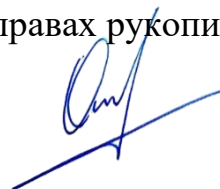


На правах рукописи



Осипов Эдуард Владиславович

**СОПРЯЖЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ ХИМИКО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОВОДИМЫХ ПОД
ВАКУУМОМ**

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Казань – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
Поникаров Сергей Иванович

**Официальные
оппоненты:** **Голованчиков Александр Борисович,**
доктор технических наук, профессор, федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Волгоградский
государственный технический университет»,
профессор кафедры «Процессы и аппараты химических
и пищевых производств»;

Сидягин Андрей Ананьевич,
доктор технических наук, доцент, Дзержинский
политехнический институт (филиал) федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Нижегородский
государственный технический университет им.
Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Технологическое
оборудование и транспортные системы»;

Фарахов Тимур Мансурович,
доктор технических наук, общество с ограниченной
ответственностью «Инженерно-внедренческий центр
«Инжехим», главный инженер проекта.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический
университет», г. Уфа.

Защита диссертации состоится 21 июня 2024 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.312.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=490200>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Дмитриева Оксана Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие химической технологии невозможно представить без производства веществ со сложной структурой, выделение и очистка которых происходит под низким остаточным давлением для снижения температуры кипения и уменьшения интенсивности процессов термической деструкции. Кроме того, к таким веществам зачастую предъявляются строгие требования по качеству, что накладывает серьезные ограничения на аппаратно-технологическое оформление процессов.

На большинстве типовых процессов, проводимых под вакуумом, область требуемого остаточного давления относится к низкому («техническому») вакууму. Так как плотность паровой (газовой) фазы уменьшается при снижении давления, то объемный расход пара по сечению аппарата возрастает, поэтому оборудование для проведения таких процессов отличается большим объемом и размерами. Это обстоятельство требует от проектировщиков взвешенного подхода и учета особенностей функционирования вакуумируемых блоков и вакуумсоздающих систем, которые функционируют совместно и оказывают взаимное влияние друг на друга. Поэтому задача совершенствования аппаратно-технологического оформления вакуумных блоков и вакуумсоздающих систем является актуальной, а её решение позволит повысить энергоэффективность предприятий Российской Федерации.

Данная работа проводилась при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, грант № 075-00315-20-01 «Энергоресурсосберегающие процессы разделения жидких смесей для выделения промышленных растворителей».

Степень разработанности темы. На основе промышленного обследования различных химико-технологических процессов, проводимых под вакуумом, проанализированы и обобщены различные варианты аппаратно-технологического оформления как вакуумных блоков, так и вакуумсоздающих систем, предложены различные варианты по их совершенствованию. Разработана методология сопряженного моделирования и комплексной оптимизации проектных решений при разработке новых, а также реконструкции существующих вакуумных блоков.

Цель работы: совершенствование технологического и аппаратного оформления процессов переработки углеводородного и химического сырья, проводимых под вакуумом.

Задачи исследования:

1. Проведение комплексного анализа аппаратного оформления и технологических параметров действующих вакуумных блоков предприятий химического, нефтехимического и нефтеперерабатывающего профилей.
2. Определение параметров технологического процесса, влияющих на его протекание и определяющих основные затраты на его проведение.
3. Разработка единых критериев для определения эффективности функционирования химико-технологических процессов по переработке углеводородного и химического сырья, проводимых под вакуумом.
4. Разработка математических моделей основных элементов химико-технологических систем, работающих под вакуумом.
5. Разработка методики сопряженного расчета связанных между собой технологических объектов и вакуумсоздающих систем с целью определения ресурсов оптимизации.
6. Сопряженное моделирование типовых аппаратов, работающих под вакуумом, и вакуумсоздающих систем.
7. Технико-экономическое сопоставление наиболее часто применяемых при переработке углеводородного и химического сырья в качестве вакуумсоздающих систем по эксплуатационным затратам.
8. Разработка рекомендаций по совершенствованию аппаратного и технологического оформления вакуумных блоков и вакуумсоздающих систем для процессов переработки углеводородного и химического сырья.

Объектами исследования являются вакуумсоздающие системы и химико-технологические процессы по переработке химического и нефтяного сырья, проводимые под вакуумом.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методология сопряженного моделирования вакуумируемого оборудования и вакуумсоздающих систем.
2. Критерии сравнения эффективности вакуумсоздающих систем различных типов.
3. Математические модели элементов сложных химико-технологических систем, работающих под вакуумом: жидкостно-кольцевого вакуумного насоса; вакуумного конденсатора; парового эжектора; вакуумного насоса типа Рутс.
4. Результаты экспериментального исследования жидкостно-кольцевого вакуумного насоса по влиянию температуры сервисной жидкости на производительность и выходную температуру.
5. Результаты обследования действующих технологических установок, функционирующих под вакуумом.

Методология и методы диссертационного исследования. При выполнении экспериментального исследования применялась методология системного анализа и методы математического моделирования. Проведено экспериментальное исследование на лабораторной установке и обследование действующих производств. Для расчетов и построения графических зависимостей по поиску точек сопряжения использовались прикладные программные комплексы Unisim Design R451, Aspen HYSYS V12 и Microsoft Excel.

Научная новизна диссертационной работы:

- разработана комплексная методология сопряженного расчета основных элементов технологических блоков, работающих под вакуумом, позволяющая учитывать взаимное влияние характеристик основного технологического объекта и вакуумсоздающей системы;
- разработана процедура сопряженного моделирования сложных химико-технологических систем, работающих под вакуумом, позволяющая осуществлять одновременный расчет вакуумируемого технологического объекта и вакуумсоздающей системы;
- введены основные критерии для сравнения эффективности вакуумсоздающих систем различного типа, основанные на эксплуатационных затратах;
- предложены математические модели основных элементов сложных химико-технологических систем, работающих под вакуумом, с учетом возникающих связей между элементами;
- разработана математическая модель жидкостно-кольцевого вакуумного насоса, адекватность которой доказана проведением экспериментального исследования.

С использованием разработанных математических моделей и методики сопряженного моделирования получены численные результаты, позволяющие выявить основные закономерности, оказывающие влияние на основные элементы сложной химико-технологической системы, работающей под вакуумом.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- на основе разработанных математических моделей в среде универсальной моделирующей программы Unisim Design R451 (HYSYS V12) синтезированы расчетные модели основных элементов технологических объектов и вакуумсоздающих систем, составляющих сложную химико-технологическую систему, работающую под вакуумом;

- разработаны рекомендации по проектированию вакуумсоздающих систем для технологических установок промышленных предприятий химического, нефтехимического и нефтеперерабатывающего профилей;
- предложенная методика сопряженного моделирования и синтезированные расчетные модули использовались при проектировании вакуумсоздающих систем на промышленных объектах.

Личное участие автора в выполненной работе состоит в следующем:

- разработка методологии сопряженного моделирования основных блоков химико-технологической системы, работающей под вакуумом;
- разработка математических моделей и расчетных модулей основных технологических объектов и вакуумсоздающих систем;
- разработка лабораторной установки и проведение экспериментальных исследований по проверке адекватности математической модели жидкостно-кольцевого вакуумного насоса;
- проведение и анализ расчетов по сопряжению характеристик основных элементов химико-технологической системы, работающей под вакуумом, для определения основных закономерностей, влияющих на остаточное давление в вакуумном блоке;
- написание и подготовка к публикации статей в журналы, реферируемые ВАК и входящие в цитатно-аналитические базы данных Scopus/Web of Science.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием специализированного программного продукта Unisim Design R451 (HYSYS V12), предназначенного для моделирования химико-технологических систем. Данный программный продукт предназначен для расчёта материальных и энергетических балансов, парожидкостного равновесия и теплопередачи, а также обладает большой базой данных термодинамических параметров чистых веществ и углеводородных смесей. Адекватность полученных расчетных значений проверялась путем сравнения результатов расчета с данными промышленного обследования действующих установок, а также с результатами экспериментальных исследований.

Соответствие паспорту специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

- п. 2. Теория подобия, моделирование и масштабирование химико-технологических процессов и аппаратов, машин и агрегатов,
- п. 4. Способы, приемы, методология исследования химических, тепловых, массообменных и совмещенных процессов, совершенствование их аппаратного оформления;

- п. 10. Методы изучения, совершенствования и создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности, обеспечивающие минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод, в том числе разработка химико-технологических процессов переработки отходов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVII научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника» (Сочи, 2010); на Международной научно-практической конференции «Нефтегазопереработка-2011» (г. Уфа); XXIV Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях-24» (Киев, 2011); XVIII научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника» (Сочи, 2011); Всероссийской молодёжной конференции с элементами научной школы «Нефть и нефтехимия» (Казань, 2011); международной конференции «Proc. 2015 Int. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)» (Томск, 2015); IV всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепло- и массообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (Казань, 2015); российско-американской научной школе-конференции «Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов и систем РАШХИ-2016» (Казань, 2016); IX Международной научно-технической конференции "Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2018" (Казань, 2018); X Международной научно-технической конференции "Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2019" (Казань, 2018); 26-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2019»; Международной научной мультikonференции «Cyber-physical systems design and modelling» (CyberPhy-2020) (Казань, 2020); XXXIV Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-34) (Санкт-Петербург, 2021); III Международной конференции ICMSIT-III-2022: Метрологическое обеспечение инновационных технологий; VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (Казань, 2022); XI Национальной научно-практической конференции с международным участием «Моделирование энергоинформационных процессов» (Воронеж, 2022); Одиннадцатой Российской студенческой научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология» (Казань, 2023).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 53 научных работ, в том числе 18 в ведущих рецензируемых изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора/кандидата наук (ВАК РФ), а также в научных изданиях, индексируемых МБД Scopus и/или Web of Science – 8 работ; свидетельств на программы для ЭВМ – 1; в материалах конференций 25 работ; монографий – 1.

В названных публикациях полностью отражены основные положения диссертации.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников. Общий объем диссертации составляет 344 страницы машинописного текста, включая 157 рисунков, 66 таблиц и список использованной литературы из 294 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность, цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы и достоверность исследований, личное участие автора.

В первой главе представлено современное аппаратурно-технологическое оформление типовых установок, работающих под вакуумом. Представлены технологические схемы процессов, проводимых под вакуумом, дана краткая характеристика основного технологического оборудования (вакуумируемого объекта). Также в первой главе представлены современные системы создания и поддержания вакуума, наиболее часто применяемые в технологических процессах, проводимых под вакуумом. Описаны основные принципы выбора типа вакуумсоздающей системы (ВСС) для технологического объекта.

Во второй главе представлено исследование существующих методов по расчету и проектированию ВСС, а также структурный анализ действующих вакуумных блоков.

Технологическая установка, работающая под вакуумом, является сложной системой, так как представляет собой совокупность взаимосвязанных и взаимовлияющих друг на друга элементов (аппаратов), связанных технологическими потоками. Схематически такая СХТС представлена на рис. 1. На рис. 1 принято следующее обозначение потоков: 1 – исходный поток сырья; 2 – продукт; 3 – несконденсированные газы; 4 – поток на ВСС; 5 – выхлоп; 6 – конденсат; 7 – теплоноситель; 8 – газы разложения; 9 – газы натекания; 10 – энергоресурс; 11 – байпасный поток для регулирования свойств ВСС. Точки: 1, 2, 3 – точки сопряжения.

