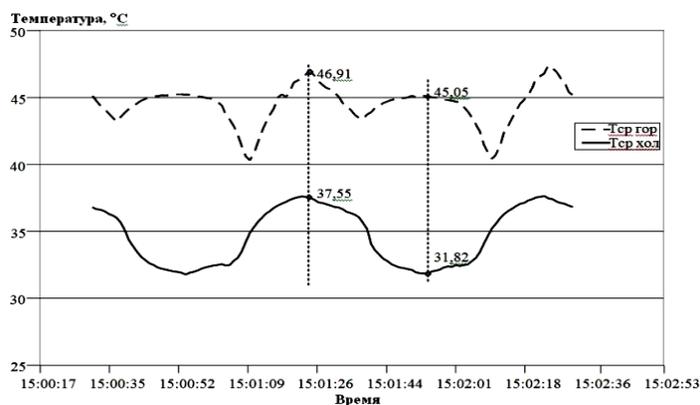


Рис. 4. Изменение температуры во времени

Выводы

По результатам эксперимента температурный КПД установки составил 73%.

В ходе проделанных опытов была выявлена существенная неоднородная температурная и аэродинамическая картина по сечению аппарата, что в итоге приводит к снижению показателей эффективности. Причиной этого можно считать несимметричную работу вентилятора в прямом и обратном направлении [2], а также неоднородное распределение потока по сечению аппарата, особенно с ярко выраженной застойной зоной в центре матрицы.

Заключение

Для эффективного предотвращения отрицательных воздействий на здоровье человека необходимо внедрять децентрализованную энергосберегающую систему приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла (СПВВР).

Опираясь на результаты проведенных исследований, можно сделать следующий вывод. Аппарат обладает энергосберегающими свойствами и может быть применен в системах воздухообмена объектов культурно-бытового назначения (жилые и производственные помещения, а также спортивные объекты).

Литература

- [1] Ramesh K. Shah, Dušan P. Sekulic *Fundamentals of Heat Exchanger Design. John Wiley & Sons, Inc. 2003.*
- [2] Е.С. Каратаева, Н.С. Казанцева. *Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17. №23. С.320-321.*

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПОЛИМОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ МЕТОДОМ PGSS

Махов О.В., Янгулов Э.Р., Гильмутдинов И.И., Гильмутдинов И.М.

Кузнецова И.В., Сабирзянов А.Н.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: fast-95@mail.ru

С применением СКФ (в первую очередь диоксида углерода) осуществляются процессы, которые ранее были невозможны в промышленных масштабах. В первую очередь в СКФ технологиях нуждается фармацевтическая промышленность, которая является одной из наиболее перспективных и быстроразвивающихся областей применения СКФ. Для нее большой интерес представляют лекарства пролонгированного действия. На сегодняшний день существует множество традиционных методов получения композиционных частиц, которые необходимы для адресной доставки действующего начала лекарства в организме. Процессы диспергирования твердых веществ широко распространены в химической и смежных отраслях промышленности. С помощью процесса получения частиц из газонасыщенных растворов (Particles from Gas Saturated Solutions – PGSS) можно получать высокодисперсные композитные частицы, состоящие из двух и более компонентов. Преимуществами PGSS технологии является: низкие затраты газовой составляющей; отсутствие необходимости в использовании органических растворителей; непрерывный режим работы; высокий выход конечного продукта. Использование высокодисперсного полимерного носителя в лекарствах обеспечивают высокую усвояемость лекарственного препарата в организме и равномерное поступление лекарства в течение длительного времени. Дисперсность получаемых частиц во многом определяет интенсивность протекания тех или иных технологических и медико-биологических процессов и влияет на качественные характеристики получаемых продуктов.

Целью данной работы является получение зависимости среднего размера частиц от давления (20–40 МПа). В данной работе в качестве исследуемого материала была использована полимолочная кислота. Полимолочная кислота (PLA) является в настоящее время одним из наиболее перспективных биоразлагаемых полимеров. Важным достоинством PLA является и то, что это термопластичный полимер, который может быть переработан всеми способами, как и известные термопласты. Из него можно производить одноразовую посуду, получать пленки, волокно, упаковку для пищевых продуктов, им-

плантаты для медицины.

В начале эксперимента исследуемые компоненты загружаются в насытитель. Термодинамические параметры процесса задаются и поддерживаются с помощью персонального компьютера. Диоксид углерода поступает с первоначальным давлением 5 – 6 МПа. Как только диоксид углерода перейдет в жидкую фазу, он проходит в расходомер и затем поступает в насос, где сжимается до заданного давления. После прохождения в электронагреватель диоксид углерода переходит в сверхкритическое состояние. Потом сверхкритический диоксид углерода подается под давлением 20-40 МПа. Далее исследуемые компоненты плавятся, а затем насыщаются сверхкритическим флюидом в течение 20 минут. Для увеличения скорости процесса насыщения расплава в насытитель встроена мешалка. Затем сверхкритический раствор поступает в устройство расширения, в котором происходит спад давления. Расширение производится в камере расширения в течение 2 минут. В результате этого насыщенный расплав выпадает в виде субмикронных и микронных композиционных частиц.

Для получения высокодисперсных материалов методом PGSS была создана установка на основе RESS – 100 фирмы Thar Inc. (США), изображенная на рис. 1.

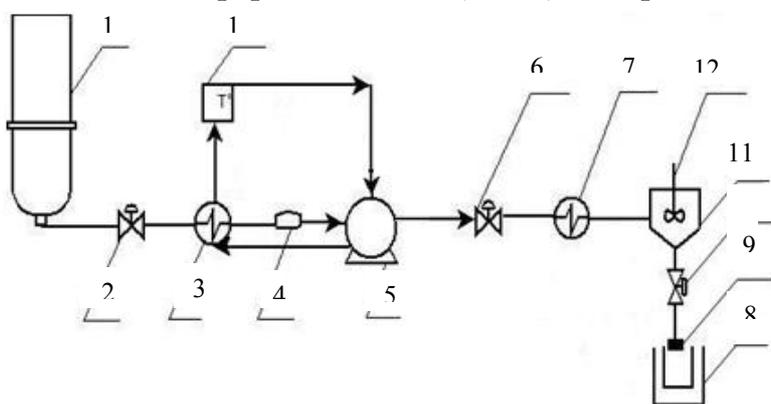


Рис. 1. Экспериментальная установка для получения композиционных частиц методом PGSS:

1 – баллон CO₂; 2,6,10 – вентиль; 3 – теплообменник охладитель; 4 – расходомер; 5 – насос высокого давления; 7 – электронагреватель; 8 – камера расширения; 9 – устройство расширения; 11 – насытитель; 12 – механический смеситель; 13 – термостат

Проанализировав таблицу зависимости среднего диаметра сечения частиц полимолочной кислоты от изменения давления можно сделать вывод, что при увеличении давления средний размер сечения частиц PLA уменьшается, наименьшие размеры частиц были получены при 40 МПа и их размер составил 141 мкм.



Рис. 2. PLA при давлении 20 МПа. и температуре 150 °С



Рис. 3. PLA при увеличении в 40 раз, давлении 20 МПа и температуре 150 °С



Рис. 4. PLA при давлении 40 МПа и температуре 150°C



Рис. 5. PLA при увеличении в 40 раз, давлении 40 МПа и температуре 150°C

В таблице представлены условия и результаты, полученные в ходе эксперимента (см. рис. 2 – 5).

Таблица

№	Давление насыщения, МПа	Темп-ра насыщения, °С	Тем-ра канала расширения, °С	L/D, мкм	Средний размер PLA, мкм
1	20				826
2	25				386
3	30	150	160	1000/0,81	373
4	35				162
5	40				141

Данная работа показывает, что метод PGSS можно использовать в фармацевтической промышленности для получения композитных дисперсных частиц.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Гранта Президента РФ МК-4440.2014.8.

Литература

- [1] Сверхкритические флюидные технологии создания лекарств пролонгированного действия. [Электронный ресурс]-Режим доступа: http://www.thar.ru/netcat_files/212/203/h_d7c8dae75734e24874c6232205b4cedf, свободный.
- [2] Гильмутдинов И.М. Субмикронное и наноразмерное структурирование композиционных материалов в процессах импрегнации и расширения сверхкритических флюидных и газонасыщенных растворов. И.М. Гильмутдинов, И.И. Гильмутдинов, А.А. Мухамадиев, А.Н. Сабирзянов. *Вестник технологического университета*. 2015. Т.18. В.1. С.116-118.
- [3] Мишкин С.И., Тихонов Н.Н., Кирин Б.С., Осипчик В.С. Разработка материалов на основе полимолочной кислоты с улучшенными технологическими свойствами. *Пластические массы*. 2013. №9. С.61-64.
- [4] Сандугей Н.С. Экспериментальное исследование процессов набухания полимеров в среде сверхкритического диоксида углерода. Т.Х. Блинов, И.И. Гильмутдинов, И.М. Гильмутдинов, Сабирзянов А.Н. *Вестник технологического университета*. 2014. Т.17. В.14. С.314-316.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ВАКУУМА НА СТЕПЕНЬ КОНВЕРСИИ И СЕЛЕКТИВНОСТИ ПРИ ДЕГИДРИРОВАНИИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Поникаров С.И., Назаров А.А., Первов Д.Н.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: mahp_Kstu@mail.ru

Актуальность данной работы объясняется тем, что по сравнению с установками для дегидрирования аналогичного углеводородного сырья, работающими под избыточным давлением, данная установка имеет меньшую металлоемкость и простоту конструкции.

Разделение низших углеводородов в настоящее время проводят в присутствии водяного пара, что вызвано необходимостью снижения парциального давления исходных продуктов. Экспериментальная установка дегидрирования позволяет понизить давление исходных продуктов без применения подачи водяного пара, что позволяет исключить из технологической схемы дорогостоящее и сложное теплотехническое оборудование, снизив стоимость производства, а также увеличить степень конверсии исходного сырья в конечный продукт.

В настоящее время на производстве процесс дегидрирования низших углеводородов проводят в присутствии водяного пара, что вызвано необходимостью снижения парциального давления исходных продуктов.

На базе кафедры МАХП КНИТУ создана экспериментальная установка для проведения исследований процессов дегидрирования низших углеводородов под вакуумом. Экспериментальная установка позволяет понизить давление исходных продуктов без применения подачи водяного пара, что позволяет исключить из технологической цепочки дорогостоящее и сложное теплотехническое оборудование, снизив стоимость производства, а также увеличить степень конверсии исходного сырья в конечный продукт.

На рисунке представлена схема экспериментальной установки, состоящей из следующих основных узлов: греющая камера, реакционная камера, теплообменник, конденсатосборник, вакуумсоздающая система (ВСС) – вакуумные насосы, пробоотборная линия, изоляционная система.

Исходное углеводородное сырье поступает из баллонов 1, 2, расход задается при помощи электронного расходомера (ГРАНД [4], класс точности 1,0) 8 после которого поступает в греющую камеру 3. Греющая камера представляет собой зигзагообразную систему труб, последовательно сваренных между собой. На входе в камеру приварена бобышка для установки электронного расходомера 8. Нагрев осуществляется с помощью нихромовой проволоки спирально обмотанной вокруг нагревательной трубы, защищенной от прямого контакта с металлом керамическими бусами. Обмотка разделена на три участка, участки соединены параллельно, для большего теплового эффекта. Питание на обмотку подается через трансформаторы (ЛАТР 0-250V, на схеме не указаны). Площадь поверхности теплообмена составляет 1,04 м² (данной площади поверхности нагрева достаточно для разогрева экспериментальных газов при малых расходах и давлении 0,1 атм. до температуры 600 °С). В виду того, что нихромовая проволока нагревается до температур выше 600 °С, требуемой в реакционной зоне, применяется тепловая изоляция греющей камеры и реакционной камеры. В качестве изоляционного материала используются маты прошивные и вязально-

прошивные марки WATTAT M1-75 из базальтового волокна. Реакционную и нагревательную камеры помещены в прямоугольный саркофаг, выполненный из оцинкованных листов металла.

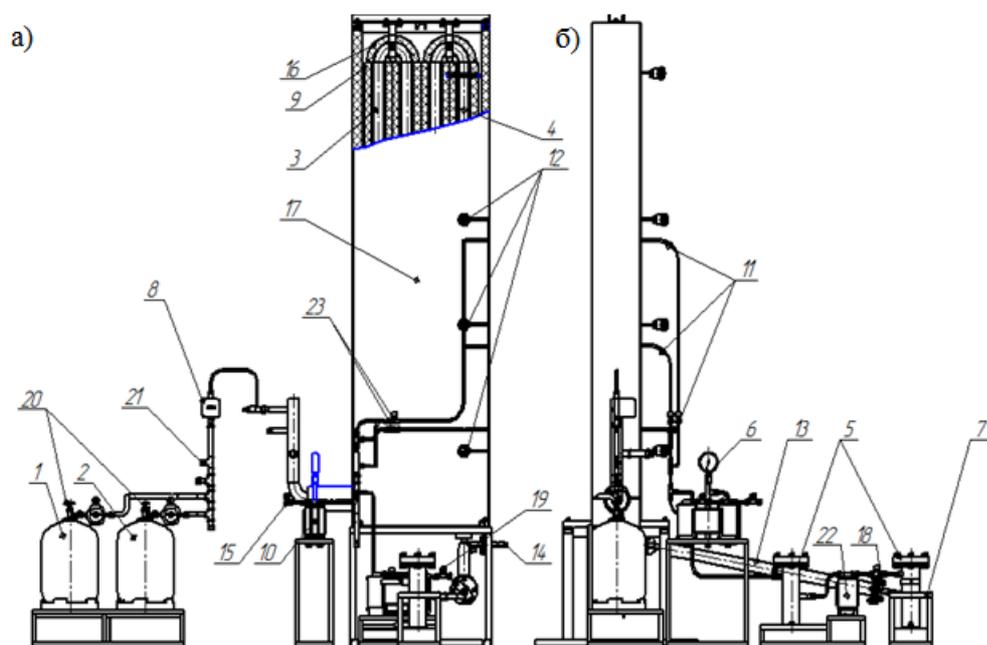


Рисунок. Схема экспериментальной установки дегидрирования низших углеводородов под вакуумом, вид спереди (а), вид слева (б): 1, 2 – баллон (вход); 3 – греющая камера; 4 – реакционная камера; 5 – конденсатосборник; 6 – манометр МЕТЕР ДМ02-100-1-М; – опора; 8 – расходомер; 9 – термозащитная оболочка; 10 – насос для отбора проб вакуумсоздающей системы; 11 – пробоотборник; 12 – термопары; 13 – теплообменник; 14 – вход холодного теплоносителя; 15 – многооборотный вентиль для отбора проб; 16 – греющий элемент (нихромовая проволока); 17 – термозащитный саркофаг; 18 – многооборотный вентиль для регулирования давления; 19 – вентиль для дополнительного пробоотбора; 20 – вентиль, регулирующий подачу исходного сырья; 21 – вентиль для регулировки давления; 22 – безмасляный насос вакуумсоздающей системы; 23 – вентили пробоотборной линии для отбора проб

Нагретое сырье поступает в реакционную камеру 4 и проходит через слой катализатора.

Реакционная камера представляет собой вертикальный трубный реактор. Внутри которого, размещается катализатор, обеспечивающий устойчивое протекание процесса. При этом применение водяного пара исключается, а снижение парциального давления в реакционной зоне достигается за счет создания вакуума в реакционной зоне.

Длина реакционной камеры спроектирована из условия максимально допустимого времени пребывания исходных веществ и продуктов реакции в реакционной зоне, исключающего термическую деструкцию. Обогрев реакционной камеры осуществляется при помощи нагревательной нихромовой проволоки, изолированной керамическими бусами.

Температура в реакционной камере измеряется при помощи термопар ТХА (класс точности 1(°C): ± 1.5 от -40 °C до 375 °C; $\pm 0.004 \times T$ от 375 °C до 1000 °C) 12, которые установлены в варенные по высоте реакционной камеры бобышки. Отбор проб осуществляется с помощью насоса (МВНК 3х4) вакуумсоздающей системы (ВСС) 10 через пробоотборники 11, установленные по высоте реакционной камеры, один ко-

нец погружен в реакционную камеру и имеет множество мелких отверстий для взятия пробы, другой отведен от реакционной камеры на толщину слоя изоляции и имеет на конце резьбовое соединение, для присоединения к линии пробоотборного вакуумного насоса 10. Далее смесь поступает в теплообменник 13, представляющий собой одноходовой теплообменник типа «труба в трубе».

Холодным теплоносителем является водопроводная вода, которая входит в теплообменник через входной патрубок 14. Далее продукт реакции поступает в безмасляный мембранный вакуумный насос вакуумсоздающей системы. Регулирование производительности насоса осуществляется установкой непосредственно перед входом в насос многооборотного вентиля фирмы “Самozzi”, а также установкой натекателя на входе в систему, где создается разряжение. После чего поступает в конденсатосборник 5. Конденсатосборник представляет собой вертикальную цилиндрическую емкость. Ввод и вывод контактного газа происходит через патрубки, сваренные на разных уровнях в конденсатосборник. Слив осуществляется через нижний патрубок. В корпус конденсатосборника сварена бобышка для присоединения показывающего вакуумметра, для контроля разряжения на входе в вакуумный насос.

Конденсатосборник после вакуумного насоса имеет некоторые конструктивные отличия от конденсатосборника после теплообменника.

Отбор проб происходит на трех различных участках основной вакуумной линии, где происходит реакция дегидрирования. Осуществляется за счет создания, в пробоотборной вакуумной линии, безмасляным мембранным вакуумным насосом (МВНК 2х4) более низкого разряжения. В пробоотборную линию, помимо насоса, входят рилсановые трубки, различные фитинги фирмы “Самozzi” и конденсатосборник с показывающим вакуумметром для контроля разряжения пробоотборной линии. Фитинги позволяют легко и быстро монтировать и демонтировать пробоотборную линию, выделять отдельные потоки исследуемого газа, перекрывая остальные.

Методика проведения эксперимента

Поскольку селективность и степень конверсии процесса зависят от катализатора, условий проведения процесса: температуры и давления в реакционной зоне, концентрации реагентов, времени пребывания реагентов в зоне реакции и других параметров, то путем комбинации различных значений вышеуказанных параметров осуществляется выбор значений, позволяющих достигнуть максимальной селективности и степени конверсии процесса.

Исходным веществом для дегидрирования в экспериментальной установке предполагается использовать нормальный бутан. Эксперимент проводят при различных сочетаниях давлений в реакционной зоне в диапазонах от 0,1 атм. до 0,5 атм. с шагом 0,05 атм. и температур в реакционной зоне в диапазонах от 450 °С до 650 °С с шагом 50 °С, которые определяются в процессе эксперимента расчетным путем в зависимости от температуры нагрева стенок реактора и нагревательной камеры. Эксперимент проводят следующим образом:

1. Вакуумсоздающую систему (насосы 10 и 22) и нагревательную систему установки подключают к сети переменного тока, включают вакуумные насосы;
2. Открывают вентили 20 на баллоне 1, 2 для подачи исходной смеси в систему;
3. Температура задается изменением сопротивления трансформатора (на схеме не показаны) через который происходит подача напряжения на нихромовую проволоку. Напряжение и сила тока определяется предварительно расчетным путем для достижения необходимой температуры в реакционной зоне. Температура в реак-

ционной камере измеряется при помощи термопар ТХА (класс точности 1(°C): ± 1.5 от -40 °C до 375 °C; $\pm 0.004 \times T$ от 375 °C до 1000 °C) 12, которые выводятся на щит КИП (на схеме не показан);

4. Устанавливают значение давления 0,1 атм. на выходе из реакционной камеры вентилями 18, 21;
5. Достигают стабилизации давления на входе равным 0,1 атм., значение которого на входе контролируют по показаниям прибора измерителя ОВЕН УКТ-38 (класс точности 0,5), на выходе – давление измеряется манометром 6 (METER ДМ02-100-1-М, класс точности 1,5);
6. При достижении необходимого давления и температуры в реакционной зоне проводят отбор проб путем открытия вентилей 23 пробоборной линии и вентиля 15;
7. Пробы подвергают химическому анализу состава компонентов продуктов реакции;
8. Увеличивают давление на 0,05 атм. и переходят к пункту 6. (Последовательно происходит увеличения давления на входе в установку с шагом 0,05 атм. При достижении давления на входе 0,5 атм. переходят к пункту 9);
9. Увеличивают температуру на 50 °C и переходят к пункту 4; (Последовательно происходит увеличение температуры в реакционной зоне с шагом 50 °C. При достижении температуры 650 °C переходят к пункту 10);

По полученным данным химического анализа проб строятся таблицы степени конверсии при различной температуре и давлении.

СПОСОБЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОПЕНТАН-ПЕНТАН-ГЕКСАНОВОЙ ФРАКЦИИ В ПРОЦЕССЕ ИЗОМЕРИЗАЦИИ

Сухарев К.В., Миннихметова А.А.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

E-mail: k.sukharev@gmail.com

В настоящее время в производстве товарных бензинов существует тенденция к улучшению их эксплуатационных характеристик, включая повышение октанового числа по исследовательскому методу (ОЧ и. м.). В связи с тем, что международные и отечественные нормативы на автомобильные бензины ограничивают содержание бензола и ароматических углеводородов, а также в связи с отказом от использования тетраэтилсвинца, возрастает значение процесса изомеризации, как способа производства высокооктановых компонентов бензинов [1].

В нефтеперерабатывающей промышленности для увеличения ОЧ и. м. бензиновой фракции с температурой кипения до 70 °C применяются процессы изомеризации нормальных парафинов с линейным строением в их разветвленные изомеры, имеющие более высокое октановое число.

Поскольку после изомеризации в продукте содержится некоторое количество нормальных парафинов (степень превращения C_5 - и C_6 -парафинов на катализаторе типа ИП-66 составляет около 50%), снижающих ОЧ и. м. продукта, процесс осуществляется с отделением от изомеризата нормальных парафинов и рециклом непрореагировавшего сырья в реактор [2]. Для выделения линейных парафинов из продукта изомеризации могут применяться следующие способы:

- ректификация;
- адсорбционное разделение.

В настоящее время наибольшее распространение на практике получили способы изомеризации, в которых для выделения из реакционной смеси непрореагировавшего сырья используется блок ректификации. Блок ректификации состоит из одной или нескольких ректификационных колонн, с верха которых отбираются разветвленные парафины, а боковой погон содержащий нормальные парафины направляют в реактор изомеризации.

Широко используются следующие технологические схемы с использованием ректификации:

- «однопроходная схема» используется при небольших затратах на реализацию процесса (рисунок, а);
- схема с колонной деизопентанизации (ДИП) перед блоком изомеризации обеспечивает выделение изопентана с высоким ОЧ из сырья и уменьшает нагрузку на реактор. Выделенный изопентан смешивается с изомеризатом (рисунок, б);
- схема с колонной деизогексанизации (ДИГ) позволяет получать изомеризат с высоким ОЧ, но не увеличивает количество изопентанов в продукте. При этом боковой погон, состоящий из метилпентанов (МП) и н-гексана, рециркулируется в реактор изомеризации (рисунок, в);
- схема с рециркуляцией непрореагировавшего нормального пентана с применением колонны ДИП перед реактором и колонны депентанизации (ДП) после блока изомеризации (рисунок, г);
- схемы с рециркуляцией н-пентана и н-гексана. Рецикл парафиновых углеводородов нормального строения осуществляется с помощью нескольких ректификационных колонн (ДИП, ДИГ и ДП) [3].



Рисунок. Схемы процессов изомеризации: а), б), в), г)

Использование адсорбционного разделения также позволяет осуществить рециркуляцию н-пентана и н-гексана и обеспечивает получение автомобильных бензинов с высоким значением ОЧ и.м.

При данном способе поток изомеризата взаимодействует с твердым адсорбентом, селективно поглощающим парафины с линейным строением для их дальнейшей селективной адсорбции, что позволяет выделять изопарафины в качестве высокооктанового продукта. Контакт адсорбента с десорбентом в процессе десорбции обеспечивает удаление нормальных парафинов из адсорбента с целью их рецикла в реактор. Из этих двух потоков, включающих разветвленные изопарафины и нормальные парафины, в процессе сепарации выделяется десорбент, нормальные парафины направляются в блок изомеризации, а изопарафины отделяются в качестве продукта [4].

Возможно также применение для разделения цеолитных мембран, но вследствие небольшой проницаемости существующих на данный момент мембран и объемов подаваемого изомеризата в установках промышленного масштаба мембраны должны иметь достаточно большие площади поверхностей [5].

Большие расходы на ввод в эксплуатацию разделения с помощью цеолитных мембран делают их экономически неэффективными в сравнении с адсорбционным разделением и ректификацией.

Необходимо отметить, что мембранные и адсорбционные методы принадлежат к молекулярно-селективным процессам разделения и не содержат в себе затрат энергии на смену фазового состояния вещества.

В данной работе были рассмотрены способы разделения изопентан-пентангексановой фракции в процессе изомеризации. Используемые в настоящее время схемы процессов изомеризации включают колонны ДИП и ДИГ, что связано с необходимостью получения товарного бензина с высоким ОЧ, соответствующего постоянно ужесточающимся стандартам. В перспективе эффективность процесса изомеризации может быть повышена применением цеолитного или мембранного разделения.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАБОТЫ ВОДОСТРУЙНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Калинкин С.С., Мызгин А.О., Альтапов А.Р., Сагдеев Д.И.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: sagdeev@mail.ru

Гидроструйным насосом называется динамический насос трения, в котором перекачиваемая (пассивная) среда (жидкость, газ или смесь жидкости с газом или твердыми частицами) перемещается внешним потоком (струей) рабочей (активной) жидкости. Энергия от одного потока жидкости к другому передается силами, действующими на поверхности рабочей струи [1, 2].

Значительное распространение в различных отраслях техники получили гидроструйные насосы. Схемы гидроструйных насосов весьма разнообразны. Наиболее известны и распространены конструкции нерегулируемых гидроструйных насосов, а также нашли применение гидроструйные насосы с регулируемыми геометрическими параметрами, причем регулирование производится за счет изменения площади выходного сечения рабочего (активного) сопла или площади поперечного сечения камеры смешения (горловины). Несмотря на разнообразие конструкций в большинстве струйных насосов можно выделить следующие элементы: активное (рабочее) сопло,

камеру смешения (горловину), диффузор, входной участок горловины для пропуска пассивного потока, выполняемый, как правило, в виде конфузора. Рабочее коническое сопло (насадок) в основном устанавливают соосно (по центру) с камерой смешения или комбинированно. В некоторых случаях применяют многосопловые гидроструйные аппараты. Плоскость среза активного сопла (сопл) должна или находиться во входном сечении камеры смешения, или быть выдвинута из него против течения на некоторое расстояние (обычно не более чем на один-три калибра сопла).

Широкое распространение гидроструйных аппаратов в химии и нефтехимии обусловлено следующими их преимуществами: высокой самовсасывающей способностью и возможностью перекачки жидкостей, газов, газожидкостных смесей, гидросмесей, содержащих твердые примеси, агрессивных сред; отсутствием подвижных деталей, простотой устройства; малыми габаритными размерами и массой, возможностью размещения в труднодоступных местах; простотой регулирования подачи и напора.

Гидроструйные насосы имеют и существенные недостатки, к числу которых относятся: отсутствие автономного привода, необходимость использования для привода постороннего источника напорной жидкости; низкий КПД собственно гидроструйного насоса, не превышающий в лучших конструкциях значения 0,35-0,4; безвозвратный сброс большого количества жидкости, используемой в качестве рабочей (активной) среды, и др.

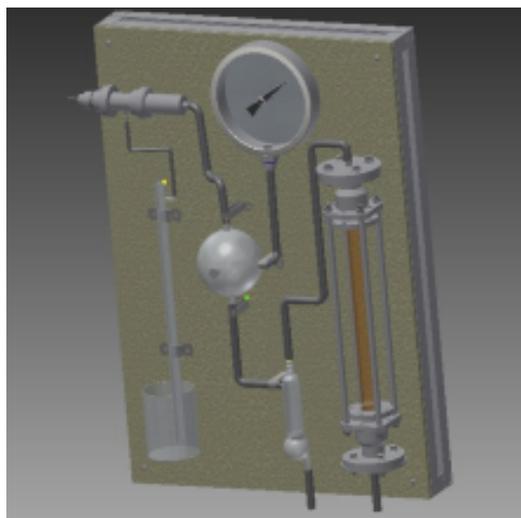
В данной работе разработан лабораторный стенд для исследования работы и снятия основных характеристик водоструйных компрессоров и вакуумных насосов, который представлен на рисунке.

Потоки рабочей и инжектируемой сред поступают во входной коллектор, камеру смешения, где происходит выравнивание скоростей, сопровождающееся, как правило, повышением давления. Из камеры смешения поток поступает в диффузор, где происходит дальнейший рост давления. Давление смешанного потока на выходе из диффузора выше давления инжектируемого потока, поступающего в приемную камеру.