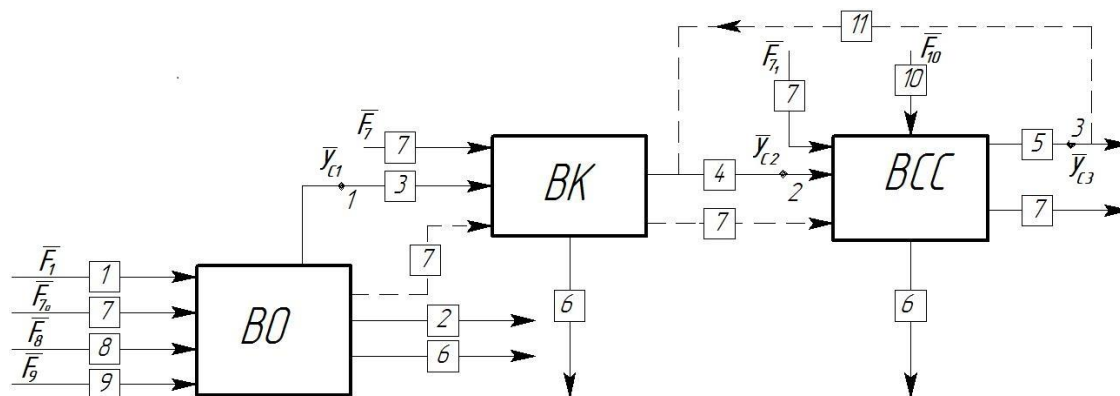


Рисунок 1 – Декомпозиция СХТС, работающей под вакуумом с учетом подвода энергоресурсов

Вектор-функция φ , отражающая последовательность решения системы уравнений математического описания, определяемого функциональным оператором:

$$\bar{y}_{c1} = \bar{\varphi}_1(\bar{F}_1, \bar{F}_{7_0}, \bar{F}_8, \bar{F}_9, \bar{a}_1) \quad (1)$$

$$\bar{y}_{c2} = \bar{\varphi}_2(\bar{y}_{c1}, \bar{F}_7, \bar{a}_2) \quad (2)$$

$$\bar{y}_{c3} = \bar{\varphi}_3(\bar{y}_{c2}, \bar{F}_{7_1}, \bar{F}_{10}, \bar{a}_3) \quad (3)$$

ВСС для промышленных технологических объектов представляет собой совокупность различного рода машин и оборудования, что позволяет разбить этот блок на ряд подсистем одного иерархического уровня. Декомпозиция ВСС, состоящей из трех блоков, показана на рис. 2.

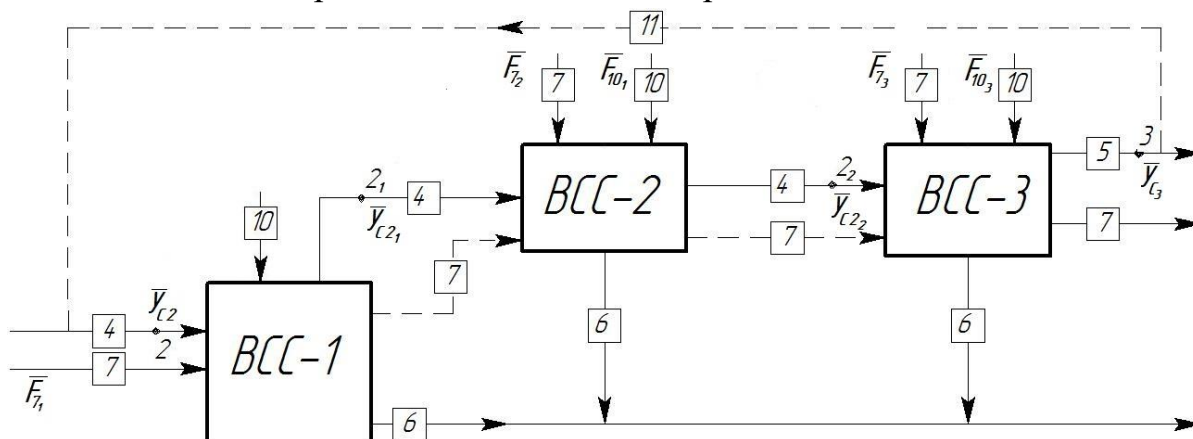


Рисунок 2 – Декомпозиция ВСС, состоящей из трех блоков

При этом вектор-функции сложной химико-технологической системы, работающей под вакуумом, в которой ВСС состоит из 3-х блоков будет дополнена:

$$\bar{y}_{c2_1} = \bar{\varphi}_{2_1}(\bar{y}_{c2}, \bar{F}_{7_1}, \bar{F}_{10_1}, \bar{a}_{2_1}) \quad (4)$$

$$\bar{y}_{c2_2} = \bar{\varphi}_{2_2}(\bar{y}_{c2_1}, \bar{F}_{7_2}, \bar{F}_{10_2}, \bar{a}_{2_2}) \quad (5)$$

Если же ВСС состоит из n ($n = 1, \dots, N$) блоков, то тогда декомпозиция системы примет вид, представленный на рис. 3.

Вектор-функции составных элементов вакуумсоздающей системы, состоящий из n элементов запишутся следующим образом:

$$\bar{y}_{c2(n-1)} = \bar{\varphi}_{2(n-1)}(\bar{y}_{c2(n-2)}, \bar{F}_{7(n-1)}, \bar{F}_{10(n-1)}, \bar{a}_{2(n-1)}) \quad (6)$$

$$\bar{y}_{c3} = \bar{\varphi}_3(\bar{y}_{c2(n-1)}, \bar{F}_{7n}, \bar{F}_{10n}, \bar{a}_3) \quad (7)$$

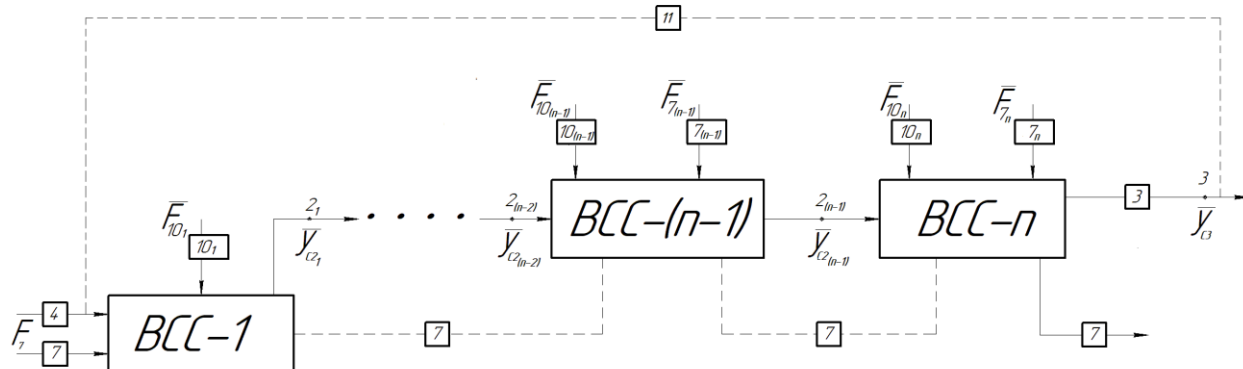


Рисунок 3 – Декомпозиция ВСС, состоящей из n блоков

Сопряжение свойств технологического объекта и системы создания вакуума означает согласование их основных характеристик, под которыми понимаются основные параметры, описывающие условия работы этих блоков как единое целое.

При моделировании и расчете вакуумных блоков основной целью является определение требуемой нагрузки на ВСС, а также определение компоновки ВСС, способной поддерживать необходимый уровень остаточного давления объекта в заданном диапазоне производственных условий при сохранении требуемого качества продуктовых потоков. Применительно к рассматриваемой в диссертационной работе проблеме расчёт вакуумного блока можно сформулировать в виде блок-схемы, которая представлена на рис. 4.

Согласно представленной блок-схеме в начале вводятся характеристики объекта и соединительных трубопроводов и по заданному давлению в блоке производится его расчет. Далее вводятся параметры конденсатора, задаётся температура охлаждения откачиваемой смеси и производится расчет. Если запас по поверхности и падению давления находятся вне допустимого диапазона, то вводится новая температура охлаждения.

После успешного расчёта предварительного конденсатора вводятся параметры ВСС, при этом давление на всасе принимается с учётом рассчитанного падения давления. Если рассчитанная производительность ВСС меньше, чем расход несконденсированной в предварительном конденсаторе газовой фазы, то вводится новое значение остаточного давления в блоке, и расчет начинается заново. Если на каком-то этапе температура или давление лежит вне допустимого диапазона, то расчёт завершается и считается, что для выбранного объекта ВСС является не работоспособной.

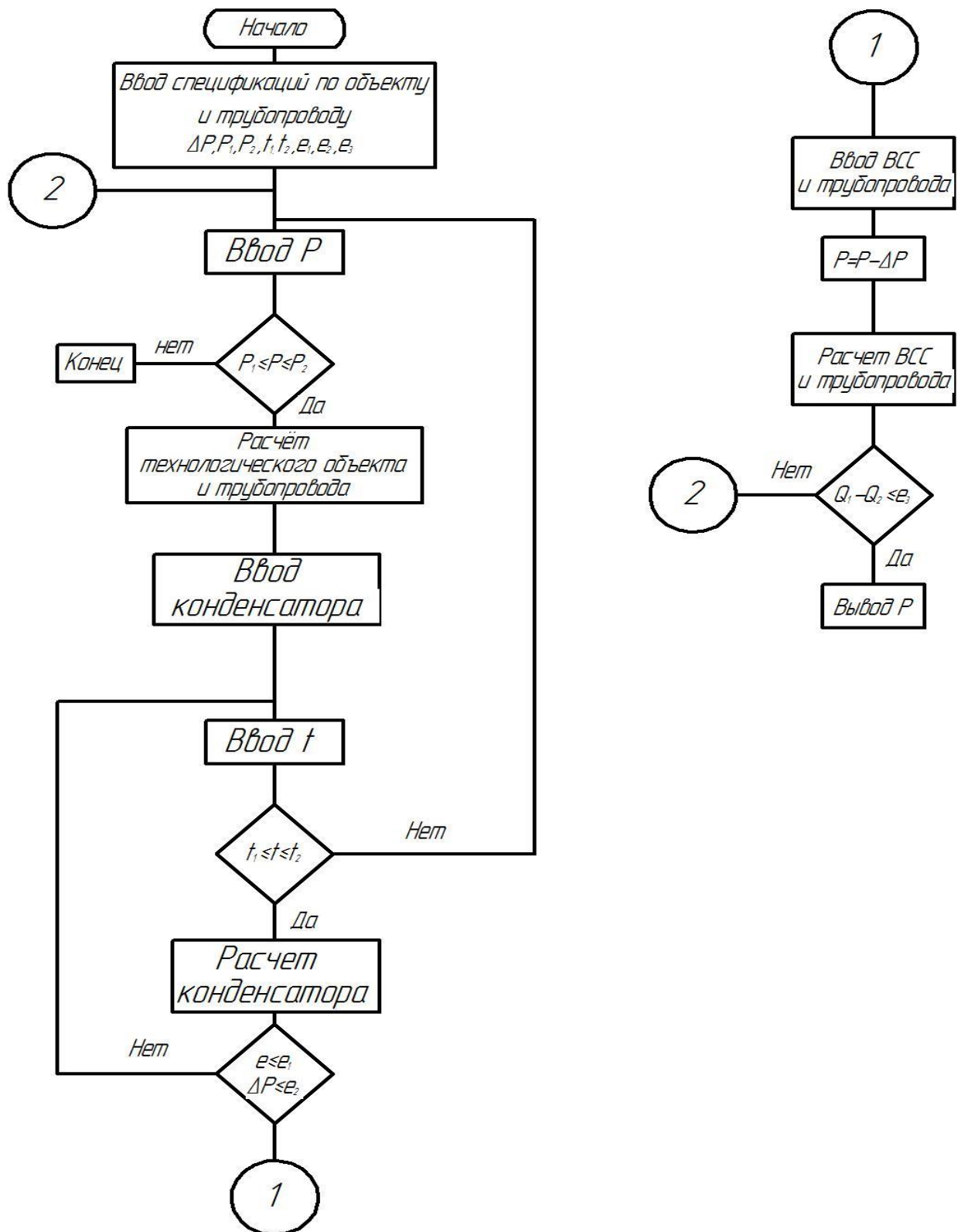


Рисунок 4 – Блок-схема методологии сопряженного моделирования вакуумных блоков промышленных установок