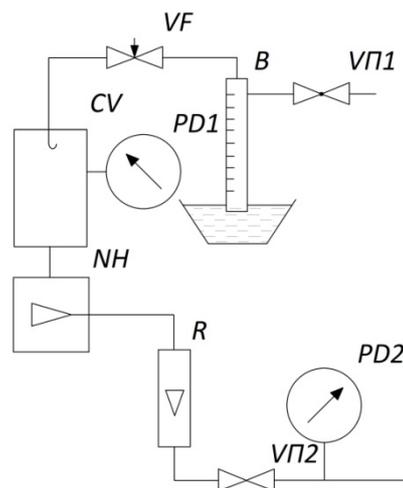
Основная трудность теоретического определения характеристик водоструйного вакуумного насоса, состоит в сложности описания самого процесса турбулентного смешения струй, их взаимодействия в пространстве, ограниченного жесткими стенками.

В работе ставится цель усовершенствования лабораторного стенда, который позволит выявить и уяснить закономерности процессов, протекающих в характеристиках водоструйного вакуумного насоса, а также критически оценить существующие в настоящее время в литературе расчетные методы гидроструйных аппаратов. Основной проблемой гидроструйной откачки является повышение экономичности гидроструйных эжекторов, путем оптимизации процесса смешения, что достигается усложнением конструкции и одновременно с уточнением расчетных методов. В такой ситуации расчеты становятся сложными, а порой и невозможными, а это указывает на то, что следует опираться на качественно выполненные экспериментальные данные.

Спроектированный и изготовленный лабораторный стенд позволит продолжить студенческие научные исследования по исследованию работы водоструйных вакуумных насосов в рамках дисциплины "Насосы и компрессоры". Данные исследования позволят закрепить теоретические знания, полученные при выполнении лабораторной работы "Исследование работы и снятие основных характеристик водоструйных компрессоров и вакуумных насосов".



а)



б)

Рисунок. Лабораторный стенд для изучения водоструйных вакуумных насосов:
а) 3-D вид лабораторного стенда; б) вакуумная схема: *CV* — вакуумная камера;
NH — водоструйный вакуумный насос; *R* — жидкостной ротаметр; *VP1* — кран
регулирующий; *VP2* — кран бюретки; *PD1* — вакуумметр деформационный;
PD2 — манометр деформационный; *VF* — натекатель; *B* — бюретка масляная

Литература

- [1] Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки. Л.: Машиностроение. Ленинград. отделение. 1988. 256с.
- [2] Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. 3-е изд., перераб. М.: Энергоатомиздат. 1989. 352с.

МОДЕРНИЗАЦИЯ РЕОВИСКОЗИМЕТРА ДЛЯ ЖИДКОСТЕЙ

Котомкин Д.О., Набиуллина Р.Р., Хамидуллин Р.Н., Садыков А.Х., Сагдеев Д.И.
Казанский национальный исследовательский технологический университет.
E-mail: sagdeev@mail.ru

Вязкость, наряду с плотностью и другими коэффициентами (диффузии, теплопроводности) явлений переноса является важнейшей структурно-механической характеристикой материала, определяющей его технологические, эксплуатационные и потребительские свойства. Вязкость является практически важной физико-химической характеристикой свойств в различных технологических процессах при нефтедобыче, в нефтехимии, биохимии, пищевой, косметической, лакокрасочной и других отраслях промышленности.

В процессе выполнения научных исследований всегда возникает проблема недостатка или отсутствия современных высокоточных исследовательских приборов и оборудования. Неудовлетворительное состояние отечественного приборостроения и фантастические цены, недоступные даже промышленным предприятиям, на высокоточное зарубежное оборудование, вынуждает ученых самим разрабатывать и

изготавливать необходимые для научной работы приборы и экспериментальные установки для исследования реологических свойств жидкостей.

Перед нами была поставлена задача модернизации реовискозиметра представленного на предыдущих конференциях [1-3], которая позволила выявить основные недостатки и изменить конструктивные элементы с целью повышения точности получаемых результатов.

Общий вид реовискозиметра представлен на рисунке, где показан сборочный чертеж (а) и 3-D модель (б), полученная проектированием в программном продукте Autodesk Inventor Professional 2014.

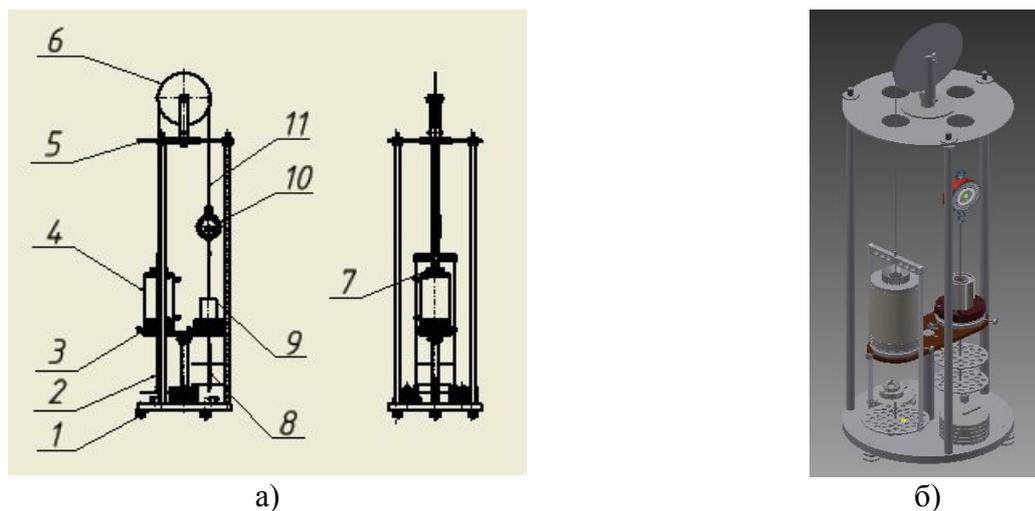


Рисунок. Общий вид реовискозиметра: а) сборочный чертеж; б) 3-D модель (объемный вид) реовискозиметра; 1 – штатив; 2 – система нагружения; 3 – центрующая система; 4 – термостатирующая система; 5 – верхний стол; 6 – блок; 7 – система измерения; 8 – система балансирования; 9 – датчик положения; 10 – весы; 11 – нить

Для подготовки комплектов чертежей реовискозиметра использовался высокоэффективный продукт компании Autodesk Inventor Professional 2014, который также позволил создать демонстрационный видеофильм для потребителей. Модернизация реовискозиметра проводится с целью удобства эксплуатации и его промышленного производства.

Разработанный реовискозиметр – капиллярный грузо-поршневой является синтезом положительных качеств грузо-поршневого и капиллярного вискозиметров. Принцип измерения вязкости с помощью реовискозиметра основан на регистрации двух взаимосвязанных величин – нагрузки на поршень и времени истечения через капилляр образца определенного объема, по которым вычисляются напряжение сдвига на стенке капилляра, градиент скорости (в том числе и неньютоновских сред) то есть, практически, реализуется абсолютный метод измерения вязкости. Не возмущающий способ регистрации перемещения поршня, наряду с гравиметрическим методом создания давления на концах капилляра (принцип прецизионного манометра с неуплотненным поршнем) и жидкостное (проточное) термостатирование образца создают благоприятные условия для прецизионных измерений вязкости методом Пуазейля в широком диапазоне значений напряжения и скорости сдвига (в том числе и неньютоновских сред).

Выводы

1. Использование высокоэффективного продукта компании Autodesk Inventor Professional позволило подготовить комплект чертежей реовискозиметра.
2. Реовискозиметр изготовлен и модернизируется для научно-исследовательских работ по исследованию вязкости жидкостей, включая и консистентные смазки.

Литература

- [1] Хамидуллин Р.Н., Котомкин Д.О., Колганова К.А., Альтапов А.Р., Сагдеев Д.И., Теляков Э.Ш. Модернизация реовискозиметра для исследования вязкости вакуумных рабочих жидкостей. Материалы Седьмой Российской студенческой научно-технической конференции “Вакуумная техника технология”. 20-23 апреля 2015 г. *Казань, КНИТУ. 2015. С.101-102.*
- [2] Мусин А.М., Филиппов Г.А., Идиятуллин З.Ш., Малацион С.Ф., Сагдеев Д.И. Реовискозиметр для исследования вязкости вакуумных рабочих жидкостей. Материалы Шестой Российской студенческой научно-технической конференции “Вакуумная техника технология”. 9-11 апреля 2013 г. *Казань, КГТУ. 2013. С.99-100.*
- [3] Филиппов Г.А., Мусин А.М., Идиятуллин З.Ш., Малацион С.Ф., Сагдеев Д.И. Прецизионный реовискозиметр капиллярный грузо-поршневой. Материалы Третьей Российской студенческой научно-технической конференции “Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология”. 23-25 мая 2012 г. *Казань, КГТУ. 2012. С.208-210.*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАБОТЫ ГАЗОСТРУЙНЫХ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Миндубаев И.И., Котомкин Д.О., Голубева И.Л., Сагдеев Д.И.
*Казанский национальный исследовательский технологический университет.
E-mail: sagdeev@mail.ru*

Струйными называются аппараты, в которых происходит смешение и обмен энергиями двух потоков разных давлений с образованием смешанного потока с промежуточным давлением [1,2]. Среда, находящаяся перед аппаратом при более высоком давлении, называется рабочей. Рабочим называется поток рабочей среды, который выходит из сопла в приемную камеру струйного аппарата с большой скоростью и увлекает среду, имеющую перед аппаратом более низкое давление. Увлеченный поток называется инжектируемым.

В струйных аппаратах происходит преобразование потенциальной или тепловой энергии рабочего потока в кинетическую энергию. Кинетическая энергия рабочего потока частично передается инжектируемому потоку. При протекании по струйному аппарату происходит выравнивание скоростей смешиваемых потоков и обратное преобразование кинетической энергии смешанного потока в потенциальную или тепловую.

Вакуумная схема лабораторного стенда для изучения работы газоструйных вакуумных насосов представлена на рис. 1.

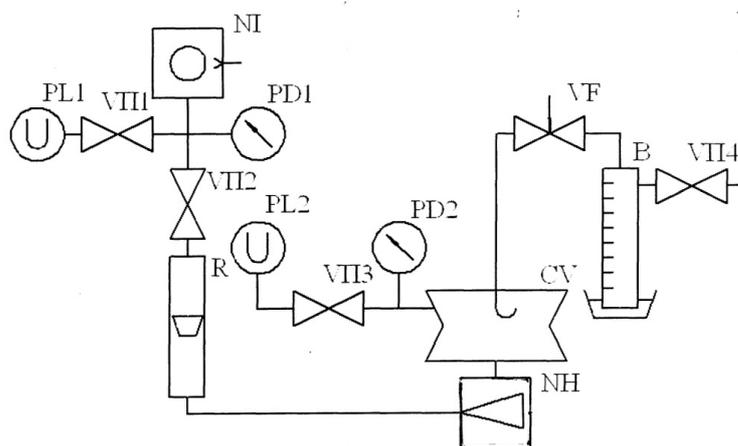


Рис. 1. Вакуумная схема лабораторного стенда NH — газоструйный эжектор; NI — механический насос (пылесос); R — ротаметр; VI1, VI3 — краны U — образных вакуумметров; VI2 — кран регулирующий; PD1, PD2 — вакуумметры деформационные; PL1, PL2 — U-образные вакуумметры; CV — вакуумная камера объемом V; VF — натекатель; B — бюретка масляная; VI4 — кран бюретки

На рис. 2 представлена 3-D модель лабораторного стенда для изучения работы газоструйных вакуумных насосов, полученная проектированием в программном продукте Autodesk Inventor Professional 2014. На рисунке представлен вариант мини-эжектор с набором сопел (коническим соплом и соплами Лаваля: профилированным и коническим) и цилиндрической камерой смешения. Также нами предусмотрен вариант газоструйного вакуумного насоса, изготовленного для наглядности из органического стекла. Данный вакуумный насос может быть подсоединен к коммуникациям данного лабораторного стенда.

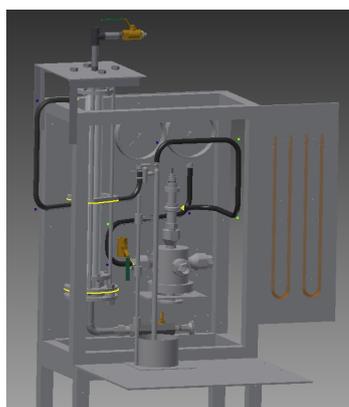


Рис. 2. 3-D модель стенда для изучения работы газоструйных вакуумных насосов

Работа эжектора предусматривает использование в качестве устройства заставляющего воздействовать на рабочее тело (воздух) вакуумного насоса (пылесоса).

Спроектированный и изготовленный лабораторный стенд позволит продолжить студенческие научные исследования по исследованию работы газоструйных вакуумных насосов в рамках дисциплины “Газодинамика сплошных сред”. Данные исследования позволят закрепить теоретические знания, полученные при выполнении расчетного индивидуального задания “Расчет газоструйного эжектора” [1].

В дальнейшей работе ставится цель усовершенствования лабораторного стенда, который позволит выявить и уяснить закономерности процессов, протекающих в простых эжекторах, а также критически оценить существующие в настоящее время в литературе расчетные методы газоструйных аппаратов [2,3]. Основной проблемой газоструйной откачки является повышение экономичности эжекторов, путем оптимизации процесса смешения, что достигается усложнением конструкции и одновременно с уточнением расчетных методов. В такой ситуации расчеты становятся сложными, а порой и невозможными, а это указывает на то, что следует опираться на качественно выполненные экспериментальные данные.

Литература

- [1] Сагдеев Д.И. Газовая динамика сплошных сред: учебно-методическое пособие. Д.И. Сагдеев, Т.В. Максимов; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. *Казань: КНИТУ. 2011.* 156с.
- [2] Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. 3-е изд., перераб. М.: *Энергоатомиздат. 1989.* 352с.
- [3] Матвеевко П.С., Стабников В.Н. Струйные аппараты в пищевой промышленности. М.: *Пищевая промышленность. 1980.* 224с.