По схожему принципу осуществляется расчет и моделирование составных элементов ВСС (рис. 5). Вводятся параметры оборудования, рассчитываются производительности вакуумных насосов и температура выходных потоков. При этом в начале расчета задаётся давление на входе в

ВСС, на входе в форвакуумный насос и его производительность. Далее последовательно рассчитываются производительности всех элементов системы.

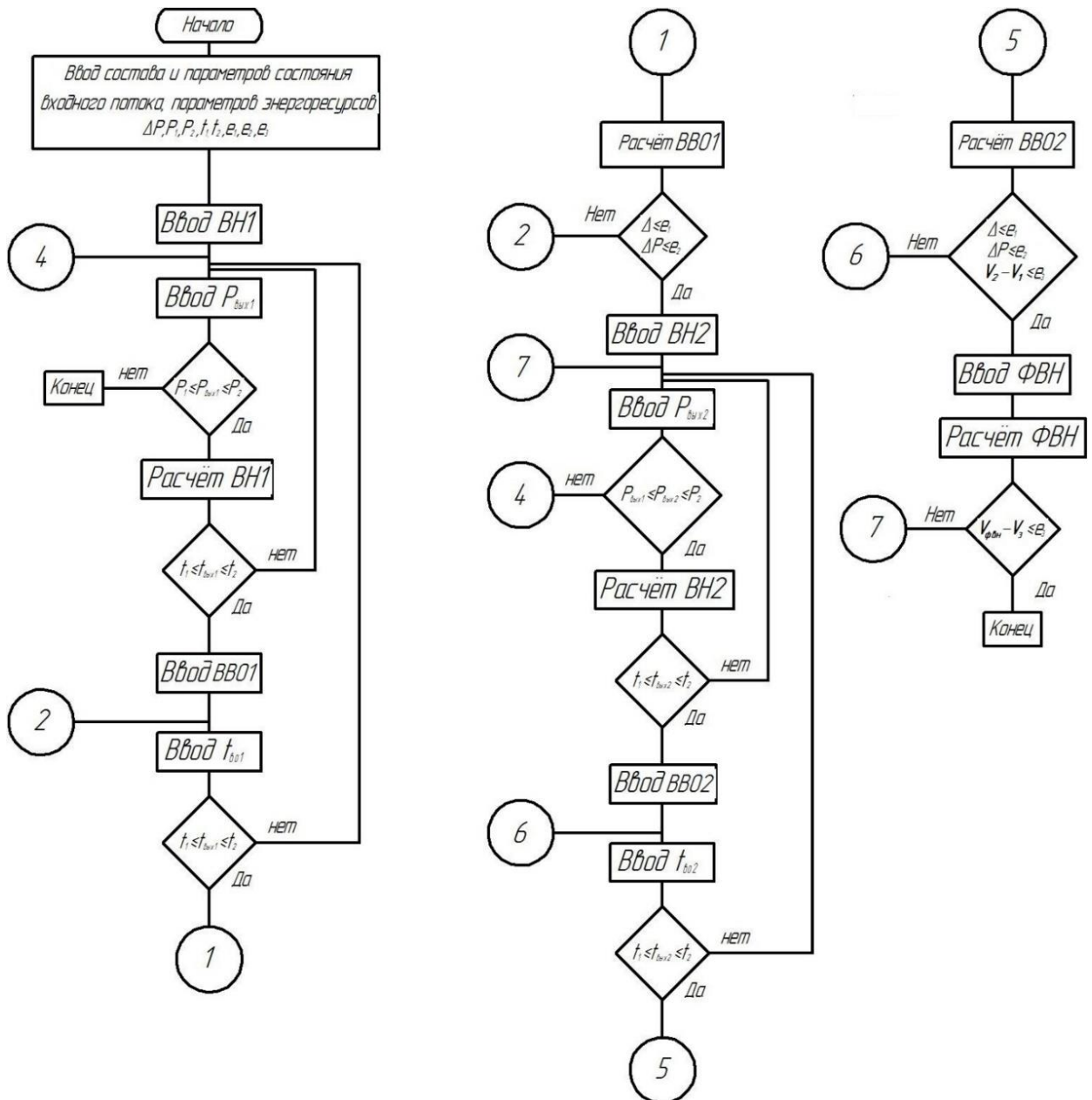


Рисунок 5 – Блок-схема расчёта ВСС

Если производительность последующей ступени ВСС меньше объемного расхода потока, выходящего из предыдущей ступени, то вводится новое значение давления на входе или уменьшается расход смеси на входе в ВСС. При этом если рассчитанные (или введенные) промежуточные давления лежат вне допустимых пределов, то расчёт завершается. Результатом расчета является рассчитанная производительность ВСС, давление на входе и параметры промежуточных потоков.

В третьей главе представлены разработанные с применением универсальных моделирующих программ Unisim Design R451 и Aspen HYSYS

V12 компьютерных моделей основных блоков сложной химико-технологической системы, функционирующей под вакуумом.

Разработка математических моделей технологических процессов, работающих под вакуумом, проводилась в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Проводился анализ исследуемой ХТС, при котором весь процесс в соответствии с декомпозиционным принципом разбивался на ряд подпроцессов, соответствующим образом соединённых между собой материальными и энергетическими потоками. При необходимости на основе технологической схемы разрабатывалась операторная схема процесса, в которой подпроцессы заменялись типовыми технологическими операторами.

2. Из базы данных УМП Unisim Design R451 (Aspen HYSYS V12) выбирались модули, предназначенные для описания того или иного подпроцесса ХТС. Модули «связывались» между собой и специфицировалась таким образом, чтобы увеличить «гибкость» схемы и обеспечить сходимость решения.

3. Проводился вычислительный эксперимент, в результате которого рассчитывался материальный и энергетический баланс исследуемой ХТС.

4. Синтезированная в УМП расчетная схема проверялась на адекватность, которая заключалась в сравнении полученных расчетных данных с результатами промышленного обследования технологического обследования или экспериментального исследования аппарата (модуля).

Расчетная схема считалась адекватной, если данные промышленного обследования (экспериментального исследования) отличались друг от друга не более чем на 15%.

Особенностью функционирования вакуумного конденсатора является то, что в аппарате существуют две зоны теплообмена: первая зона (I) – пары охлаждаются с начальной температуры до температуры насыщения; вторая зона (II) – насыщенные пары конденсируются при температуре насыщения и переохлаждаются до заданной температуры, при этом дополнительно конденсируется часть паров. Следует отметить, что температура насыщения будет определяться давлением смеси на входе и общим падением давления в межтрубном пространстве. В свою очередь именно расход инертных компонентов смеси будет определять падение давления в межтрубном пространстве.

Схема стандартного кожухотрубчатого конденсатора, работающего под вакуумом, представлена на рис. 6. Реализация математической модели вакуумного конденсатора в виде набора модулей программного комплекса Unisim Design R451 (Aspen HYSYS V12) показана на рис. 7.

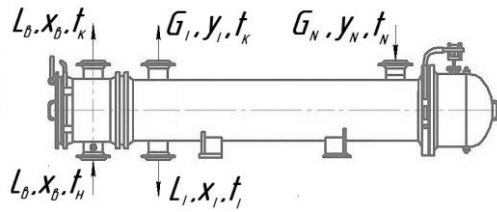


Рисунок 6 – Схема вакуумного конденсатора

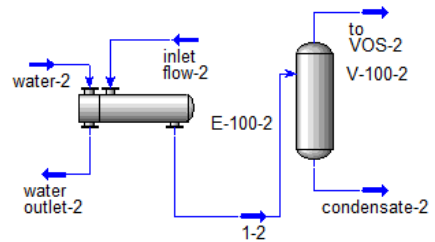


Рисунок 7 – Компьютерная модель вакуумного конденсатора

Для успешного расчета конденсатора необходимо рассчитать процесс ОИ (ОК) с учетом особенностей технологических процессов, проводимых под вакуумом. Уравнения ОИ (ОК) записаны в базе данных программы Unisim Design R451 (HYSYS V12) и реализованы в виде модуля Separator. Принцип работы модуля заключается в том, что в качестве давления принимается давление входного потока, при наличии нескольких входов – самое низкое давление входных потоков. Далее по тепловому балансу определяется температура, по которой рассчитываются составы паровой и жидкой фаз. Применительно к рассматриваемым СХТС такой подход не применим, так как температура и давление в конденсационных блоках зависят конструкции конденсатора, параметры технологического процесса и от температуры используемого теплоносителя. Возможности программы Unisim Design R415 позволяют пользователю задавать определенные температуру и давление, для чего перед модулем Separator можно добавить модуль Heat Exchanger, предназначенный для моделирования теплообменных процессов. В этом модуле задаются температура и перепад давления, при этом теплофизические параметры смеси автоматически рассчитываются программой. При расчете по предлагаемой блок-схеме конструкция конденсатора предполагается известной, поэтому температура охлаждения смеси задаётся таким образом, чтобы запас по поверхности находился в пределах $\varepsilon_1 = 0-5\%$.

Блок-схема расчёта вакуумного конденсатора представлена на рис. 8.

Расчёт вакуумного кожухотрубчатого конденсатора предлагается проводить по следующей методике:

1. ввод температуры смеси на выходе из межтрубного пространства и расчет тепловой кривой,
2. расчет конденсатора с определением запаса по поверхности и гидравлического сопротивления. Температура корректируется, если запас по поверхности меньше 0 (увеличивается температура) или больше допустимого значения (уменьшается температура),
3. если скорректированное значение температуры не лежит в допускаемых пределах, то расчет завершается и считается, что для данных условий теплообменник не подходит,

4. гидравлическое сопротивление межтрубного пространства рассчитывается отдельно для каждой зоны при средней температуре смеси в каждой зоне. Падение давлений для каждой зон суммируется, а полученное значение считается общим для конденсатора,

5. если новое рассчитанное значение давления отличается более, чем на заданную величину, то тепловая кривая корректируется с учётом гидравлических сопротивлений и повторяются пункты 2-4,

6. если суммарное падение давления превышает допустимую величину (например, более 50% от входного давления), то расчет прерывается, и считается, что для данных условий теплообменник не подходит.