ПЛОТНОМЕР ДЛЯ ЖИДКОСТЕЙ

Набиуллина Р.Р., Котомкин Д.О., Садыков А.Х., Сагдеев Д.И.
*Казанский национальный исследовательский технологический университет.
E-mail: sagdeev@mail.ru*

Плотность, наряду с другими коэффициентами (вязкости, диффузии и теплопроводности) явлений переноса является важнейшей структурно-механической характеристикой материала, определяющей его технологические, эксплуатационные и потребительские свойства. Плотность является практически важной теплофизической характеристикой свойств в различных технологических процессах при нефтедобыче, в нефтехимии, биохимии, пищевой, косметической, лакокрасочной и других отраслях промышленности.

Разработке и исследованию новых принципов измерения плотности, созданию конструкций плотномеров, основанных на этих принципах, освоению и расширению промышленного производства плотномеров уделяется все большее внимание. Возрастание роли и значения измерений плотности обусловлено в значительной мере непрерывным увеличением номенклатуры технологических процессов и производств, в которых расход веществ, участвующих в осуществлении процессов, оценивается по массе, причем массовый расход определяется путем отдельных автоматических измерений объемного расхода и плотности с последующим автоматическим перемножением результатов этих измерений [1, 2].

В процессе выполнения научных исследований всегда возникает проблема недостатка или отсутствия современных высокоточных исследовательских приборов и оборудования. Неудовлетворительное состояние отечественного приборостроения и фантастические цены, недоступные даже промышленным предприятиям, на высокоточное зарубежное оборудование, вынуждает ученых самим разрабатывать и

изготавливать необходимые для научной работы приборы и экспериментальные установки для исследования плотности жидкостей.

Перед нами была поставлена задача спроектировать и изготовить плотномер, работающий по методу гидростатического взвешивания для укомплектования реовискозиметра, с целью повышения точности получаемых результатов при малом времени единичного измерения.

Общий вид плотномера для жидкостей представлен на рисунке, где показан сборочный чертеж (а) и 3-D модель (б), которые выполнены проектированием в программном продукте Autodesk Inventor Professional 2015. Нами был подготовлен полный комплект чертежей плотномера, по которым были изготовлены детали и произведена сборка измерительного прибора.

Разработанный плотномер для жидкостей работает по методу гидростатического взвешивания. Данный метод основан на законе Архимеда – на погруженное в жидкость тело действует выталкивающая сила, пропорциональная плотности жидкости, что позволяет в результате взвешивания в жидкости тела с известным объемом найти массу жидкости в объеме тела, а отсюда – плотность как ньютоновской жидкости, так и неньютоновской среды.

При измерении плотности вязких (неньютоновских) жидкостей процесс достижения равновесия поплавка и системы взвешивания может оказаться весьма длительным, поэтому целесообразно пользоваться методом динамического взвешивания, которое позволяет производить серию последовательных измерений при малой скорости перемещения поплавка, обеспечивающей, ламинарное движение.

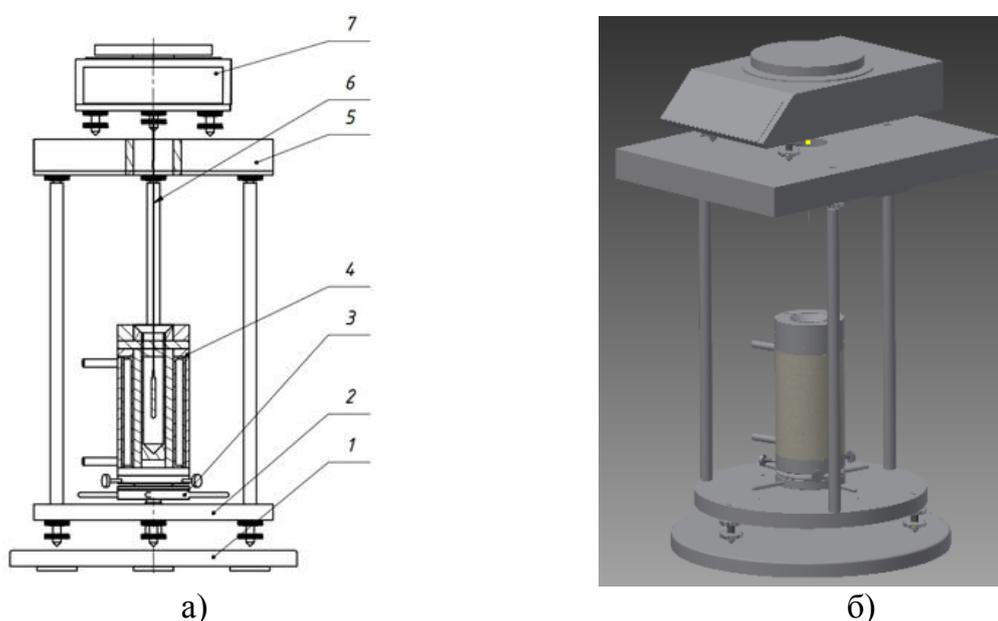


Рисунок. Общий вид плотности для жидкости: а) сборочный чертеж; б) 3-D модель (объемный вид) плотномера; 1 – поддон; 2 – штатив; 3 – центрующая система; 4 – термостатирующая система; 5 – стол верхний; 6 – система измерения; 7 – электронные весы марки «METTLER PM600»

Авторы работы [3] в ходе эксперимента фиксировали зависимость между скоростью перемещения поплавка вверх и вниз (при установившемся движении и постоянной температуре жидкости) и нагрузкой на весы. Скорость перемещения оценивали числом делений шкалы весов в единицу времени. Экстраполяция полученной графической зависимости, соответствующей данной температуре,

позволила найти массу поплавка в состоянии статического равновесия системы при нулевой скорости перемещения, а далее вычислить измеряемую плотность.

Выводы

1. Использование высокоэффективного продукта компании Autodesk Inventor Professional позволило подготовить комплект чертежей плотномера для жидкостей.
2. Плотномер для жидкостей изготовлен и модернизируется для научно-исследовательских работ по измерению реовискозиметром коэффициента динамической вязкости как ньютоновских, так и неньютоновских жидкостей.

Литература

- [1] Кивилис С.С. Плотномеры. М.: Энергия. 1980. 280с.
- [2] Измерение массы, объема и плотности. Гаузнер С.И., Кивилис С.С., Осокина А.П., Павловский А.Н. М.: Издательство стандартов. 1972. 624с.
- [3] Степанов Л.П. Учет вязкости при измерении плотности жидкости гидростатическим методом. *Измерительная техника*. 1970. №11. С.50-52.

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ПОТОКА

Пак В.А., Котомкин Д.О., Шайхразыев И.А., Садыков А.Х., Сагдеев Д.И.
Казанский национальный исследовательский технологический университет.
E-mail: sagdeev@mail.ru

Специалистам, работающим в области вакуумного откачного оборудования, часто приходится иметь дело с расчетом или исследованием газовых потоков в различных частях вакуумных установок. Это требует знать законы движения газов в условиях сплошной среды и разреженного газа, а также правильно применять их на практике. Значительную роль при изучении вопросов газовой динамике играют экспериментальные исследования.

Перед нами была поставлена задача спроектировать и изготовить лабораторный стенд для измерения параметров газового потока в прямолинейном и криволинейном каналах, а также изучение параметров потока газа при обтекании цилиндра и потерь в плоском диффузоре с углом раскрытия 10° .

Анализ литературы и существующих в настоящее время лабораторных стендов [1-3] позволил спроектировать компактный лабораторный стенд, с использованием высокоэффективного продукта компании Autodesk Inventor Professional 2013, который представлен на рисунке. Основными элементами лабораторного стенда являются: система создания газового потока на базе высокооборотного вентилятора, набора ячеек прямолинейного и криволинейного каналов, плоского диффузора, для исследования параметров потока газа при обтекании цилиндра, а также, система измерения параметров газового потока на базе блока U-образных манометров.

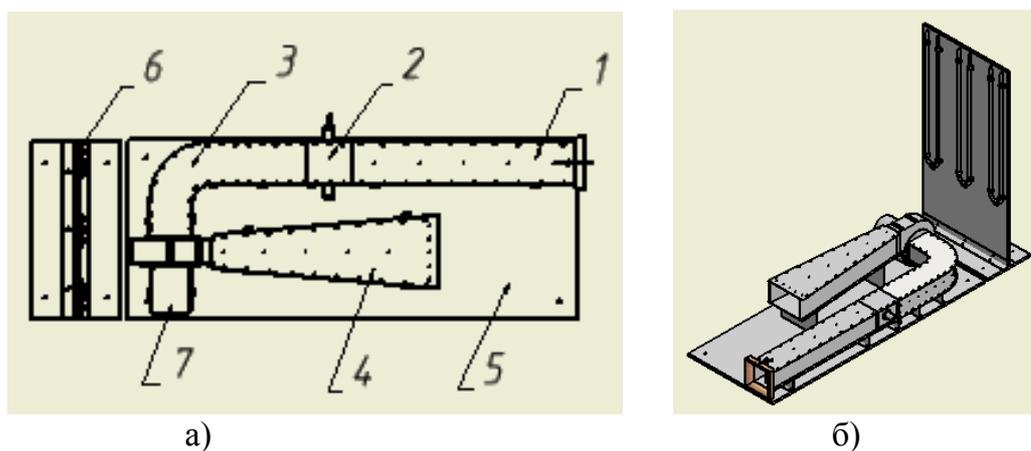


Рисунок. Лабораторный стенд для измерения параметров газового потока:
 а) сборочный чертеж; б) 3-D модель (объемный вид) стенда; 1 – прямолинейный канал; 2 – обтекаемый цилиндр; 3 – криволинейный канал; 4 – диффузор; 5 – основание; 6 – блок U-образных манометров; 7 – высокооборотный вентилятор

Измерение полного и статического давления в потоке основано на учете закономерностей обтекания тел различной формы. Например, при обтекании измерительных трубок дозвуковым потоком распределение давления на их поверхности имеет свои особенности, которые позволяют вычислить динамическое давление и далее скорость газового потока по сечению.

В диффузоре потери значительно выше, чем в каналах постоянного сечения или конфузорах. При движении газа в диффузорах профили скоростей непрерывно деформируются. Положительный градиент давления в диффузоре способствует росту пограничного слоя и при определенных условиях приводит к отрыву потока и образованию вихрей. При отрыве потока резко возрастают потери в диффузоре.

Поэтому при его проектировании очень важно заранее определить точку отрыва потока. Потери в диффузоре можно изучить на представленных диффузорах с углами раскрытия 10° .

На поток в криволинейном канале действует центробежная сила, направленная в противоположную от центра кривизны линий тока сторону. Вследствие этого давление у вогнутой стенки канала возрастает, а у выпуклой – падает. Скорость потока у вогнутой стенки, напротив, становится меньше, а у выпуклой – больше. Последнее является следствием уменьшения продольного градиента давления у вогнутой стенки в первой половине поворота и увеличением его у выпуклой стенки канала. Данные особенности можно экспериментально исследовать на криволинейном канале.

Выводы

1. Спроектирован и изготовлен компактный лабораторный стенд для измерения параметров газового потока в прямолинейном и криволинейном каналах, а также изучение параметров потока газа и потерь в плоском диффузоре с углом раскрытия 10° ;
2. Проведены лабораторные испытания лабораторного стенда, которые позволили получать экспериментальные данные, которые хорошо согласуются с теоретическими предпосылками лекционного материала учебной дисциплины «Газодинамика сплошных сред»;

3. Проведенные расчеты позволяют студентам выявить и уяснить основные закономерности процессов, протекающих в каналах и диффузорах и на качественном уровне оценить взаимосвязь между давлением и скоростью в газовом потоке в соответствии с базовыми уравнениями Гюгонио, Бернулли и уравнением состояния.

Литература

- [1] Сагдеев, Д.И. Газовая динамика сплошных сред: учебно-методическое пособие. Д.И. Сагдеев; Т.В. Максимов. Казан. гос. технол. ун-т. *Казань: КГТУ. 2011.* 147с.
- [2] Палладий А.В. Газовая динамика: Метод. Указания. А.В. Палладий, С.Л. Фосс, И.А. Райзман. Казан. гос. технол. ун-т. *Казань: КГТУ. 2003.* 62с.
- [3] Газодинамика. Компрессорные и расширительные машины: Метод. указания к лаб. работам. Казан. гос. технол. ун-т; Сост.: А.А. Никитин, С.В. Визгалов. *Казань. 2003.* 44с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКАЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗМАСЛЯНОГО АГРЕГАТА НА БАЗЕ ДВУХРОТОРНОГО И СПИРАЛЬНОГО ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ

Тюрин А.В., Пузанков С.М., Бурмистров А.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: tyrin92@mail.ru

В химической промышленности большое количество процессов происходит в условиях низкого и среднего вакуума. Для получения низкого вакуума чаще всего используются водокольцевые вакуумные насосы, которые иногда для снижения предельного остаточного давления комплектуются воздухо-воздушными эжекторами. Еще один достаточно распространенный вариант откачной системы предполагает использование мембранных вакуумных насосов.

Первый способ, наряду с достоинствами, имеет существенные недостатки: невозможно снизить давление ниже 1000 Па и исключить попадание паров воды в откачиваемый объем. Кроме того, оба способа имеют существенные ограничения по скорости действия откачных систем.

Ведущие зарубежные фирмы часто используют для откачки объектов химии и нефтехимии откачные системы на базе бустерных двухроторных вакуумных насосов типа Рутс (ДВН). Это позволяет существенно повысить производительность откачной системы, а отсутствие рабочей жидкости в камере насоса позволяет вести откачку агрессивных, взрывоопасных и дорогих газов, парогазовых конденсирующихся смесей и сред, содержащих твердые включения.

С точки зрения минимизации обратных перетеканий и повышения степени сжатия предпочтительным для ДВН является молекулярный режим течения газа в зазорах. В этом случае проводимость каналов минимальна, а максимальное отношение давлений выхода и входа ДВН может достигать 50-60. Поэтому ДВН практически всегда работают в агрегатах с форвакуумными насосами (ФВН) [1].

В России все агрегаты на базе ДВН комплектуются вакуумными насосами с масляным уплотнением, например, золотниковыми или пластинчато-роторными [2]. Однако из-за необходимости защиты масла от токсичных и химически активных про-

дуктов откачки, абразивных частиц, а также необходимости постоянного обслуживания защитных ловушек, фильтров, продувочных устройств применение таких агрегатов сильно ограничено. Поэтому значительный интерес представляет замена насосов с масляным уплотнением на безмасляные машины. В частности, перспективно выглядят агрегаты, состоящие из двухроторных и безмасляных спиральных насосов.

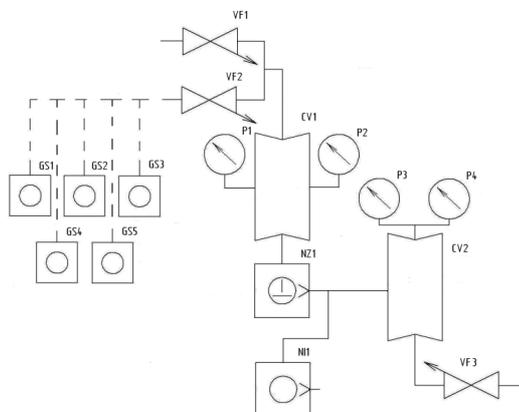


Рис. 1. Вакуумная схема стенда испытаний агрегата НВД-200 + НВСП-12 (НВД-200 + 2НВР-5ДМ): CV1, CV2 – измерительные камеры; P1, P4 – вакуумметры; VF1-VF3 – натекатели; GS1, GS3 – счетчики газные; GS4, GS5 – регуляторы расхода газа; NZ1 – насос вакуумный двухроторный НВД-200, NI1 – насос вакуумный спиральный НВСП-12 (насос вакуумный пластинчатороторный 2НВР-5ДМ)

гласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218 [4].

Для исследования характеристик агрегата был создан стенд, позволяющий проводить измерения всех основных параметров агрегата во всем рабочем диапазоне рабочих давлений, в том числе в соответствии с ГОСТ Р 54807-2011 (ISO 21360:2007) [5]. Вакуумная схема стенда представлена на рис. 1.

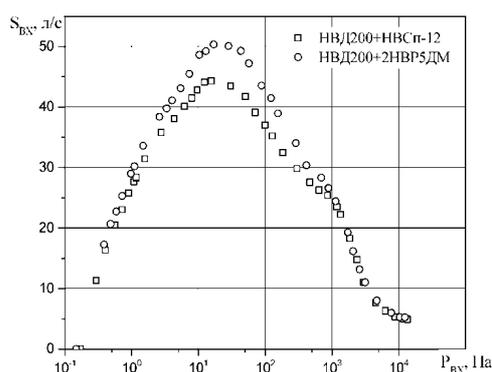


Рис. 2. Зависимость быстроты действия от давления на входе в агрегат

масла.

Максимальная быстрота действия агрегата, состоящего из двух вакуумных насосов НВД-200 + НВСП-12, составила 45 л/с (рис. 2), для НВД-200 + 2НВР-5ДМ быстрота действия равна 50,4 л/с. Меньшая быстрота действия агрегата со спиральным

В данной работе исследовались характеристики агрегата, состоящего из двухроторного вакуумного насоса НВД – 200, производства ОАО «Вакууммаш» [3], и безмасляного вакуумного насоса НВСП-12, разработанного в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства безмасляных спиральных вакуумных насосов для индустрии наносистем и наноматериалов», реализуемого ОАО «Вакууммаш» совместно с КНИТУ при финансовой поддержке комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства со-

В результате измерений установлено, что предельное остаточное давление агрегата, состоящего из двух вакуумных насосов НВД-200 + НВСП-12 равно $P_{ост} = 1,3810^{-1}$ Па, а для НВД-200 + 2НВР-5ДМ – $P_{ост} = 1,36 \cdot 10^{-1}$ Па.

Таким образом, по остаточному давлению агрегат, включающий спиральный вакуумный насос НВСП-12 не уступает агрегату с насосом с масляным уплотнением, не давая при этом обратного потока паров

форвакуумным насосом имеет место за счет того, что быстрота действия НВСП составляет 3,7 л/с (13,3 м³/ч), а быстрота действия 2НВР-5ДМ – 5 л/с (18 м³/ч).

Литература

- [1] Бурмистров А.В. Бесконтактные вакуумные насосы: учебное пособие. А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев; Федер. агентство по образованию. Казан. гос. технол. ун-т. *Казань: КГТУ. 2010.* 104с.
- [2] 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.
- [3] Электронный магазин ОАО Вакууммаш // ОАО Вакууммаш. URL: http://vacma.ru/products/roots_pump/nvd/382/.
- [4] 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.
- [5] ГОСТ Р 54807-2011 (ISO 21360:2007) Вакуумная технология. Стандартные методы измерения характеристик вакуумных насосов. Общие положения.

РАЗРАБОТКА АППАРАТА ВИХРЕВОГО ТИПА С ТРЕМЯ СТУПЕНЯМИ КОНТАКТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Ахметшин А.А., Алексеев В.В., Поникаров И.И.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: ainaz994@mail.ru

Для абсорбции средне- и хорошо растворимых газов при повышенных температурах были предложены многоступенчатые аппараты вихревого типа, разработанные на кафедре машин и аппаратов химических производств КНИТУ, состоящие из трех ступеней контакта [1, 2].

Принцип работы таких аппаратов заключается в следующем. Поток газовой смеси с допустимой начальной концентрацией абсорбируемых компонентов входит в двухзаходное тангенциальное закручивающее устройство 1, расположенное на первой ступени 2, приобретает вращательно-поступательное движение, проходит область жидкостной завесы первой ступени, созданной винтовым дефлекторным оросителем 4, где частично освобождается от абсорбируемых газообразных компонентов и после сепарации поступает на вторую ступень контакта 8.

При наличии в потоке твердой фазы за счет центробежных сил происходит их осаждение на пленку жидкости и совместное прямоточно-винтовое пленочное движение на внутренней поверхности цилиндрического сепаратора 7 контактной ступени. Удаление жидкой фазы производится через стакан гидрозатвора 3.

На второй ступени закрученный поток проходит аксиально-лопаточное подкручивающее устройство 6, приобретает первоначальную структуру потока и взаимодействует с другим объемным факелом орошения, сформированным оросительным устройством 9 и также после сепарации жидкости газовая смесь поступает на следующую ступень.

Тарельчатый конический сепаратор 5 применяется для повышения количества сепарируемой жидкости при высокой скорости газовой смеси. Концентрация абсорбируемых компонентов от ступени к ступени уменьшается.

Окончательная сепарация жидкости от газа происходит на последней ступени подкручивающим устройством 6 и цилиндрическим сепаратором 10, и очищенная газовая смесь выходит из абсорбера через двухзаходное тангенциальное раскручивающее устройство 11.

Исследования аэрогидродинамических и тепло-массообменных закономерностей в трехступенчатом аппарате вихревого типа проводятся на специально разработанной экспериментальной установке (см. рисунок). Замеряются перепад статического давления во входном патрубке аппарата по дифманометру 4 на системе “воздух - вода”, температуры газа и жидкости, расходы газовой и жидкой фаз. В замкнутом газовом контуре газоздушная среда на выходе из аппарата 3 поступает в трубное пространство теплообменника 2, из которого далее - на всасывающую линию вентилятора высокого давления 1. Для создания изотермических условий массообмена в межтрубное пространство теплообменника поступает охлаждающая жидкость – захлажденная вода. Для исследования неизотермической абсорбции газовая фаза нагревается за счет подачи в межтрубное пространство горячей воды или за счет применения жидкого поглотителя, нагреваемого до требуемой температуры в баке 11 электронагревателем 16. Для создания одинаковой температуры в баке используется рециркуляционное движение жидкости, создаваемое центробежным насосом 10 по байпасной линии с вентилем 13.

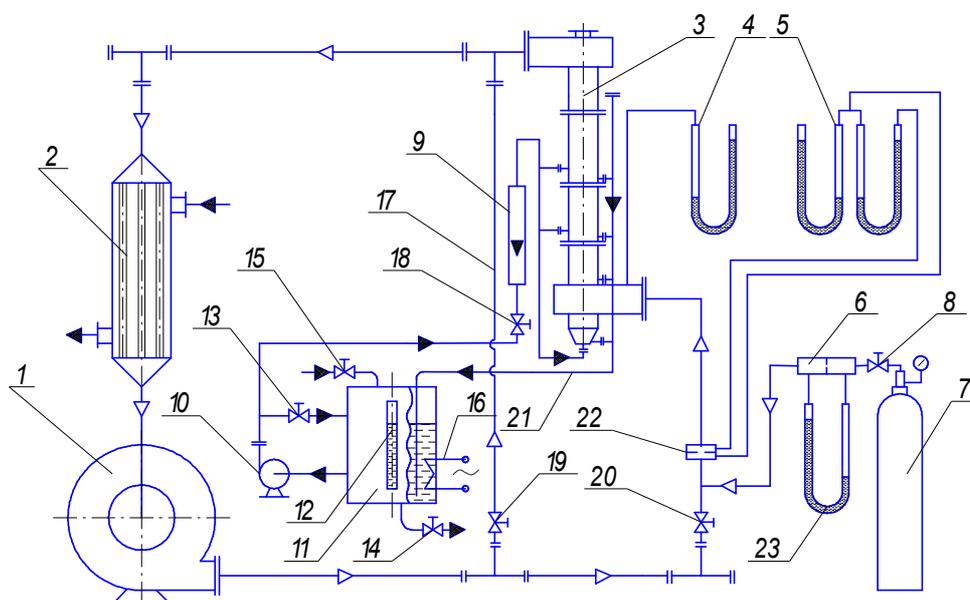


Рисунок. Схема экспериментальной установки

Расход воздушной смеси регулируется задвижкой 20 и рассчитывается по перепаду давления на нормальной остроугольной диафрагме 22 с двумя водяными U-образными дифманометрами 5. Газ (аммиак), добавляется в воздушную смесь из баллона 7, а его расход регулируется вентилем 8 и стеклянным ареометром 6 с U-образным дифманометром 23. Регулирование минимального расхода газа в аппарате осуществляется при полностью или частично открытой байпасной линии 17.

Подача жидкой фазы (водопроводной воды) в АВТ 3 осуществляется центробежным насосом 10 на каждую ступень аппарата из напорного бака 11. Расход жид-

кой фазы, регулируется вентилем 18 и измеряется по жидкостному ротаметру 9. Бак наполняется из водопроводной линии открытием вентиля 15, уровень воды в баке устанавливается по стеклянному уровнемеру 12. Слив жидкости из бака осуществляется через вентиль 14.

Выводы

Разработаны методики исследования процессов неизотермической абсорбции аммиака из аммиачно-воздушной смеси водой и десорбции кислорода из воды в воздух, которые позволят определить тепло-массообменные характеристики многоступенчатых аппаратов вихревого типа и разработать инженерные методики технологических расчетов.

Литература

- [1] Алексеев В.В., Поникаров И.И., Абсорберы многоступенчатые вихревого типа. Техническое описание (ТО). *Казань, КНИТУ. 2015. 15с.*
- [2] Алексеев В.В., Поникаров И.И., Абсорберы многоступенчатые вихревого типа. Инструкция по эксплуатации (ИЭ). *Казань, КНИТУ. 2015. 22с.*

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ЖИДКОСТИ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ ПРОТОЧНОГО ТИПА ПРИ ВВОДЕ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

Васильев М.П., Абиев Р.Ш.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). E-mail: mxmvslv@gmail.com, rufat.abiev@gmail.com

Современный мир невозможно представить без удобрений, бытовой химии, нефтехимии, лекарственных препаратов и других, жизненно важных для человечества продуктов.

Особое место в химической и смежных отраслях промышленности занимают процессы эмульгирования. Эмульгирование широко распространено в химической и нефтеперерабатывающей промышленности, например, при рафинировании продуктов, при удалении ароматических соединений из бензина жидкостной экстракцией. Кроме того, эмульсии широко используются в производстве пищевых продуктов, косметических изделий, фармацевтических препаратов. Еще одна сфера применения эмульсий в промышленности – в качестве средства переноса активных соединений, таких как вкусоароматические вещества, витамины, антиоксиданты, нутрицевтики, фитохимические соединения, лекарственные средства, химикалии и др. Введение этих компонентов требует использования соответствующего средства для переноса эффективного количества активного компонента в требуемое место его действия.

Более или менее исследованными и внедренными в промышленную практику являются следующие способы физических воздействий на гетерогенные среды: мощные сдвиговые течения (струйные смесители, мешалки, роторные аппараты), центробежные поля, ультразвуковые и электромагнитные волны (в том числе СВЧ), пульсации давления и скорости. Одним из перспективных типов оборудования являются

пульсационные аппараты нового поколения, среди которых особое место занимает пульсационный аппарат проточного типа (ПАПТ) [1] – аппарат, в котором пульсации возникают вдоль линий тока благодаря особой форме продольного сечения аппарата (рис. 1).

Интерес к использованию устройств с периодически изменяющимся сечением в химической промышленности заметно возрос в последние годы. В ряде недавних исследований были изучены аппараты частично подобные ПАПТ, но с дополнительными колебаниями потока, которые описаны в [2-4], а также турбулентный трубчатый аппарат (ТТА) [5]. К недостаткам аппаратов, которые используют турбулизацию потока как средство повышения эффективности работы аппарата, можно отнести дополнительные затраты энергии, что впоследствии приводит к снижению КПД, поскольку основная часть энергии трансформируется в энергию турбулентных вихрей, которые диссипируются в объеме сплошной фазы и на стенках аппарата.