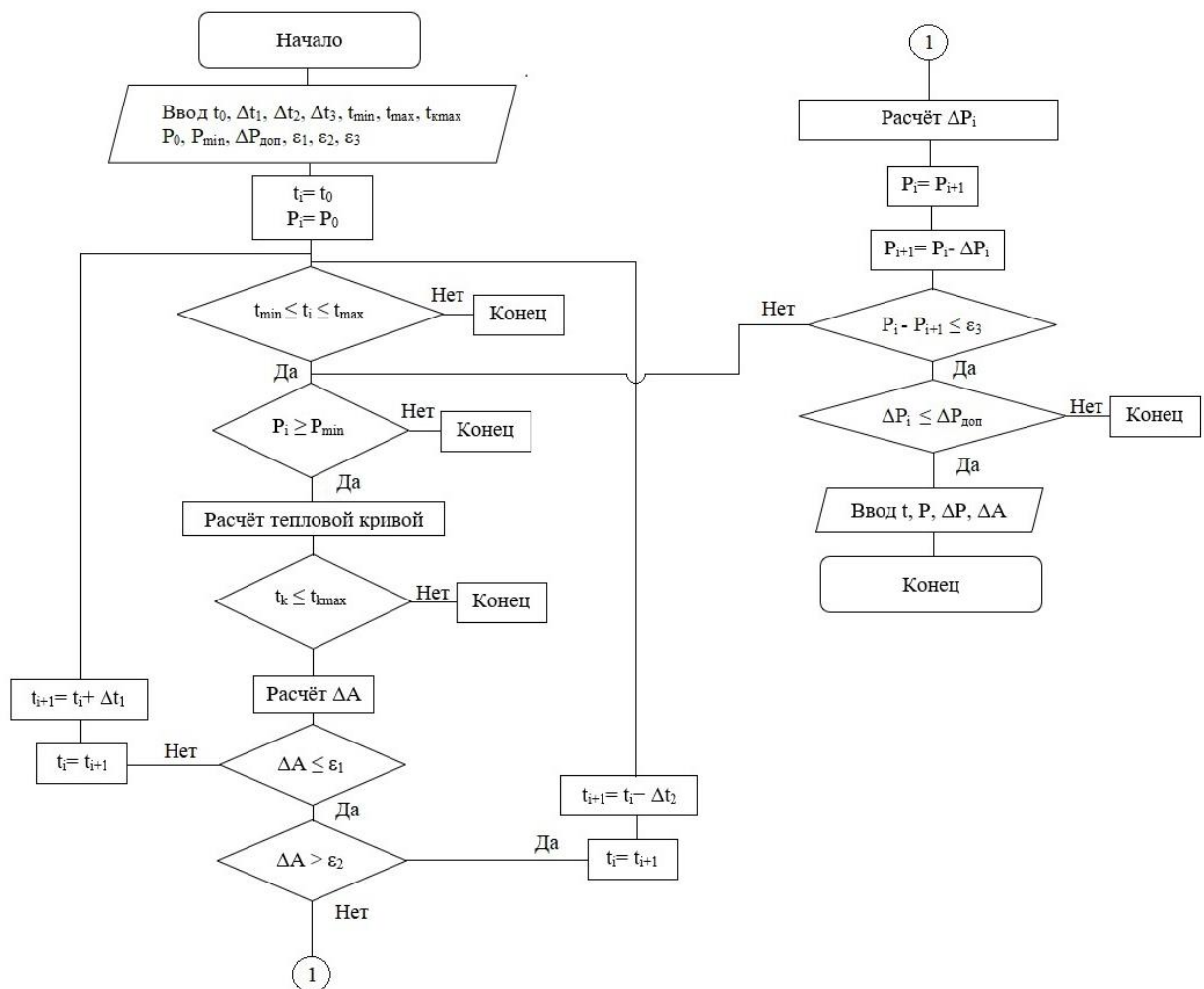


Рисунок 8 – Блок-схема расчёта вакуумного конденсатора

Параметры, необходимые для расчета конденсатора (тепловые кривые, теплофизические параметры потоков и т.д.), определяются при помощи программы Unisim Design R451 (HYSYS V12), а результатом расчета является температура охлаждения смеси, запас по поверхности и падению давления. Расчет по указанной методике в значительной мере зависит от начальных приближений температуры и давления, а также от величин Δt и ε_3 . Начальную

температуру t_0 целесообразнее всего принимать на $2-4^\circ\text{C}$ выше предельно допустимой температуры оборотной воды ($t_{\text{кmax}}$) на выходе из конденсатора. Как правило, максимальная температура оборотной воды на выходе из конденсатора составляет 38°C , поэтому в качестве начального приближения можно установить температуру $40-42^\circ\text{C}$. Рекомендуется принять значение $\varepsilon_3 = 0,5-1$ мм Нг, а допустимое падение давления $\Delta P_{\text{доп}} = 4-10$ мм Нг.

Общую производительность ВСС определяют характеристики форвакуумной ступени, которая определяет достижимый перепад давлений. Как было отмечено выше, откачиваемые газы, отходящие из технологического объекта, содержат в своём составе вещества, конденсирующие при температурах и давлениях, достижимых на конечных ступенях. Поэтому в качестве форвакуумных насосов целесообразно выбирать те, работоспособность которых не зависит от конденсации части смеси. Таким насосом является ЖКВН.

Принципиальная схема реализации рабочего процесса в ЖКВН может быть представлена в виде рис. 9, 10. I ячейка соответствует зоне всасывания, куда поступает откачиваемый газ. Этой ячейке соответствует самое низкое давление в насосе, при котором откачиваемый газ насыщается парами испарившейся рабочей жидкости. Далее газ поступает в ячейку II, где сжимается до давления нагнетания, и поступает в ячейку III, которая соответствует ячейке нагнетания, из которой откачиваемый газ отводится из насоса. При этом из ячейки III часть газа возвращается на всасывание (в ячейку I). Как уже было написано выше, IV ячейка соответствует сепаратору рабочей жидкости и откачиваемого газа.

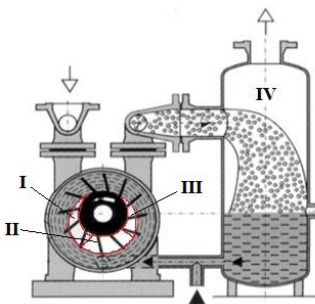


Рисунок 9 – Схема ЖКВН
с указанием ячеек

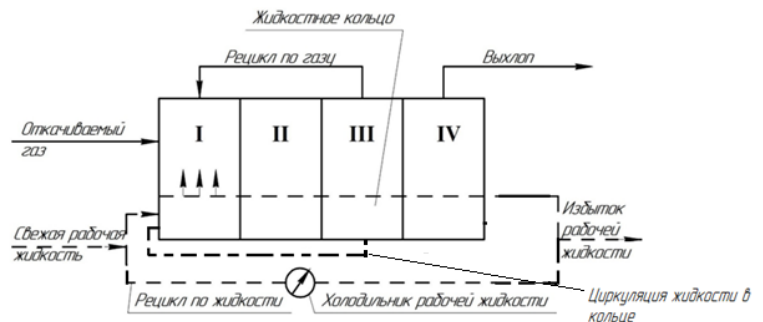


Рисунок 10 – Принципиальная схема
реализации рабочего процесса в ЖКВН

Уравнение для описания объема ячейки всасывания, заполняемого откачиваемой парогазовой средой, будет иметь вид:

$$V_o(\varepsilon) + \Delta V_o(\varepsilon) = V_I \cdot F(\mu) \cdot F(\rho) + [V_{rez}(\varepsilon) + \Delta V_{rez}(\varepsilon)] \quad (8)$$

Паспортные характеристики ЖКВН отличаются ярко выраженной нелинейностью, поэтому целесообразнее всего в уравнении (8) перейти от объемной производительности к мольной.

$$\frac{G_o(\varepsilon)}{G_I \cdot F(\mu) * F(\rho)} \cdot \left[\left(1 + \frac{\Delta G_o(\varepsilon)}{G_o(\varepsilon)} \right) + \psi_{rez}(\varepsilon) \right] = 1 \quad (9)$$

$$\psi_{rez} = G_{rez}/G_0(\varepsilon) \quad (10)$$

Тепловой баланс запишется в виде

$$G_o H_o + L_o h_o + Q_N + L_y \cdot h_y = G_K H_K + L_K h_K + Q_{MO} \quad (11)$$

Для системы «вода-воздух» можно записать

$$G_K = G_O + \Delta G_O \quad (12) \quad L_K = L_O - \Delta G_O \quad (13) \quad \Delta G_O = G_O \cdot \frac{Y_I^* - Y_O}{1 - Y_I^*} \quad (14)$$

Если учитывать, что процесс массообмена идет на линии насыщения, и принять 90% долю диссипации энергии привода в тепло, то тепловой баланс запишется в виде уравнения:

$$\begin{aligned} G_o c_{pv} t_{v0} + L_o c_{pL} t_{L0} + 0.9N \cdot 3600 + L_u \cdot c_{pL} \cdot t_{Lk} = \\ = (G_o + \Delta G) c_{pv} t_{nk} + (L_o - \Delta G) c_{pL} t_{Lk} + \Delta G \cdot r \end{aligned} \quad (15)$$

В соответствии с подходом, изложенным в главе 2, весь рабочий процесс ЖКВН можно представить в виде последовательности типовых процессов и составить компьютерную модель ЖКВН (рис. 11).

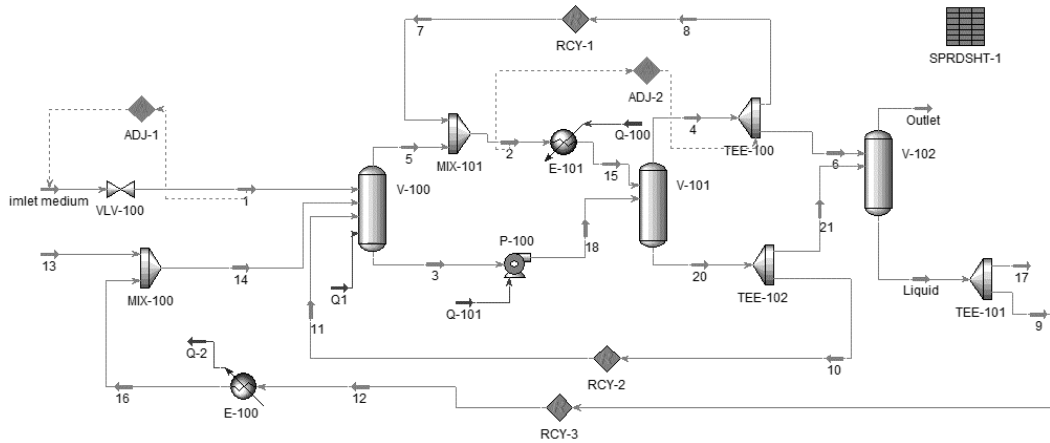


Рисунок 11 – Расчетная схема ЖКВН в режиме идентификации

Откачиваемый газ и сервисная жидкость (потоки 1 и 14) поступают в ячейку всасывания I (модуль V-100), куда так же подводится тепловой поток Q1, определяемый из условия диссипации 90% мощности привода в тепло. Из условия о достижения ПЖР рассчитываются составы паровой и жидкой фаз, паровая смешивается с рециркулирующим газом и поступает в сепаратор V-101 (соответствует ячейке III), давление которого соответствует давлению выхлопа. В этот же модуль подается жидкая фаза сепаратора V-101. Паровая фаза сепаратора V-101 разделяется на потоки рециркулирующего газа (который обратно возвращается в ячейку I), а жидкая фаза разделяется на поток рециркулирующей жидкости и сервисной жидкости, выводимой из ЖКВН. Для сжатия смеси используется модуль P-100 (соответствует ячейке

II). Ячейке IV соответствует модуль V-102, который соответствует сепаратору ЖКВН.

Для расчета производительности ЖКВН по данной модели необходимо определить расход рециркулирующего газа, для чего производится идентификация конкретного типа ЖКВН. На входе фиксируется расход входного потока (соответствует паспортной производительности ЖКВН), а расход рециркулирующего потока определяется таким образом, чтобы расход объединенного потока рециркулирующего газа и паровой фазы ячейки I (на схеме рис. 11 это поток 2) соответствовал максимально возможной производительности ЖКВН (определяется по паспортной характеристике). Поэтому в качестве примера было предложено провести идентификацию компьютерных моделей на двух разных ЖКВН: одноступенчатого ЖКВН Мех-25, установленного на лабораторной установке кафедры МАХП КНИТУ; двухступенчатого ЖКВН LPH 85340, предложенного при реконструкции ВСС вакуумного блока мини-НПЗ.

Расходы рециркуляционного газа в зависимости от давления всасывания и аппроксимирующие уравнения представлены на рис. 12 и 13.

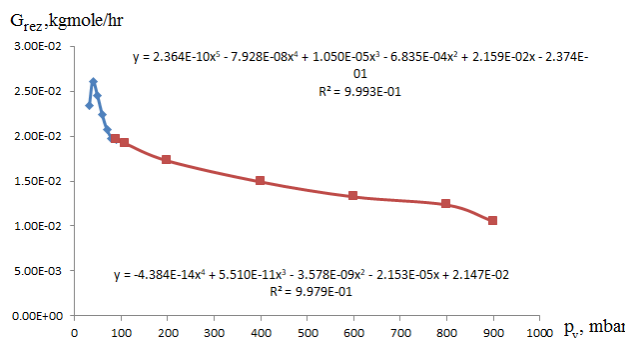


Рисунок 12 – Расход G_{rez} в зависимости от p_v (МЕХ-25)

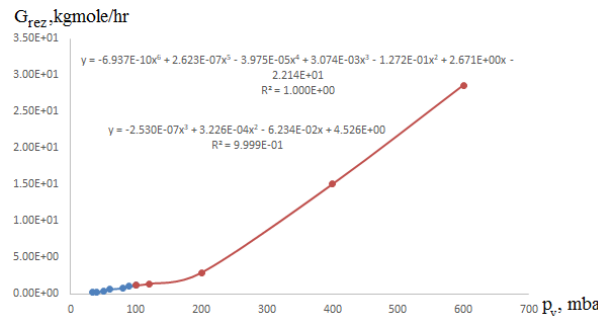


Рисунок 13 – Расход G_{rez} в зависимости от p_v (LPH 85340)

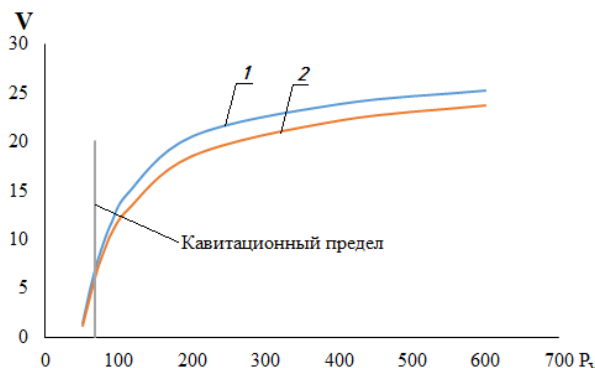


Рисунок 14 – Характеристика ЖКВН МЕХ-25 при $t_{sl} = 30^\circ\text{C}$

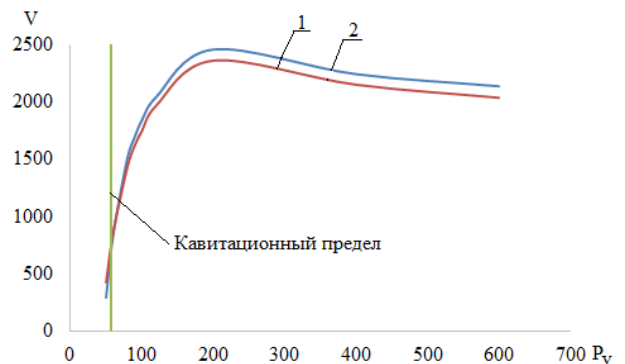


Рисунок 15 – Характеристика ЖКВН LPH 85340 при $t_{sl} = 30^\circ\text{C}$

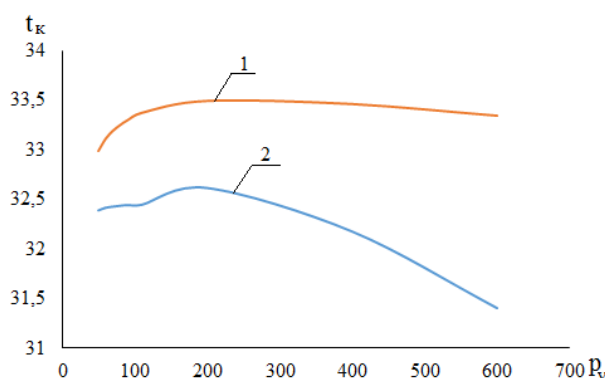


Рисунок 16 – Характеристика ЖКВН МЕХ-25 при $t_{sl} = 30^\circ\text{C}$

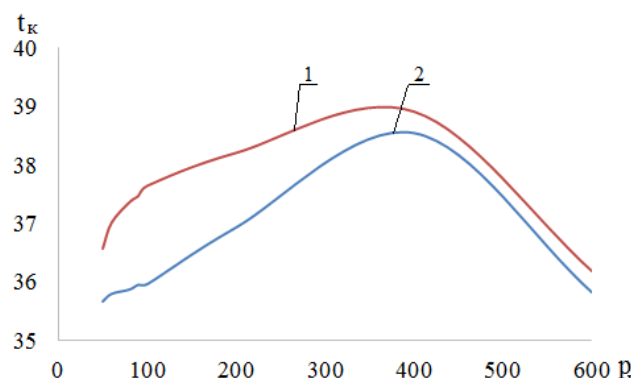


Рисунок 17 – Изменение выходной температуры при $t_{sl} = 30^\circ\text{C}$

Для проверки адекватности разработанной компьютерной модели проведено сравнение результатов расчета изменения производительности и температуры сервисной жидкости на выходе с результатами, полученными по методике, представленной в пособии «Liquid ring vacuum pumps and liquid ring compressors. Technical details and Fields of application» фирмы Sterling SIHI group (далее по тексту методика). Кривые изменения производительности, рассчитанные по методике (кривая 1) и разработанной в Unisim R451 (HYSYS) модели (кривая 2), показаны на рис. 14, 15.

Изменение выходной температуры сервисной жидкости, рассчитанной по методике (кривая 1) и модели (кривая 2), представлено на рис. 16, 17.

При давлениях 33-40 мбар отклонения по расчету производительности составляют от 18 до 33%, при этом разработанная математическая модель дает более низкие значения производительности, а по выходной температуре различия составляют не более 10% (модель также дает меньшие значения).

Для экспериментального подтверждения модели была спроектирована лабораторная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 18.

Во время эксперимента по показаниям расходомера 6 определялся расход откачиваемого газа (по условиям, соответствующим показаниям термометра 7 и манометра 8), который в дальнейшем пересчитывался на условия всасывания. Также определялось повышение температуры рабочей жидкости, являющейся разностью показаний термометров 10 и 12. Во время проведения эксперимента фиксировалось давление, которое поддерживалось клапаном 13, при этом каждые 10 минут определялся расход откачиваемого газа. Всего на одно давление проводилось 4 замера расхода и температуры сервисной жидкости на выходе, далее клапаном 13 выставлялось следующее давление (рис. 18).

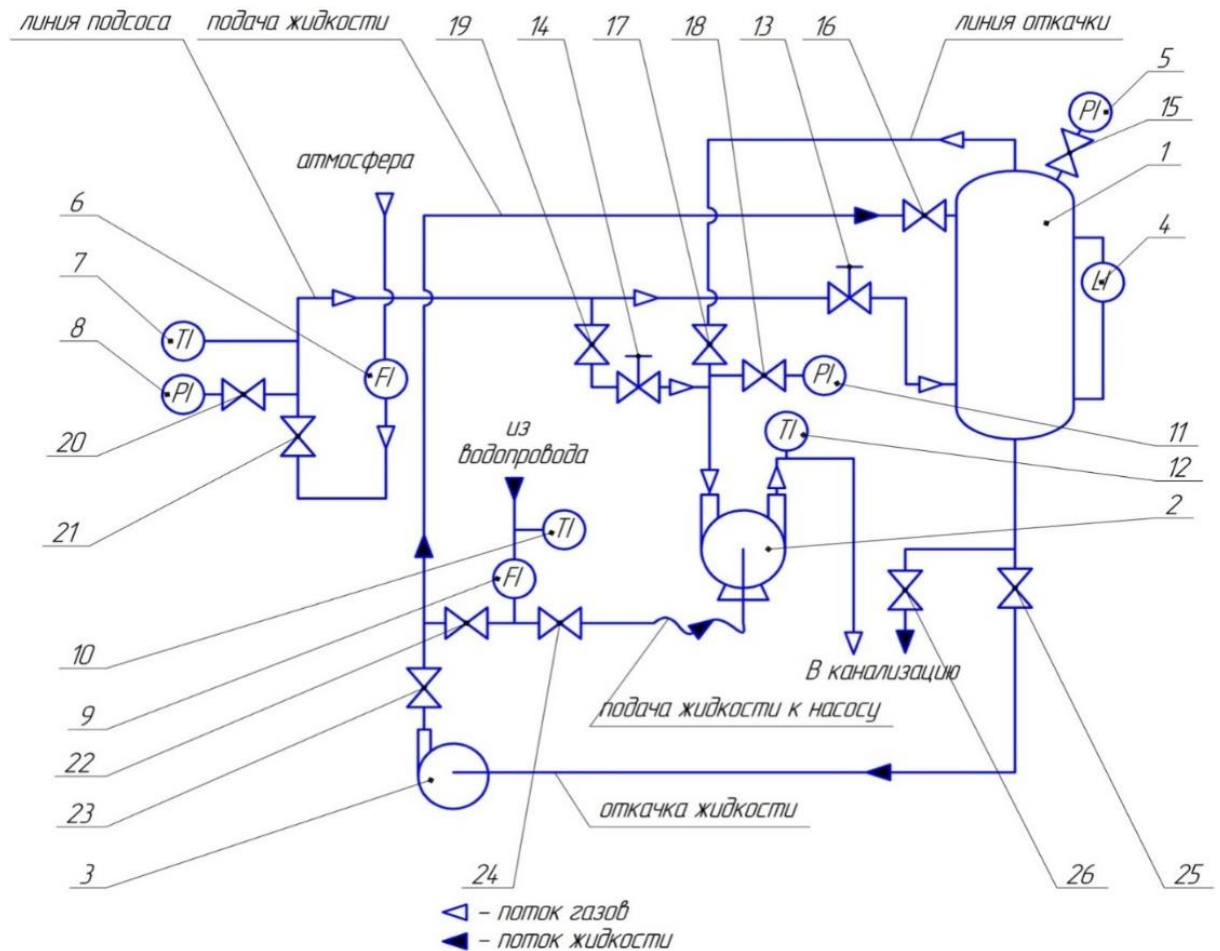


Рисунок 18 – Схема установки для исследования ВСС: 1 – сатуратор; 2 – жидкостно-кольцевой вакуумный насос МЕХ-25; 3 – насос; 4 – уровнемер; 5, 8, 11 – датчики давления; 6, 9 – датчики расхода; 7, 10, 12 – датчики температуры; 13-26 – запорная арматура

На рис. 19, 20 представлено изменение температуры сервисной жидкости на выходе из ЖКВН, рассчитанное по методике (кривая 1), модели (кривая 2) и измеренное экспериментально (кривая 3).