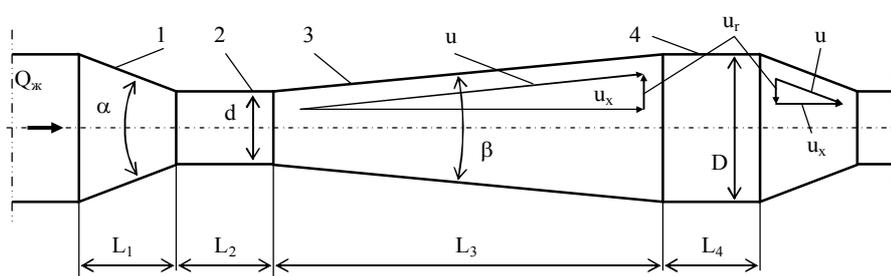


Рис. 1. Схема пульсационного аппарата проточного типа (ПАПТ): 1 – конфузор, 2 – горловина, 3 – диффузор, 4 – широкая часть; u – скорость течения, u_r – радиальные скорости течения, u_x – осевая скорость течения

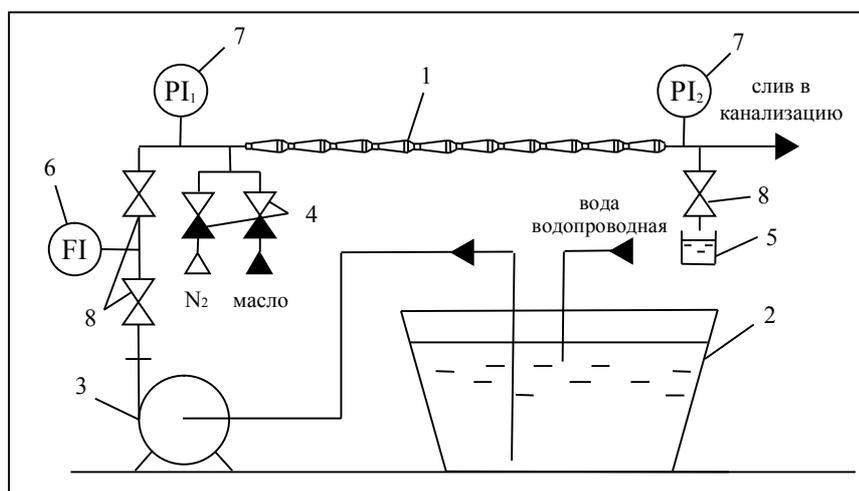


Рис. 2. Схема лабораторной установки по получению эмульсии масла в воде: 1 – ПАПТ, 2 – емкость, 3 – насос, 4 – обратный клапан, 5 – емкость для отбора проб, 6 – расходомер, 7 – манометр, 8 – вентиль

Предварительные исследования [6, 7] показали, что при величине энергозатрат 400 Вт/кг, в пульсационном аппарате проточного типа может быть получена эмульсия с максимальным размером капель 35 мкм, минимальные затраты энергии на получение таких же капель для традиционных диспергирующих устройств составляют 1800 Вт/кг, что в 1,8 раза больше. В [1] предусмотрен ввод в аппарат третьей фазы – газа-инерта для интенсификации как эмульгирования, так и массоотдачи в системе жидкость-жидкость.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния газовой фазы на степень эмульгирования жидкости в ПАПТ, а также поиск оптимального соотношения расходов газа и сплошной жидкой фазы.

Эксперименты по диспергированию масла в воде проводились на установке (рис. 2), состоящей из емкости 2, из которой вода центробежным насосом 3 подавалась в горизонтальный ПАПТ 1, состоявший из десяти элементов типа «труба Вентури», (линейные размеры конструктивных элементов (см. рис. 1): $d=9$ мм, $D=20$ мм, $L_1=15$ мм, $L_2=L_4=10$ мм, $L_3=50$ мм, $\alpha=36^\circ$, $\beta=11,5^\circ$).

Подача масла и газа-инерта (азота) осуществлялась в начало трубки через обратные клапаны 4. После прохождения смеси через ПАПТ, производился отбор пробы в емкость 5, предварительно заполненную ПАВ - 5 мл. Расход смеси измерялся электромагнитным расходомером 6 типа ВЗЛЕТ ЭР ЭРСВ-540М с относительной погрешностью измерений $\pm 2,0\%$, давление до и после аппарата измерялось манометрами 7 типа Элемер АИР-20/М2-ДИ с относительной погрешностью измерений $\pm 0,6\%$.

Объемный расход масла составлял 1% от расхода воды, при этом диапазон расходного газосодержания азота составлял от 0,25% до 4%.

Как показали результаты наших экспериментов, ввод газовой фазы в реакционное пространство ПАПТ в целом оказывает положительное воздействие на качество диспергирования. При расходном газосодержании, равном 0,25%÷2,0%, максимальный размер получаемых капель на 1-25,8% меньше по сравнению с каплями, получаемыми при таких же условиях без ввода газа (рис. 3). Средний же диаметр капель при вводе газа практически в 2,5 раза меньше и составляет 13,6 мкм против 33,8 мкм.

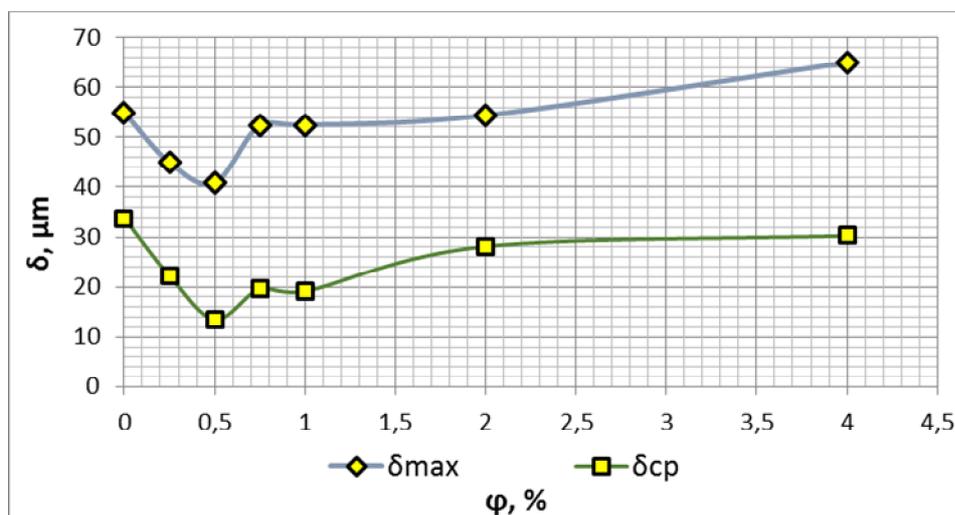


Рис. 3. График зависимости максимального и среднего размеров капель масла от расходного газосодержания

Как видно из графика на рис. 1, оптимальное расходное газосодержание, при котором достигаются капли наименьшего размера, составляет 0,5%. При этом потери давления по длине аппарата для газосодержания от 0% до 2% остаются неизменными, а рост сопротивления наблюдается при газосодержании больше 2%.

Литература

- [1] Способ интенсификации реакционных и массообменных процессов в гетерогенных процессах и аппарат для его осуществления: пат 2264847 Рос Федерация. № 2004103160/15; заявл. 03.02.2004; опубл. 10.07.2005. Б.И. 33, **2005**.
- [2] A.P. Harvey, M.R. Mackley, T. Seliger, Process intensification of biodiesel production using a continuous oscillatory flow reactor. *Jour. of Chem. Technol. and Biotechnol.* **2003**. №78. P.338-341.
- [3] K.B. Smith, M.R. Mackley, An experimental investigation into the scale-up of oscillatory flow mixing in baffled tubes, *Chem. Eng. Res. and Des.* **2006**. №11. P.1001-1011.
- [4] H.K. Gaidhani, B. McNeil, X. Ni, Fermentation of pullulan using an oscillatory baffled fermenter. *Chemical Engineering Research and Design.* **2005**. №6. P.640-645.
- [5] Данилов Ю.М., Мухаметзянова А.Г., Дебердеев Р.Я., Берлин, А.А. Оценка эффективности перемешивания жидких компонентов в малогабаритных трубчатых турбулентных аппаратах. *Теоретические основы химической технологии.* **2011**. Т.45. №1. С.81-84.
- [6] Васильев М.П., Абиев Р.Ш. Диспергирование капель масла в пульсационном аппарате проточного типа. *Известия СПбГТИ (ТУ).* **2014**. №23(49). С.66-68.
- [7] Abiev R.Sh., Vasilev M.P. Energy dissipation rate by pulsating flow type apparatus and droplet dispersion. Proc. of 15th European Conference on Mixing. June 28 - July 3, 2015, St. Petersburg, Russia. Publ. SPbSTI (TU), **2015**. P.28-33.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛОННЫ С НИЗКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕКТИФИКАЦИИ

Земцов Д.А., Войнов Н.А.

Сибирский государственный технологический университет, г. Красноярск.

E-mail: voynov@siberianet.ru

Для работы ректификационных колонн под вакуумом востребованы колонны, обладающие низким сопротивлением и высокой эффективностью разделения. В настоящее время в основном используются пленочные колонны, которые, однако обладают недостаточно высокой укрепляющей способностью. В этой связи проведены исследование колонны со ступенями, выполненными из пластин в условиях термической ректификации, что позволяет при низком сопротивлении колонны достигать сравнительно высокое укрепление паровой смеси. Так при осуществлении частичной конденсации пара по высоте пленочных колоннах позволило [1-2] увеличить их эффективность на 10-15%. По данным [3-5] использование термических эффектов на порядок увеличило эффективность разделения в сравнении с адиабатической ректификацией. Согласно [6] нагревание стекающей пленки через стенку пленкообразующей поверхности также приводит к увеличению эффективности разделения.

Вследствие не достаточной изученности влияния эффектов термической ректификации на процесс разделения смеси в представленной работе продолжены исследования в этом направлении.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Колонна выполнена из царг диаметром 200 мм, снабжена 25 контактными ступенями высотой по 70 мм. Контактная ступень состоит, рис. 1в, из трех перфорированных пластин, изготовленных из медного листа толщиной 0,5 мм края которой отбортованы на высоту 1 мм. Расстояние между пластинами выдерживалось равным 32 мм, а общая высота одной

царги составила 70 мм. По оси колонны устанавливалась медная труба (дефлегматор) диаметром 28 мм в полость которой подавалась охлаждающая вода при начальной температуре 10-70 °С. Тепловой поток паровой смеси, выходящей из куба составил 3-15 кВт. Согласно схеме потоков, рис. 1б поднимающиеся пары смеси по колонне частично конденсируются на наружной поверхности дефлегматора 14 с образованием флегмы, которая стекает по распределителям 15 на верхние пластины 11, где подогревается до температуры кипения с протеканием процессов испарения и конденсации. Количество флегмы на ступенях регулировалось расходом охлаждающей воды подаваемой в полость трубы 14. Исследовалась смесь этиловый спирт-вода с начальной концентрацией этанола в кубе 1-60% мас. Состав смеси определялся при помощи рефрактометра марки LR-3. Расход воды, подаваемой в установку, измерялся ротаметрами типа РС-5. Показания температуры в жидкой и паровой фазах определялись термометрами сопротивления марки ТСМв, при помощи вторичных приборов термодат 11М2.

Эффективность ступени при физической абсорбции кислорода из воздуха водой определялась согласно:

$$E_x = \frac{c_k - c_n}{c^* - c_n}, \quad (1)$$

где c_n – начальная концентрация кислорода в жидкости, кг/м³; c_k – конечная концентрация кислорода в жидкости, кг/м³; c^* – равновесная концентрация кислорода, кг/м³.

Эффективность ступени при ректификации определялась по формуле

$$E_{0y} = \frac{y_n - y_{n-1}}{y^*(x_n) - y_{n-1}} \quad (2)$$

где y_{n-1} – состав пара, поступающего на контактную ступень, % масс.; y_n – состав пара, покидающего контактную ступень, % масс.; $y^*(x_n)$ – состав пара, равновесный с составом соответствующей фазы, покидающей ступень, % масс.

Расходы пара и жидкости в колонне определялись из материального и теплового балансов. Величина коэффициента теплоотдачи при определении флегмового числа определялась по зависимостям, представленным в монографии [7].

Как установлено избыточное давление в кубе колонны во всем исследованном интервале тепловой нагрузки не превысило 40 Па, что свидетельствует о низком гидравлическом сопротивлении контактных ступеней. Суммарное количество жидкости в аппарате составило 2,5 кг.

В зависимости от способа организации подачи охлаждающей воды в дефлегматор величина коэффициента теплопередачи составила от 500 до 10000 Вт/(м²×К), а тепловой поток конденсирующихся паров на ступени - $G_{\text{кон}} = 100 - 900$ Вт.

Эффективность ступени при проведении термической ректификации в исследуемой колонне составила 0,3-0,6 (рис. 2), а при адиабатической ректификации не превысила 0,2.

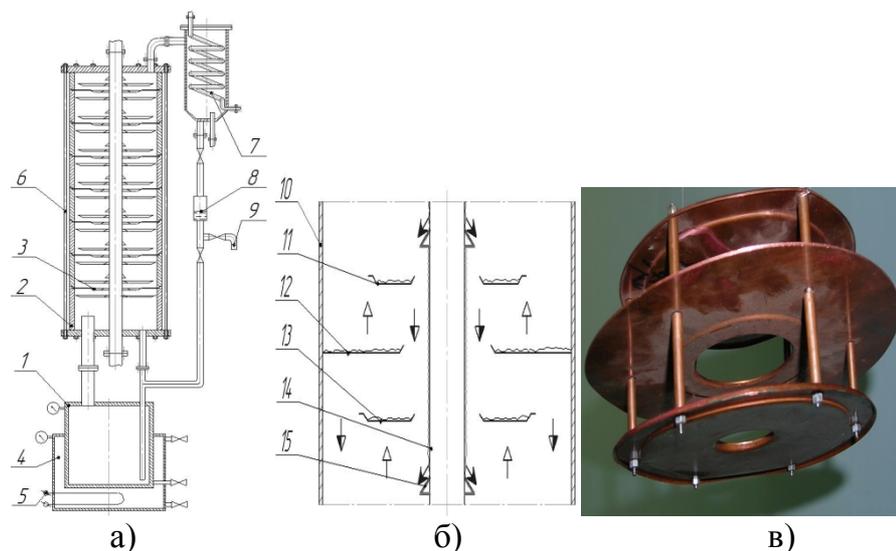


Рис. 1. Схемы колонны термической ректификации (а), потоков на ступени (б), общий вид тарелки (в): 1 – куб; 2 – колонна; 3 – тарелка; 4 – рубашка; 5 – электронагреватель; 6 – шпилька; 7 – конденсатор; 8 – смотровое окно; 9 – пробоотборник; 10 – царга; 11 – верхняя пластина; 12 – средняя пластина; 13 – нижняя пластина; 14 – дефлегматор; 15 – распределитель конденсата; \blacktriangleright – вода; \blacktriangleleft – пар; \blacktriangleright – рабочая смесь; \blacktriangleright – конденсат

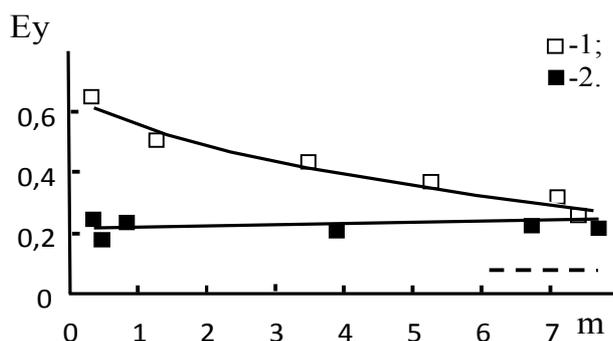


Рис. 2. Зависимость эффективности контактной ступени от тангенса угла наклона равновесной кривой. Экспериментальные точки (1-2): 1 – Термическая ректификация; 2 – Адиабатическая ректификация. Пунктирная линия – эффективность при физической абсорбции

Как установлено на эффективность разделения в колонне оказывает влияние как интенсивность протекания массообмена, так и процессы кипения и конденсации. На нижних ступенях колонны наибольшее влияние на процесс ректификации оказывает эффекты, вызванные конденсацией, а на верхних испарение флегмы.