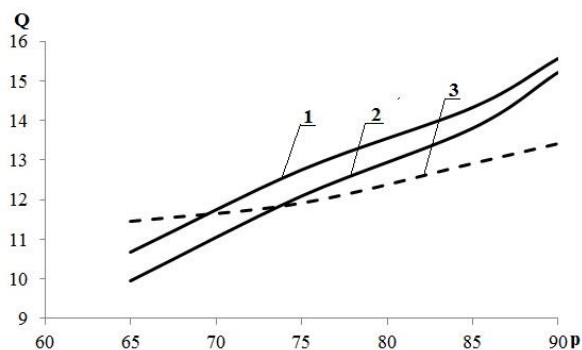


Рисунок 19 – Изменение производительности от давления всасывания

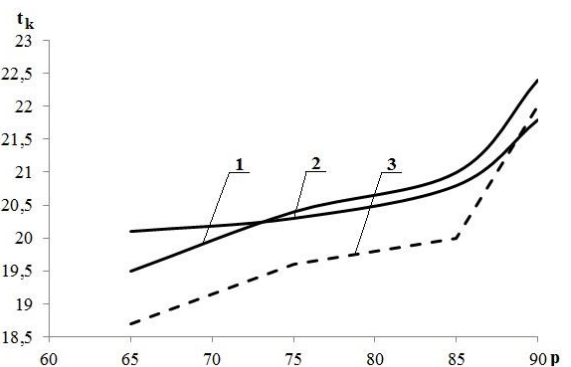


Рисунок 20 – Зависимость изменения температуры жидкости выходе от давления всасывания

Как из рис. 19, 20, расчеты по модели и методике хорошо согласуются с экспериментальными данными как по производительности (максимальное отклонение от экспериментальных данных составляет не более 15%), так и по температуре сервисной жидкости на выходе из ЖКВН (максимальное отклонение от экспериментальных данных составляет не более 7%).

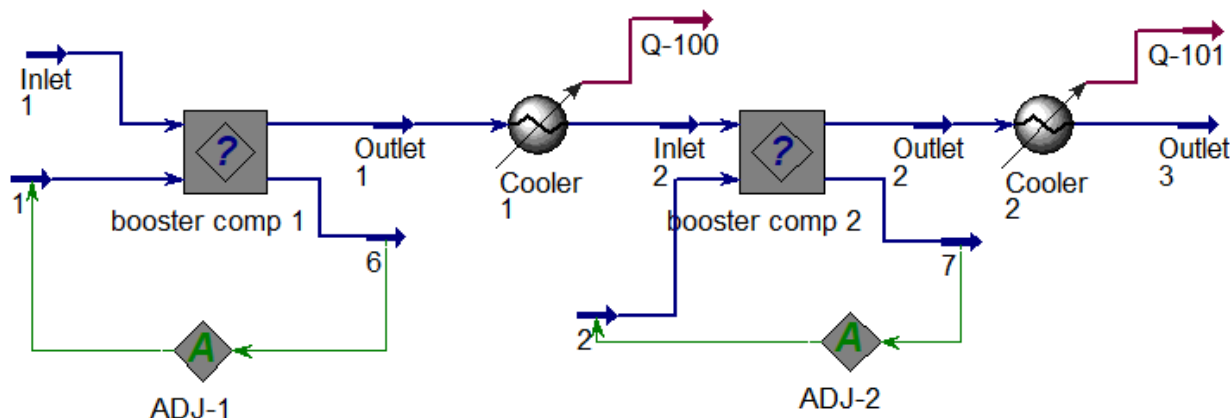


Рисунок 21 – Расчетная схема цепочки насосов Рутс с промежуточными холодильниками

Для создания компьютерной модели насоса типа Рутс был использован пользовательский модуль, в который были включены уравнения для пересчета производительности и входного давления. Расчетная схема цепочки насосов Рутс с промежуточными холодильниками представлена на рис. 21.

Блок-схема расчета представлена на рис. 22.

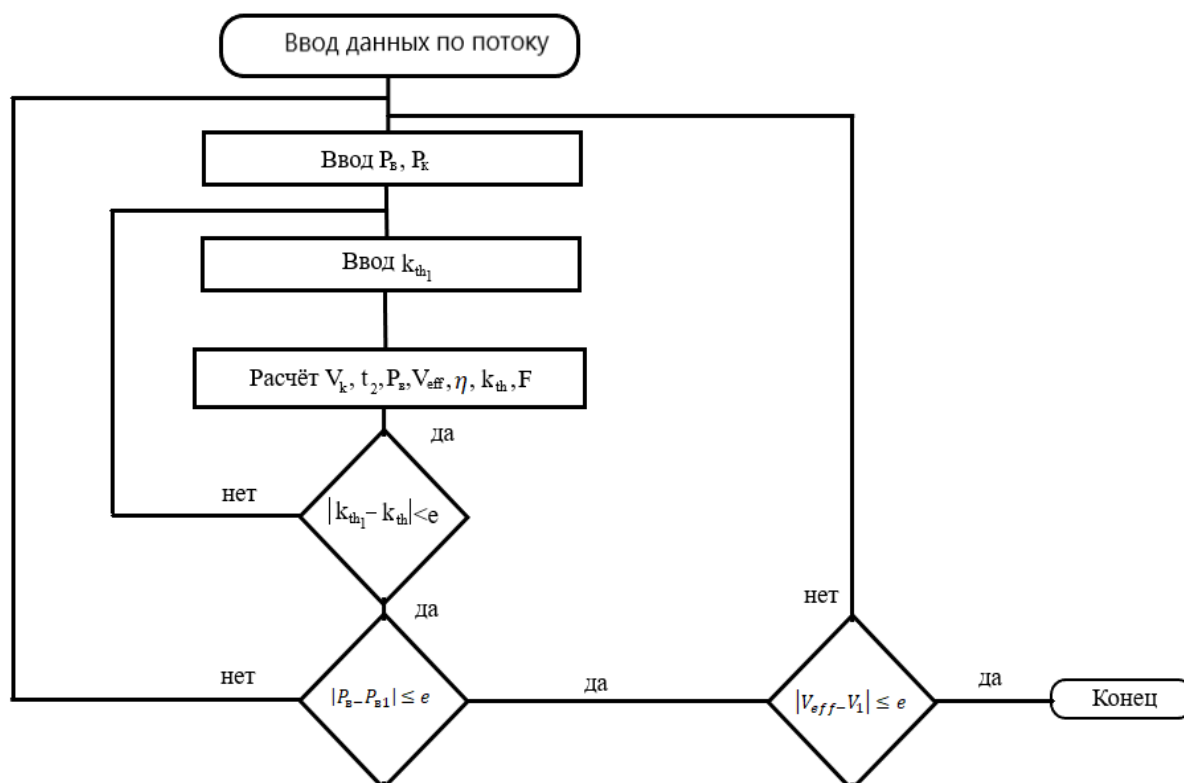


Рисунок 22 – Блок-схема расчёта насоса типа Рутс

Согласно блок-схеме расчет осуществлялся в несколько этапов:

1. Задавался поток на входе модуль (вводились давление, температура, расход и состав); 2. Задавалось давление на выходе из насоса; 3. Задавалось начальное приближение k_{th} ; 4. Рассчитывалась температура на выходе из насоса. 5. Далее проверялось условие: отношение объёмного расхода на входе в насос к объёмному расходу на выходе не должно расходиться с рассчитанным не более чем на 10%. Если условие не выполнено, то вводилось новое значение k_{th} и повторялись пункты 3 и 4. 6. Если условие, изложенное в пункте 5, выполнилось, то рассчитывалось давление на входе и объёмная производительность насоса. 7. Если принятое давление на входе не совпадало с рассчитанным, то принималось новое значение давления и повторялись пункты 1-6.

В четвертой главе описывается применение методологии сопряженного моделирования для совершенствования химико-технологических процессов, проводимых под вакуумом. Для группы вакуумных колонн по разделению смеси этаноламинов была определена компоновка ВСС на базе насосов Рутс и ЖКВН, а экономический эффект составил 3 млн 225 тыс. рублей при сроке окупаемости 3,88 года. Для вакуумной колонны мини-НПЗ в результате замены ПЭНа на ЖКВН эксплуатационные затраты снизились на 78%, при этом система сохраняет работоспособность на всех режимах работы. Использование единой вакуумсоздающей системы на базе ЖКВН с предвключенным эжектором на одной из колонн блока отделения по переработке отходов производства фенола и ацетона кумольным методом позволило снизить давление в колоннах в 1,5 раза. При расчете ПЭНа для колонны осушки установки гидрокрекинга определение оптимального распределения давлений по ступеням, уточненный расчет падения давления в вакуумных конденсаторах и разработка схемы подачи оборотной воды позволило снизить расход водяного пара на 494 кг/ч при сохранении требуемых параметров работы ВСС. При разработке проекта ПЭНа для колонны ректификации мазута использованная методология позволила определить оптимальную геометрию паровых эжекторов, схему подачи оборотной воды и снизить эксплуатационные затраты на 20% по сравнению с существующим вариантом.

Обозначения

y – доля в паровой фазе; x – доля в жидкой фазе; $\bar{y}_c$ – вектор выходных переменных; $\bar{F}$ – вектор входных переменных потоков; P – давление, кПа (мбар); t – температура, °C; e – доля отгона; e_1, e_2, e_3 – погрешность; ВН – вакуумный насос; ФВН – форвакуумный насос; V – объёмный расход, м³/час; ВВО – трубопровод; L – расход жидкости, кг/час; G – расход газа, кг/час; ОИ

(ОК) – однократное испарение (конденсация); ВСХТС – сложная химико-технологическая система, работающая под вакуумом; ВСС – вакуумсоздающая система; c_p – удельная теплоёмкость, кДж/(кг·°С); q – теплота парообразования, кДж/кг; G_{rez} – рециркулирующий поток газа, кг-моль/час; η – к.п.д.; ЖКВН – жидкостно-кольцевой вакуумный насос; ПЭН – пароежекторный вакуумный насос; ПЖР – парожидкостное равновесие.

Индексы

о – начальный; к – конечный; eff – эффективный; sl – сервисная жидкость; L – жидкость, v – пар; ц – циркуляционный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассматривалась и решалась актуальная проблема по совершенствованию методов определения компоновки технологических вакуумсоздающих систем промышленных установок, а также совершенствование их аппаратурно-технологического оформления. Решение данной проблемы осуществлялось методами компьютерного моделирования химико-технологических процессов, проводимых под вакуумом, при этом адекватность разработанных математических моделей проверялась путем сравнения с данными промышленного обследования действующих технологических установок и экспериментального исследования на лабораторной установке.

Для решения поставленных в рамках данной проблемы задач использованы возможности специализированного программного комплекса Unisim Design R451 (HYSYS V12), который предназначен для моделирования различного вида химико-технологических процессов. В процессе выполнения работы получены следующие результаты:

1. Разработана методология сопряженного моделирования вакуумных технологических блоков и систем создания вакуума, при которой вакуумируемый блок и ВСС рассматривается как единая сложная ХТС, а расчет ВСС осуществляется с учетом изменения характеристик вакуумируемого объекта при различных параметрах технологического режима исследуемой установки.

2. Конкретизирована общая стратегия системного подхода для целей анализа действующих промышленных установок, работающих под вакуумом, и представлена в виде методологии сопряженного моделирования технологических объектов и вакуумсоздающих систем.

3. В среде Unisim Design R451 синтезирована расчетная модель ЖКВН, которая учитывает тепло - массообменные процессы, протекающие в насосе. Для настройки модели используются паспортные характеристики

(зависимости производительности и потребляемой мощности от давления), выдаваемые заводами-изготовителями. Проверка адекватности модели проводилась путем сравнения результатов расчета со стандартной методикой пересчёта характеристик и результатами экспериментального исследования. Данная модель может применяться при использовании любых типов универсальных моделирующих программ.

4. Разработаны и верифицированы математические модели основных типов вакуумсоздающих систем, применяемых на промышленных установках химического, нефтехимического и нефтеперерабатывающего комплексов, которые интегрированы в универсальный моделирующий комплекс Unisim Design R451 (вакуумный конденсатор, паровой/газовый эжектор, ЖКВН, вакуумный насос типа Рутс).

5. Установлено, что отличия рабочих параметров вакуумной химико-технологической системы от проектных обусловлены неопределённостью, возникающей при выборе различных решений на стадии проектирования. В тоже время это даёт возможность оптимизации действующих вакуумсоздающих систем, а реализация этой возможности достигается использованием стратегии системного подхода.

6. Предложено рассматривать вакуумные блоки промышленных установок как сложную химико-технологическую систему, для которой методом декомпозиции определены основные блоки, влияющие на характеристику системы в целом. В качестве характеристик основных блоков определены зависимости объемного расхода потока от давления.

7. Определены и выставлены по степени значимости параметры ХТС, которые определяют условия сопряжения основных блоков системы:

- основные свойства исходного потока, поступающего в технологический объект;
- параметры энергетических потоков, используемых на установке – начальная температура оборотной воды (для вакуумируемого объекта) и сервисной жидкости ЖКВН;
- технологические параметры рабочих тел – температура и давление водяного пара (при использовании ВСС на базе ПЭНа), состав рабочей жидкости (для ВГЦА и ЖКВН);

8. Обобщены данные технологических обследований исследуемых типовых вакуумных блоков, которые использованы для настройки математических моделей и проверке их адекватности.

9. Разработаны рекомендации по повышению технико-экономических показателей действующих вакуумных блоков, которые

определены путём нахождения условий сопряжения между составными элементами ВСС, а также между ВСС и технологическим объектом.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, математические модели аппаратов, а также методология сопряженного моделирования применяются в проектных организациях, занимающихся расчетом химико-технологических процессов: ООО «НИИВМ», ОА «ИТКЭ им. Д.В. Сокольского» (г. Алматы, Республика Казахстан), ООО «СВУ», ООО «Системотехника».

Результаты, полученные в ходе выполнения работы были использованы при реализации следующих проектов:

ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» Баяндынское месторождение» по теме «Разработка, изготовление и поставка насоса вакуумного эжекторного пароводяного в кол-ве 2 шт.»;

ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» УПН «Восточный Ламбейшор» по теме «Разработка, изготовление и поставка насоса вакуумного эжекторного пароводяного в кол-ве 2 шт.»;

ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегородниинепфтепроект» по теме «Разработка энергосберегающей технологии создания вакуума в ректификационной вакуумной колонне установки ЭЛОУ-АВТ нефтеперерабатывающего завода ТПП «Когалымнефтегаз»;

ОАО «Новокуйбышевский НПЗ» по теме «Изготовление и поставка вакуумсоздающей системы поз МЕ-401 (секция гидрокрекинга и гидроочистки Комплекса ГК)».

Для дальнейшего развития темы диссертационного исследования необходимо разработать автоматизированную методику по подбору давления в блоках и доработать разработанные математические модели.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

В изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

1. Теляков, Э. Ш. Алгоритмы учёта конденсации при истечении конденсируемого рабочего тела через активное сопло газового эжектора / Э. Ш. Теляков, Т. С. Козырева, **Э. В. Осипов**, Э. Б. Мац // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 19. – С. 101-104.

2. Ефремов, Р. А. Оценка выхода газов термического разложения мазутов из различных типов нефтей / Р. А. Ефремов, Ф. М. Сайрутдинов, **Э. В. Осипов**, Х. С. Шоипов, Э. Ш. Теляков // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 2. – С. 164-166.

3. **Осипов, Э. В.** Реконструкция системы создания вакуума ректификационной колонны К-3 ТПП «Когалымнефтегаз» (ОАО «Лукойл -

Западная Сибирь) / Э. В. Осипов, Х. С. Шоипов, Э. Ш. Теляков // Бутлеровские сообщения.-2013. – Т. 36. – № 11. – С. 50-57.

4. **Осипов, Э. В.** Технологическое обследование вакуумной ректификационной колонны разделения мазута К-3 ТПП "Когалымнефтегаз" (ОАО "ЛУКОЙЛ-западная Сибирь") / Э. В. Осипов, Х. С. Шоипов, Э. Ш. Теляков // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 21. – С. 283-286.

5. **Осипов, Э. В.** Реконструкция вакуумсоздающей системы (ВСС) колонны разделения мазута К-3 ТПП "Когалымнефтегаз" (ОАО "ЛУКОЙЛ-западная Сибирь") / Э. В. Осипов, Х. С. Шоипов, Э. Ш. Теляков // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 3. – С. 209-212.

6. **Осипов, Э. В.** Влияние режимных параметров работы колонны разделения мазута на характеристику вакуумсоздающей системы / Э. В. Осипов, Р. А. Ефремов, Д. И. Кашифразов, Л. Э. Осипова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 20. – С. 259-261.

7. **Осипов, Э. В.** Расчет эжекционной системы аспирации воздуха с помощью универсальной моделирующей программы ChemCad / Э. В. Осипов, Л. Э. Осипова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 9. – С. 221-223.

8. **Осипов, Э. В.** Особенности теплового и гидравлического расчета парозежекторной вакуумсоздающей системы (ВСС) на примере ВСС установки гидрокрекинга / Э. В. Осипов, Э. Ш. Теляков, К. С. Садыков, Д. И. Кашифразов // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 3. – С. 157-160.

9. Фахрутдинов, Р. И. Определение оптимального распределения степеней сжатия по ступеням парозежекторного насоса / Р. И. Фахрутдинов, Э. В. Осипов // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 20. – С. 105-107.

10. **Осипов, Э. В.** Проектирование установок АТ и АВТ с использованием универсальных моделирующих программ (УМП) / Э. В. Осипов, Э. Ш. Теляков, О. В. Капитонова, Д. Г. Тукманов // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 16. – С. 100-104.

11. Капитонова, О. В. Наложение нефтяных фракций при разделении мазута под вакуумом / О. В. Капитонова, Э. В. Осипов // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 20. – С. 88-90.

12. **Осипов, Э. В.** Оптимальное проектирование парозежекторной вакуумсоздающей системы для установки гидрокрекинга / Э. В. Осипов, Э. Ш.

Теляков, К.С. Садыков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – Т. 52. – № 5. – С. 30-32.

13. Латыпов, Р. М. Математическая модель выпарного аппарата производства этиленгликолей / Р. М. Латыпов, **Э. В. Осипов**, Э. Ш. Теляков, Р. И. Фахрутдинов // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 11. – С. 145-148.

14. Латыпов, Р. М. Системный анализ аппаратурно-технологического оформления производств гликолей / Р. М. Латыпов, **Э. В. Осипов**, Э. Ш. Теляков // Теоретические основы химической технологии. – 2017. – Т. 51. – № 6. – С. 637-648.

15. **Осипов, Э. В.** Реконструкция системы создания вакуума для ректификационной колонны разделения моноэтаноламина/ Э. В. Осипов, Д. Бугембе, Э. Ш. Теляков, С. И. Поникаров // Вакуумная техника и технология. – Т. 29. – № 3. – 2019. – С. 10-13.

16. **Осипов, Э. В.** Влияние тепло- и массообменных процессов, протекающих в жидкостно-кольцевом вакуумном насосе на его эксплуатационные характеристики / Э. В. Осипов, Э. Ш. Теляков, Р. М. Латыпов, Д. Бугембе // Инженерно-физический журнал. – 2019. – Т. 92. – № 4. – С. 1089-1099.

17. **Осипов, Э. В.** Совершенствование системы создания вакуума в блоке ректификационных колонн разделения смесей этаноламинов / Э. В. Осипов, Э. Ш. Теляков, С. И. Поникаров, А. А. Хоменко // Химическая промышленность сегодня. – 2020. – № 6. – С. 26-31.

18. **Осипов, Э. В.** Экспериментальное исследование характеристик жидкостно-кольцевого вакуумного насоса / Э. В. Осипов, Д. Бугембе, С. И. Поникаров // Химическая промышленность сегодня. – 2021. – № 5. – С. 56-63.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

19. **Osipov, E.** Reconstruction of vacuum system for crude oil vacuum tower distillation / E. Osipov, R. Latyipov, L. Osipova // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. – 2015. – P. 7414906.

20. Telyakov, E. Sh. Reconstruct a vacuum column injector system using computer modeling – Part 1 / E. Sh. Telyakov, **E. V. Osipov**, D. Bugembe // Hydrocarbon Processing. – 2018. – Vol. 97. – № 10. – P. 83-88.

21. Telyakov, E. Sh. Reconstruct a vacuum column injector system using computer modeling – Part 2. / E. Sh. Telyakov, **E. V. Osipov**, D. Bugembe // Hydrocarbon Processing. – 2018. – Vol. 97. – № 11. – P. 61-64.

22. **Osipov, E. V.** Coupled Simulation of a Vacuum Creation System and a Rectification Column Block / E. V. Osipov, E. Sh. Telyakov, S. I. Ponikarov // Processes. – 2020. – Vol. 8. – № 1333. – P. 1-20.