Для интенсификации процесса разделения нами исследован процесс массообмена в жидкости, стекающей по поверхности, вращающейся горизонтально установленной пластины. Результаты исследования массообмена, на примере абсорбции кислорода из воздуха представлены на рис. 3, а при ректификации на рис. 4.

При этом достигнуто увеличение эффективности процесса абсорбции в сравнении с неподвижной пластиной в 6 раз. Эффективность возрастает с повышением угловой скорости вращения и снижении плотности орошения. Аналогичное увеличение эффективности достигнуто при проведении процесса ректификации на ступени с вращающейся пластиной.

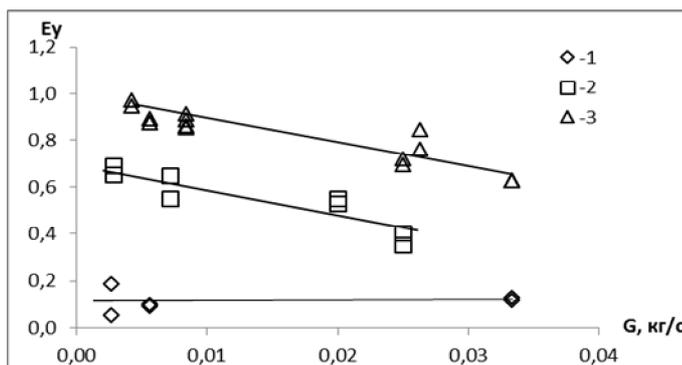


Рис. 3. Зависимость эффективности от расхода подаваемой воды при абсорбции. Экспериментальные точки (1-3): 1 – число оборотов пластины $N = 0$; 2 – $N = 250-400$ об/мин; 3 – $N = 1000-1300$ об/мин.

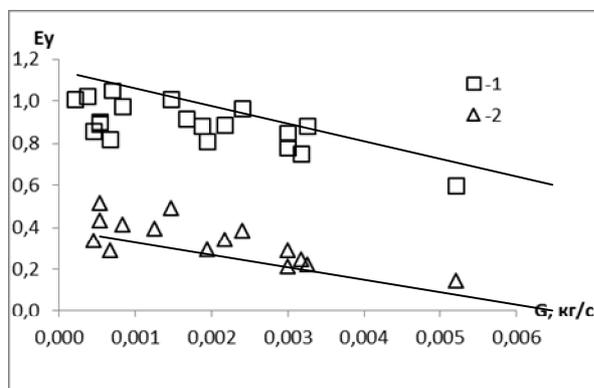


Рис. 4. Зависимость эффективности вращающейся ступени от расхода жидкости при ректификации. Концентрация этанола в смеси $X = 1-30$ % масс. Экспериментальные точки (1-2): 1- $N = 0$; 2- $N = 900$ об/мин.

Можно заключить, что перемешивание жидкости при ее стекании по поверхности вращающейся пластины позволяет в равной мере интенсифицировать процесс массообмена как при абсорбции, так и при ректификации, причем процессы, вызванные испарением, конденсацией и перемешиванием протекают в данном случае параллельно в не зависимости друг от друга.

Приведенные исследования будут востребованы при конструировании колонн на основе термической ректификации.

Литература

- [1] Олевский В. М., Ручинский В.Р., Кашников А.М., Чернышев В.И. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии). М.: Химия. 1988. 240с.
- [2] Руководство по лабораторной перегонке: Пер. с нем./Под ред. Олевского В.М. М.: Химия. 1980. 520 с.
- [3] Пат. №:2102104 РФ. Способ разделения многокомпонентных смесей близкипящих и гомогенно-растворимых жидкостей. Сайфутдинов А.Ф., Пархоменко Е.Д. Бюл. 1998. №36. 12с.
- [4] Пат. 2437698 РФ. Способ ректификации. Войнов Н.А., Паньков В.А. Войнов А.Н. Бюл. 2011. №36. 7с.

- [5] Пат. 2445996 РФ. Ректификационная колонна. Войнов Н.А., Паньков В.А., Войнов А.Н. Бюл. **2012**. №9. 6с.
- [6] Войнов А.Н., Жукова О.П., Паньков В.А., Войнов Н.А. Ректификация этилового спирта в колоннах со спирально-призматической насадкой. *Техника и технология пищевых производств*. **2012**. Т.4. №27. С.95-99.
- [7] Войнов Н.А., Николаев А.Н. Теплосъем при пленочном течении жидкости. *Боргес*. **2005**. 123с.

РАЗРАБОТКА СТОПОРЯЩИХСЯ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ (ВАРИАНТЫ ИСПОЛНЕНИЯ)

Ногуманова Р.М., Шакиров Р.И., Лашков В.А.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: nogumanovar@bk.ru

Для соединения деталей в машинах и установках широко применяются резьбовые крепежные детали. По литературным источникам [1] в современных машинах детали, имеющие резьбу, составляют свыше 60% от общего количества деталей. По этой причине безопасность работы машин и установок во многом зависит от надежности резьбовых соединений.

При работе оборудования в условиях переменных, ударных нагрузках и нагрузках вибрационного характера наблюдается самоотвинчивание гаек, что может привести к разгерметизации реакционного объема, увеличению зазоров, аварии.

Условие самоотвинчивания гайки определяется моментом [2]

$$T_{\text{отв}} = 0,5Fd_2 = \left[\left(D_{\text{сп}} / d_2 \right) f + \text{tg}(\varphi - \psi) \right],$$

чтобы не происходило самоотвинчивания гайки должно выполняться условие $T_{\text{отв}} > 0$.

Из формулы следует, что чем выше коэффициент трения, тем выше запас самоотвинчивания. При переменных нагрузках, и особенно при вибрациях, вследствие взаимных микросмещений поверхностей трения коэффициент трения существенно снижается. Условие самоотвинчивания нарушается, происходит самоотвинчивание.

Для предотвращения самоотвинчивания при работе машин и оборудования в условиях вибрационных и ударных нагрузок, усложненных тепловым воздействием, разработаны конструкции стопорящихся резьбовых соединений. Наиболее известным из них является болт с гайкой и шайбой Гровера [3]. При этом пружинная шайба обеспечивает лишь локальное (точечное) стопорение гайки и детали.

В самоконтрящейся гайке [4] с отверстиями и вставленными в них пластмассовыми штифтами стержень болта нарезает резьбу в пластмассовых штифтах, материал которых заполняет зазоры между витками гайки и болта (шпильки), обеспечивая тем самым постоянную силу трения. Подобные конструкции имеют ограниченное применение, поскольку содержат пластмассовые штифты, которые теряют свои свойства при воздействии на них тепла, света, химических элементов и т.п.

Наложение вибрационных воздействий на подобное резьбовое соединение приводит к возникновению момента сил раскручивания более массивной гайки, превышающего момент сил трения в месте уплотнения витков резьбы

Авторами при решении технической задачи (два варианта) использовался эффект, обусловленный шаржированием поверхностей гайки и детали деформируемой шайбой в процессе затягивания гайки.

По первому варианту (рис. 1) резьбовое соединение включает: болт 1, гайку 2, деталь 3, деформируемую шайбу 4, внутренняя 5 и внешняя 6 направляющие. Гайка с торца имеет кольцевую канавку 7, в которой размещены направляющие 5, 6 и деформируемая шайба 4. Наружные поверхности направляющих снабжены упором 8, а их нижний срез 9 выступает за торец гайки 2. Деформируемая шайба может быть изготовлена из стекла, керамики, кварцевого песка и т.п.

Гайку навинчивают на резьбовой конец болта до упора нижнего среза направляющих в поверхность детали, обеспечивая тем самым создание изолированного объема. Преодолевая сопротивление упоров, направляющие задвигается в канавку, сокращая изолированный объем. После того, как деформируемая шайба войдет в контакт с поверхностью детали, под действием сжимающей осевой силы произойдет разрушение шайбы на абразивные частицы. За счет уменьшения объема частицы разрушенной шайбы сжимаются, а при вращении гайки совершают круговое перемещение, оставляя на поверхности дна кольцевой канавки и детали микроскопические борозды. Поверхности насыщаются абразивными частицами (шаржируются), что обеспечивает значительный храповой эффект. Сжатие абразивных частиц разрушенной шайбы 4 будет происходить до тех пор, пока торец гайки не сомкнется с поверхностью детали. Гайку можно использовать многократно.

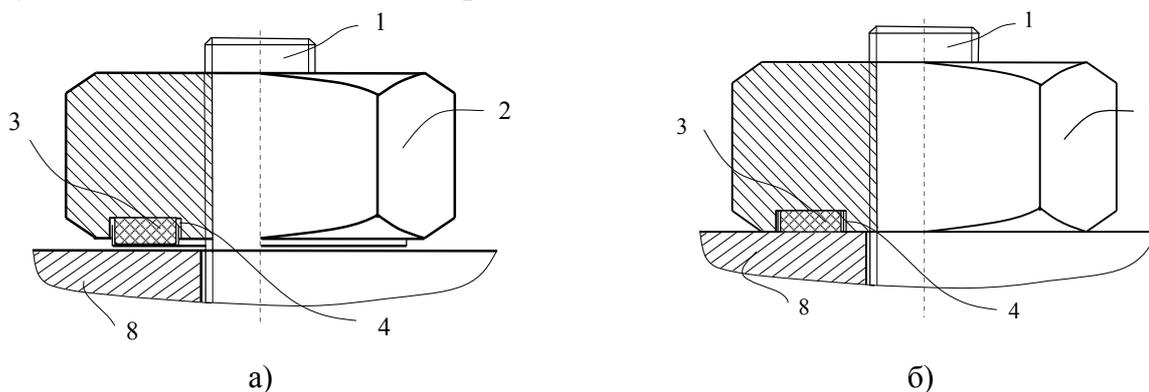


Рис. 1. Стопорящееся резьбовое соединение (вариант 1):
а – гайка до завинчивания; б – гайка после затягивания

По второму варианту надежность резьбового соединения повышается счет шаржирования поверхностей гайки и детали высокотвердыми дисперсными частицами, содержащимися в композите.

Резьбовое соединение (рис. 2) включает болт 1, гайку 2, деталь 3, шайбу. Шайба выполнена в виде композита, включающего полимерное связующее 4 и наполнитель из высокотвердых дисперсных частиц 5.

Наполнитель представляют собой фракцию дисперсных частиц в диапазоне эквивалентных диаметров $d_{\text{экв}}$ равном 0,08-0,10 мм, полученную, например, при заточке (шлифовке) режущегося инструмента с твердосплавной напайкой абразивным шлифовальным инструментом (эльбором).

Нижняя граница диапазона $d_{\text{экв}}=0,08$ мм обусловлена снижением храпового эффекта вследствие соразмерности частиц с высотой микронеровностей поверхностей гайки и детали. Верхняя граница диапазона $d_{\text{экв}}=0,10$ мм связана с уменьшением удельной межфазной поверхности контакта крепежных элементов и действующих

сил трения.

Связующее представляет собой кремнийорганические полимеры (например, кремнийорганические эмали) с устойчивостью к длительному воздействию температуры до 600 °С. Содержание дисперсных частиц в композите составляет 50-60%.

Нижняя граница диапазона 50% обусловлена уменьшением числа активных центров и удельной межфазной поверхности контакта гайки и детали.

Верхняя граница диапазона 60% обусловлена перераспределением частиц по поверхности (образование кластеров) при закручивании гайки, что приводит к неравномерному распределению силовых факторов по площади контакта.

Гайку с нанесенным тонким слоем композита (толщиной равной эквивалентному диаметру высокопрочной дисперсной частицы) на торцовую поверхность навинчивают на резьбовой конец болта до контакта с поверхностью детали. При вращении гайки высокотвердые частицы совершают сложное перемещение, оставляя на поверхностях гайки и детали микроскопические борозды. Поверхности насыщаются абразивными частицами (шаржируются), что обеспечивает равномерное распределение сосредоточенных сил трения по всей поверхности контакта. Полимерное связующее при этом выполняет роль матрицы и герметизирующего слоя.

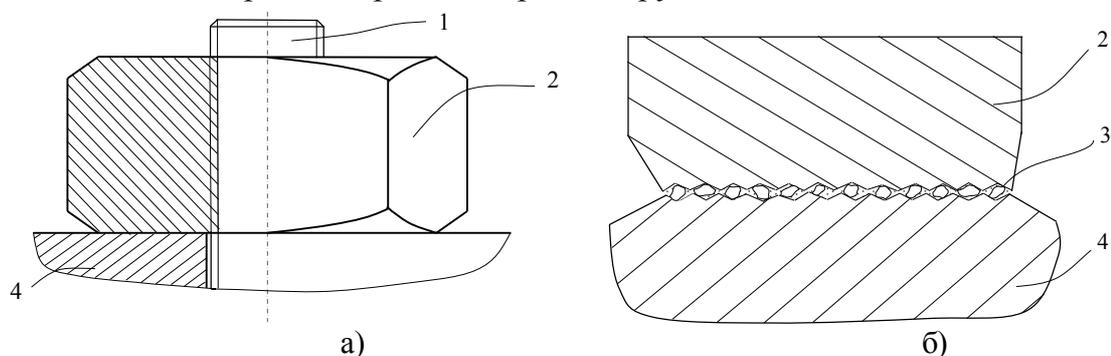


Рис. 2. Стопорящееся резьбовое соединение (вариант 2):

а – гайка после затягивания; б – взаимодействие контактирующих поверхностей

Отсутствие шайбы в резьбовом соединении уменьшает общую массу изделия. Гайку можно использовать многократно.

На варианты стопорящихся резьбовых соединений поданы заявки на изобретения.

Литература

- [1] Эрдеди А.А., Эрдеди Н.А. Техническая механика. А.А. Эрдеди, Н.А. Эрдеди. М.: Высш. шк. 1991. 272с.
- [2] Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин. М.Н. Иванов, В.А. Финогенов. М.: Высш. шк. 2002. 408с.
- [3] Орлов П.И. Основы конструирования: Справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 2. М: Машиностроение. 1988. 544с.
- [4] Патент №2347119 РФ. Стопорящееся резьбовое соединение. Сенчугов А.К. - №2007122749; заявл. 18.06.07; опубл. 20.02.09. Бюл. №5. 3с.: ил.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИН НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Усманов М.Р., Волкова О.И.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

E-mail: tna_ugntu@mail.ru

Пластинчатые теплообменники находят широкое применение в нефтяной, нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности. Для оценки теплотехнических характеристик пластинчатого теплообменника в данной работе было проведено численное исследование с использованием программного комплекса FlowVision, который предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также для визуализации этих течений методами компьютерной графики.