23. **Osipov, E. V.** Mini-refinery vacuum unit: Functional analysis and improvement of vacuum overhead system / E. V. Osipov, E. S. Telyakov, S. I. Ponikarov, D. Bugembe, A. S. Ponikarov // Processes. – 2021. – Vol. 9. – № 11. – P. 1-31.

24. **Osipov, E. V.** Modeling of Vacuum Overhead System for Amine Mixtures Separation Unit / E. V. Osipov, E. Sh. Telyakov, D. Bugembe // Cyber-Physical Systems: Design and Application for Industry 4.0. – 2021. – Vol. 342. – P. 155-165.

25. **Osipov, E. V.** A methodology of coupled modeling of vacuum blocks of industrial installations / E. V. Osipov, E. Sh. Telyakov, S. I. Ponikarov, D. Bugembe, A. S. Ponikarov // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2373. – P. 1-10.

26. Umyshev D. R. Techno-Economic Analysis of the Modernization Options of a Gas Turbine Power Plant Using Aspen HYSYS / D. R. Umyshev, **E. V. Osipov**, A. A. Kibarin, M. S. Korobkov, T. V. Khodanova, Z. S. Duisenbek // Energies. – 2023. – Vol. 16. – № 6. – P. 1-22.

Свидетельство о регистрации электронного ресурса

27. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610191 Российская Федерация. Программа внешнего управления численным экспериментом, проводимом в программном комплексе ChemCad: № 2018661231: заявл. 15.10.2018: опубл. 09.01.2019 / **Э. В. Осипов**, Р. М. Латыпов, Э. Ш. Теляков; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»).

Монография

28. **Осипов, Э. В.** Моделирование испарения и конденсации для систем газ(пар)-жидкость в многокомпонентных системах / **Э. В. Осипов**, А. С. Поникаров, С. И. Поникаров, Э. Ш. Теляков. – Казань : КНИТУ, 2020. – 248 с.

В других журналах и материалах конференций:

29. Ефремов, Р. А. Оптимизация технологического оформления схемы вакуумной ректификации мазута / Р. А. Ефремов, **Э. В. Осипов**, Э. Ш. Теляков // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2014. – Т. 61. – № 2. – С. 130-132.

30. **Осипов, Э. В.** Оптимизация технологической схемы системы создания вакуума в колонне разделения мазута / Э. В. Осипов, Х. С. Шоипов, А. Д. Нурман, А. И. Зарипов // Химическая техника. – 2014. – № 6. – С. 6.

31. **Осипов, Э. В.** Вакуумсоздающая система блока ректификационных колонн отделения переработки отходов производства фенола-ацетона / Э. В. Осипов, А. И. Зарипов, Э. Ш. Теляков // Химическая техника. – 2014. – № 7. – С. 14.

32. **Осипов, Э. В.** Особенности теплового и гидравлического расчета парожетекторной вакуумосоздающей системы (ВСС) на примере ВСС установки гидрокрекинга / Э. В. Осипов, Э. Ш. Теляков, И. Р. Фахрутдинов // VII Российская студенческая научно-техническая конференция «Вакуумная техника и технология» (г. Казань, 20-23 апреля 2015 г.) : материалы конференции. – Казань: КНИТУ, 2015. – С. 96-97.

33. **Осипов, Э. В.** Совершенствование аппаратного оформления систем создания вакуума в технологических установках / Э. В. Осипов, Э. Ш. Теляков, Р. М. Латыпов // IX международная научно-практическая конференция «Современное состояние и перспективы инновационного развития нефтехимии» (г. Нижнекамск, 05–07 апреля 2016 г.) : материалы конференции. – Нижнекамск: Публичное акционерное общество «Нижнекамскнефтехим», 2016. – С. 180-181.

34. **Осипов, Э. В.** Комбинированная вакуумсоздающая система (ВСС) на базе жидкостно-кольцевого вакуумного насоса / Э. В. Осипов, Э. Ш. Теляков // VIII Международная научно-техническая конференция «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2017 (МНТК "ИМТОМ-2017")» (г. Казань, 06–08 декабря 2017 г.) : материалы конференции. – Казань, 2017. – С. 67-70.

35. Митулов, К. В. Разработка измерения узла замера расхода воздуха на экспериментальной установке по исследованию ЖКВН / К. В. Митулов, Э. В. Осипов, Ю. С. Чистов // Пятая Всероссийская студенческая научно-техническая конференция. Посвящается 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ и РТ Поникарова Ивана Ильича «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (г. Казань, 23–25 мая 2018 г.) : материалы конференции. – Казань: ООО "Инновационно-издательский дом "Бутлеровское наследие", 2018. – С. 122-125.

36. Латыпов, Р. М. Оптимизация процесса ректификации этиленгликоля при помощи расширенных возможностей Chemcad / Р. М. Латыпов, Э. В. Осипов, С. Б. Валиев // Пятая Всероссийская студенческая научно-техническая конференция. Посвящается 90-летию со дня рождения

заслуженного деятеля науки и техники РФ и РТ Поникарова Ивана Ильича «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (г. Казань, 23–25 мая 2018 г.) : материалы конференции. – Казань: ООО "Инновационно-издательский дом "Бутлеровское наследие", 2018. – С. 230-235.

37. Никитин, Д. В. Разработка установки для исследования вакуумсоздающих систем / Д. В. Никитин, Э. В. Осипов // Пятая Всероссийская студенческая научно-техническая конференция. Посвящается 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ и РТ Поникарова Ивана Ильича «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (г. Казань, 23–25 мая 2018 г.) : материалы конференции. – Казань: ООО "Инновационно-издательский дом "Бутлеровское наследие", 2018. – С. 242-244.

38. Фахрисламов, И. А. Моделирование парового вакуумного эжектора в программном комплексе ANSYS / И. А. Фахрисламов, Э. В. Осипов, Э. Ш. Теляков // Пятая Всероссийская студенческая научно-техническая конференция. Посвящается 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РФ и РТ Поникарова Ивана Ильича «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (г. Казань, 23–25 мая 2018 г.) : материалы конференции. – Казань: ООО "Инновационно-издательский дом "Бутлеровское наследие", 2018. – С. 306-309.

39. Осипов, Э. В. Сопряжение характеристик технологических объектов и вакуумсоздающих систем / Э. В. Осипов, Д. Бугембе, Э. Ш. Теляков, С. И. Поникаров // 26-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2019» (г. Санкт-Петербург, 18-20 июня 2019 г.) : труды конференции. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 51-54.

40. Осипов, Э. В. Проектирование системы создания вакуума для цепочки соединенных между собой вакуумных колонн / Э. В. Осипов, Э. Ш. Теляков, Д. Бугембе // X Международная научно-техническая конференция «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019» (г. Казань, 05-06 декабря 2019 г.) : материалы конференции. – Часть 1. – Казань, 2019. – С. 422-426.

41. Осипов, Э. В. Реконструкция системы создания вакуума для ректификационной колонны разделения моноэтаноламина / Э. В. Осипов, Д. Бугембе, Э. Ш. Теляков, С. И. Поникаров // 26-я Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Вакуумная техника и

технологии – 2019» (г. Санкт-Петербург, 18-20 июня 2019 г.) : труды конференции. – Санкт-Петербург, 2019. – С. 34-37.

42. Яковлев, П. С. Проектирование механических насосов типа roots с учетом термодинамических аспектов их работы / П. С. Яковлев, **Э. В. Осипов** // Седьмая Российская научно-техническая студенческая конференция, приуроченная к юбилейной дате 100-летию со дня рождения А.Г. Усманова «Интенсификация тепло-массообменных процессов в химической технологии» (г. Казань, 27 ноября 2020 г.) : тезисы докладов. – Казань : КНИТУ, 2020. – С. 17-18.

43. **Осипов, Э. В.** Проектирование систем создания вакуума блока разделения смесей аминов / Э. В. Осипов, Э. Ш. Теляков // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2020. – Т. 2. – С. 137-144.

44. **Осипов, Э. В.** Математическое моделирование вакуумного блока мини-НПЗ / Э. В. Осипов, С. И. Поникаров, А. С. Поникаров // Математические методы в технологиях и технике. – 2021. – № 11. – С. 52-58.

45. **Осипов, Э. В.** Сопряженное моделирование блока переработки отходов производства фенола-ацетона и ВСС / Э. В. Осипов, Д. Бугембе, А. И. Харитонов // VI Всероссийская студенческая научно-техническая конференция «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (г. Казань, 24–26 мая 2022 г.) : материалы конференции. – Казань : КНИТУ, 2022. – С. 387-391.

46. Колмаков, С. О. Сопряженный расчет первой ступени парожекционного вакуумного насоса / С. О. Колмаков, **Э. В. Осипов** // VI Всероссийская студенческая научно-техническая конференция «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (г. Казань, 24–26 мая 2022 г.) : материалы конференции. – Казань : КНИТУ, 2022. – С. 343-347.

47. **Осипов, Э. В.** Моделирование комбинированной газотурбинной установки в программном комплексе Aspen HYSYS / Э. В. Осипов, Д. Р. Умышев // VI Всероссийская студенческая научно-техническая конференция «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (г. Казань, 24–26 мая 2022 г.) : материалы конференции. – Казань : КНИТУ, 2022. – С. 392-393.

48. Назаров, Д. С. Моделирование малотоннажной ректификационной установки по разделению моно- и диэтиленгликоля / Д. С. Назаров, **Э. В. Осипов** // VI Всероссийская студенческая научно-техническая конференция «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (г. Казань, 24–26 мая 2022 г.) : материалы конференции. – Казань : КНИТУ, 2022. – С. 379-383.

49. Камашев, Н. Ю. Разработка технологической схемы рециклинга пенополиуретана // Н. Ю. Камашев, **Э. В. Осипов** // VI Всероссийская студенческая научно-техническая конференция «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (г. Казань, 24–26 мая 2022 г.) : материалы конференции. – Казань: КНИТУ, 2022. – С. 136-139.

50. Назаров, Д. С. Моделирование вакуумной малотоннажной ректификационной установки разделения гликолей / Д. С. Назаров, **Э. В. Осипов** // Одиннадцатая Российская студенческая научно-техническая конференция «Вакуумная техника и технология» (г. Казань, 18-20 апреля 2023 г.): материалы конференции. – Казань: КНИТУ, 2023. – С. 117-118.

51. **Осипов, Э. В.** Сопряженное моделирование технологических процессов, проводимых под вакуумом / **Э. В. Осипов**, Д. Бугембе, С. И. Поникаров // Моделирование энергоинформационных процессов. – 2023. – С. 237-243.

52. Назаров, Д. С. Проектирование вакуумного конденсатора для малотоннажной ректификационной установки разделения гликолей / Д. С. Назаров, **Э. В. Осипов** // Одиннадцатая Российская студенческая научно-техническая конференция «Вакуумная техника и технология» (г. Казань, 18-20 апреля 2023 г.): материалы конференции. – Казань : КНИТУ, 2023. – С. 119-120.

53. Назаров, Д. С. Расчет гидравлических сопротивлений межтрубного пространства вакуумного конденсатора / Д. С. Назаров, **Э. В. Осипов** // Одиннадцатая Российская студенческая научно-техническая конференция «Вакуумная техника и технология» (г. Казань, 18-20 апреля 2023 г.): материалы конференции. – Казань : КНИТУ, 2023. – С. 152-153.