С помощью указанного программного комплекса решалась задача теплообмена между двумя жидкостями через пластину.

В расчетной модели было рассмотрено только то пространство, которое участвует в процессе теплопередачи. Расчетная модель теплообмена включала в себя три подобласти: два межпластинных канала и пластину.

Так как в настоящее время широко применяются пластины сетчато-поточного типа, то нами были рассмотрены следующие пластины: с гофрами «в ёлку» под углом 120° , с двойными гофрами «в ёлку» под углом 120° , с гофрами «в ёлку» под углом 60° и с горизонтальными гофрами. Также для сравнения были рассмотрены пластины ленточно-поточного типа с горизонтальными гофрами и пластина плоской формы.

При сборке каналов вершины «ёлки» гофр четной в пакете пластины направлены вверх, а смежной нечетной пластины – вниз, что достигается поворотом на 180° нечетных пластин. Благодаря этому наклонные гофры взаимно пересекаются, образуя равномерно распределенную по поверхности пластин сетку опор с шагом точек контакта по вертикали 20,8 мм и по горизонтали 36 мм. Такая конструкция взаимных точек опор в каналах дает пакету значительную жесткость, что обеспечивает отсутствие остаточных деформаций гофрированной поверхности, даже при одностороннем давлении.

Щелевидные межпластинные каналы, образованные из пластин с гофрами «в ёлку», имеют изменяющийся и периодически повторяющийся профиль по ходу движения рабочей среды. Однако при этом площадь поперечного сечения межпластинного канала, за исключением участков входа и выхода, остается неизменной по всей длине пластины в любом поперечном сечении. Таким образом, максимально широкая часть межпластинного канала составляет 10 мм.

Первоначально в программном комплексе SolidWorks была создана геометрия расчетной области, которая представляет собой твердотельные модели пластины и двух межпластинных каналов.

В качестве теплообменивающихся потоков использованы жидкости из базы данных FlowVision: керосин и вода. Охлаждаемый агент – керосин, охлаждающий – вода. Материал пластины также был выбран из базы данных программы FlowVision – сталь, характеризующаяся значением теплопроводности $46 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

На поверхности с граничными условиями «вход воды» были заданы нормальная скорость потока $0,1 \text{ м/с}$ и температура жидкости 40°C , а на поверхности с граничными

ми условиями «вход керосина» скорость потока была задана равной 0,17 м/с и температура жидкости 100 °С.

Входы и выходы жидкостей расположены противоположно в каждом из межпластинных каналов. При этом движение обеих рабочих сред осуществляется в противотоке. Выход жидкостей был задан свободный с нулевым давлением на границе.

В итоге полученная расчетная сетка модели состояла из 600000 расчетных ячеек.

Таблица. Условные обозначения пластин

Обозначение	Форма гофр	Высота гофр, мм	Шаг гофр, мм
E120-5×20,8	«в ёлку» под углом 120°	5	20,8
E120×2-5×20,8	«в ёлку» с двойными гофрами под углом 120°	5	20,8
E60-5×20,8	«в ёлку» под углом 60°	5	20,8
Г-СПТ	горизонтальные гофры сетчато-поточного типа	5	20,8
П	плоская пластина	-	-
Г-ЛПТ	горизонтальные гофры ленточно-поточного типа	5	20,8
E120-4,3×20,8	«в ёлку» под углом 120°	4,3	20,8
E120-3,5×20,8	«в ёлку» под углом 120°	3,5	20,8
E120-2,8×20,8	«в ёлку» под углом 120°	2,8	20,8
E120-2×20,8	«в ёлку» под углом 120°	2	20,8
E120-5×13,8	«в ёлку» под углом 120°	5	13,8
E120-5×8,8	«в ёлку» под углом 120°	5	8,8

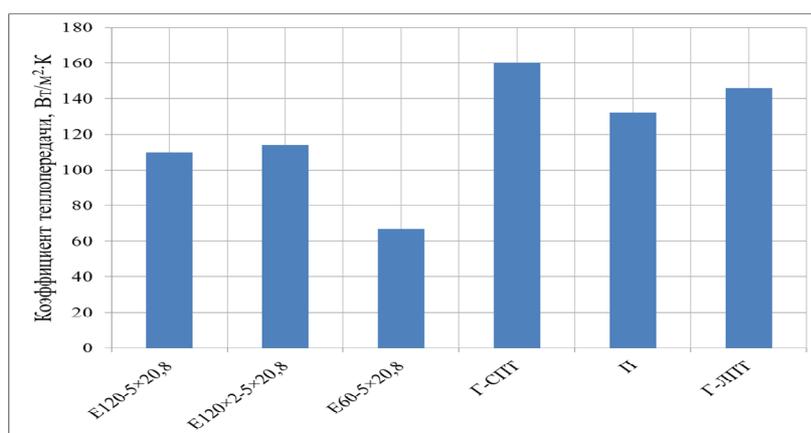


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопередачи от вида пластин

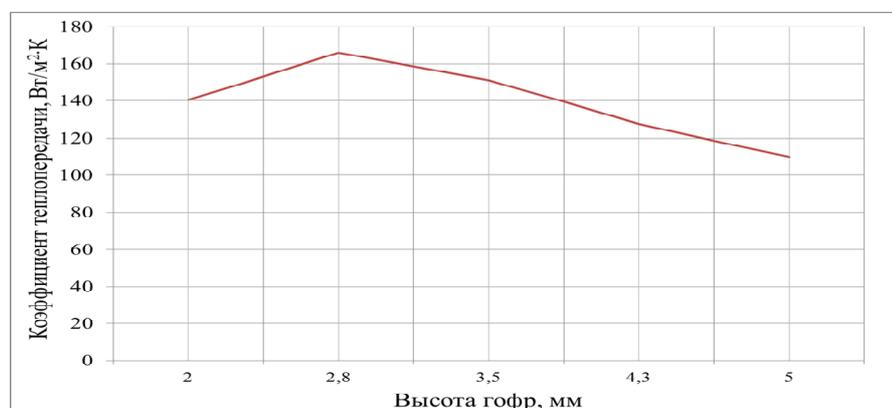


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопередачи от высоты гофр

Результатом численного эксперимента являются полученные значения температур и давления в любой точке расчетной области. Так же по результатам численного эксперимента был определен коэффициент теплопередачи через пластину от керосина к воде.

При расчетах было рассмотрено 12 типов пластин, условные обозначения которых представлены в таблице.

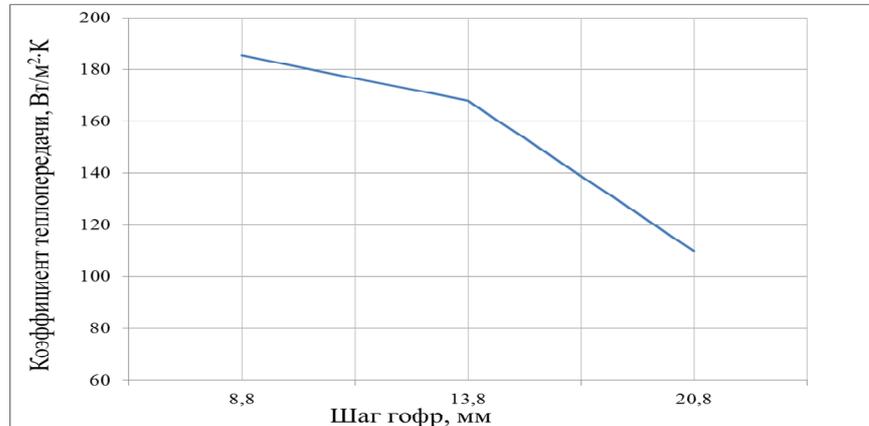
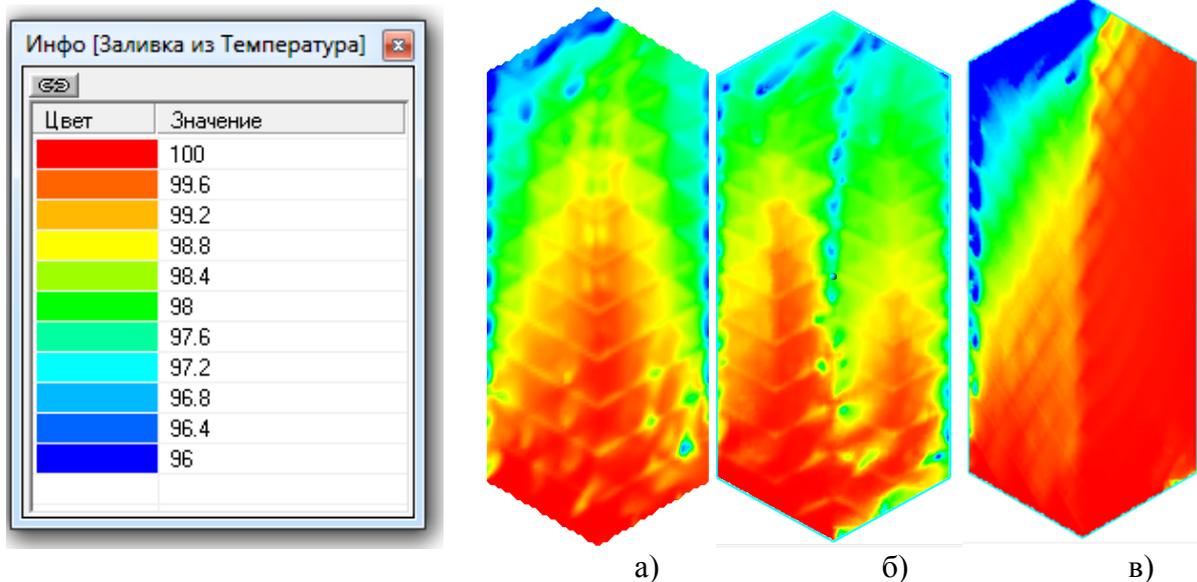
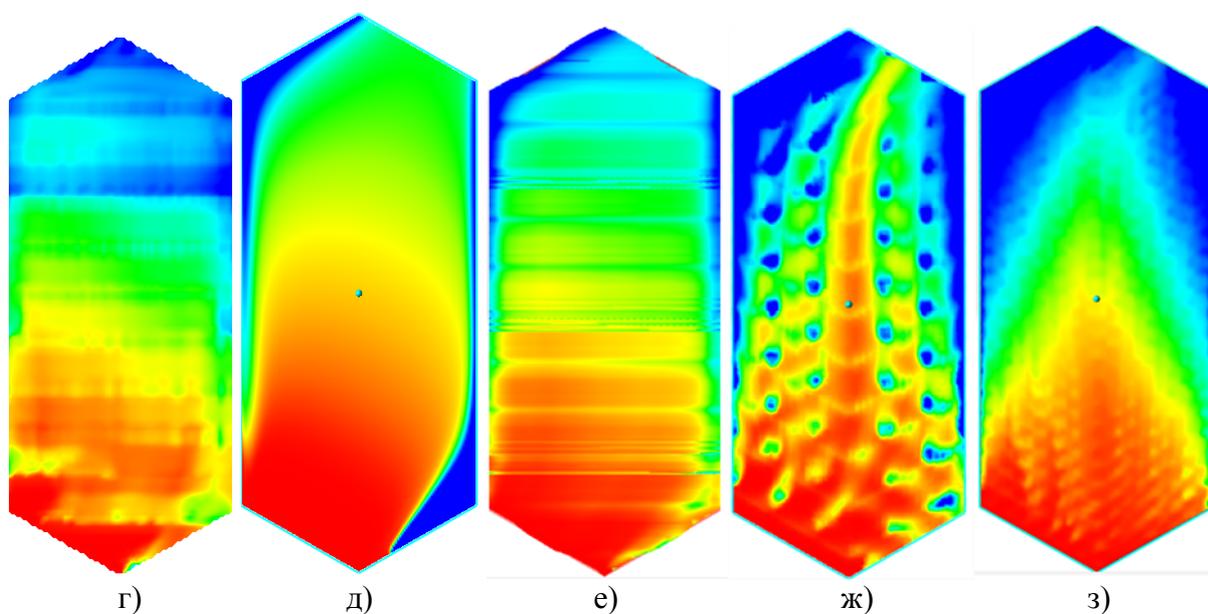


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопередачи от шага гофр пластины





а – E120-5×20,8; б– E120×2-5×20,8; в – E60-5×20,8; г – Г-СПТ;
д – П; е – Г-ЛПТ; ж – E120-2,8×20,8; з – E120-5×8,8

Рис. 4. Сравнительная оценка распределения температуры керосина для пластин различной конфигурации

В результате численного эксперимента получены распределения температур и давления жидкостей во всех точках расчетного пространства, что позволило оценить эффективность теплообмена через пластины.

На основании этих расчетов была построена диаграмма зависимости коэффициента теплопередачи от вида пластин (рис. 1).

Для исследования влияния высоты гофр на коэффициент теплопередачи было проведено численное моделирование процесса теплопередачи через пластины с различной высотой гофр.

На основании всех расчетов был построен график зависимости коэффициента теплопередачи от высоты гофр (рис. 2).

Как видно из рис. 2, при увеличении высоты гофр величина коэффициента теплопередачи сначала увеличивается, а затем уменьшается. Максимум значения коэффициента теплопередачи наблюдается при высоте гофр 2,8 мм (шаг гофр 20,8 мм).

Для рассматриваемых выше пластин были определены коэффициенты теплопередачи. Результаты расчета были сведены в график на рис. 3.

Как видно из графика на рис. 3, коэффициент теплопередачи уменьшается при увеличении шага гофр. При этом оптимальной будет модель с шагом гофр 8,8 мм.

Для более наглядного сравнения всех рассмотренных моделей представлен рис. 4, на котором представлены распределения температуры по керосину для пластин различной конфигурации. Из моделей с измененными шагом и высотой гофр были выбраны те, которые характеризуются наивысшим коэффициентом теплопередачи.

Как видно из рисунка, модель E120-5×8,8 характеризуется наилучшим распределением температуры (охлаждение керосина происходит равномерно), отсутствием застойных зон и всплесков по температуре. Модель E60-5×20,8 является наихудшей из всех: керосин, протекая по длинным наклонным гофрам не успевает охладиться.