

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Отделение ядерно-топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Оценка параметров движущихся фаз в насадочной ректификационной колонне
УДК 66.048.3-047.58

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Д	Дмитриев Василий Витальевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Видяев Д. Г.	д.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент. Ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Клемашева Е. И.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко С. Н.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Бычков П. Н.	к.т.н.		

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код	Результат освоения ООП
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы, осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования в физике кинетических явлений, наукоёмких промышленных технологиях (разделения изотопов, жидких и газовых смесей, получения высокочистых веществ).
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок как коммерческой тайны предприятия; и понимать

Код	Результат освоения ООП
	сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
Р9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
Р10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов для экспресс-контроля технологических параметров, мониторинга технического состояния технологического оборудования, переработки, утилизации и обезвреживания промышленных отходов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств производства разделения изотопов, тонкой очистки, переработки веществ, программного обеспечения тренажерных комплексов для поддержания готовности технологического персонала предприятия к работе в нештатных и критических ситуациях, к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей плазменных установок, приборов анализа и систем управления разделительными каскадами.
Р11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции, анализу рынка изотопномодифицированной, мембранной продукции, стабильных изотопов и услуг.
Р12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований в области физики селективных процессов, разделения изотопных и молекулярных смесей.
Р13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в области разделения изотопных и молекулярных смесей, молекулярно-селективных технологий и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов.
Р14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработки способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных

Код	Результат освоения ООП
	импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем получения моноизотопной и изотопно-модифицированной продукции, глубокой очистки трудно разделяемых веществ.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования плазменных, мембранных, ионообменных установок, а также приборов анализа и систем управления разделительными каскадами.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии

Отделение ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Д	Дмитриев Василий Витальевич

Тема работы:

Оценка параметров движущихся фаз в насадочной ректификационной колонне	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	22.01.2021, № 22-69/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	12.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Задание. Литературные источники по процессу ректификации тяжелой воды в ректификационной колонне. Модель ректификационной колонны, данные потоков, температур, давлений.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор и анализ литературы 2. Математическое описание законов движения потоков в свободной и пористой среде 3. Результаты расчетов, их анализ 4. Экономический расчет 5. Охрана труда и техника безопасности 6. Выводы. Заключение

Перечень графического материала	<p>Рисунки: Принципиальная модель ректификационной колонны; виды нерегулярных насадок; виды регулярных насадок; расчетная модель колонны; профили скоростей движения жидкой фазы в нестационарном режиме работы колонны; профили скоростей движения жидкой фазы в стационарном режиме работы колонны; профили скоростей движения газовой фазы в нестационарном режиме работы колонны; профили скоростей движения газовой фазы в стационарном режиме работы колонны; перепад давления в стационарном режиме работы колонны.</p> <p>Графики: Характеристика некоторых нерегулярных насадок.</p>
--	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Оценка параметров движущихся фаз в насадочной ректификационной колонне	Профессор Отделения ядерно-топливного цикла. д.т.н. Видяев Дмитрий Геннадьевич
Анализ полученных данных	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП ТПУ к.э.н. Клемашева Елена Игоревна
Социальная ответственность	Доцент ОЯТЦ ИЯТШ к.т.н Тимченко Сергей Николаевич

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	22.01.2021
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЯТЦ ИЯТШ	Видяев Д. Г.	д.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Д	Дмитриев В. В.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Д	Дмитриев Василий Витальевич

Школа	ИШЯТ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Бюджет проекта – не более 112540 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 76818 руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Районный коэффициент для города Томска равен 1,3. Тариф на промышленную электроэнергию равен 3,5 руб. кВт·час.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды- 30,2%</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Оценочная карта конкурентных технических решений SWOT-анализ</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Структура работ в рамках научного исследования. Определение трудоемкости работ и разработка графика проведения научного исследования. Бюджет научно-технического исследования</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Определение интегрального показателя эффективности, ресурсоэффективности вариантов исполнения ВКР, интегрального показателя эффективности вариантов исполнения НИР.</i>

Перечень графического материала:

Карта сегментирования рынка услуг по использованию оптимальной методики измерения; матрица SWOT-анализа; интерактивная матрица проекта; иерархическая структура работ; календарный план-график проведения научного исследования; матрица ответственности.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОСГН ШБИП ТПУ	Клемашева Елена Игоревна	канд.экон.наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Д	Дмитриев Василий Витальевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А7Д	Дмитриев Василий Витальевич

Инженерная школа	ИШЯТ	Отделение	ОЯТЦ
Уровень образования	бакалавр	Направление	14.03.02 «Ядерные физика и технологии»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p>	<p>Вредных проявлений факторов производственной среды: микроклимат, шум, вибрация, освещение, электромагнитные поля и ионизирующее излучение от ПЭВМ; опасных проявлений факторов производственной среды: электрического тока, пожарная и взрывная безопасность.</p>
<p>2. Перечень законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>Требования охраны труда при работе на ПЭВМ; электробезопасность; пожаро-взрывобезопасность.</p>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p>	<p>Действие фактора на организм человека; приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защиты).</p>
<p>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности</p>	<p>Электробезопасность (причины, средства защиты); пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Тимченко Сергей Николаевич	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А7Д	Дмитриев Василий Витальевич		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит: 80 страниц, 19 рисунков, 16 таблиц, 24 источника, 30 формул.

Ключевые слова: ректификация, ректификационная колонна, гидравлика, гидравлические характеристики, нестационарный процесс.

Объект исследования: процесс движения воды и водяного пара в ректификационной колонне.

Цель работы: исследовать гидравлические характеристики и провести моделирование потоков фаз системы вода – водяной пар в процессе их движения в насадочной ректификационной колонне для последующей оптимизации.

В процессе исследования с использованием трехмерной модели ректификационной колонны движения жидкой и газовой проведены расчеты гидравлических характеристик. Колонна представляет собой цилиндр с полостями сверху и внизу колонны, и насадкой между ними. Скорость рассчитана в нестационарном и стационарном режиме работы колонны для двух фаз, давление рассчитано в стационарном состоянии.

В результате исследований установлено, что в заданной колонне максимальная скорость движения жидкости при нестационарном режиме работы наблюдается при запуске процесса, а на 5 и 10 секундах она составляет, соответственно, $4,5 \cdot 10^{-4}$ м/с и $4,0 \cdot 10^{-4}$ м/с. Показано, что в стационарном режиме работы колонны по жидкой фазе достигается, примерно на 20 секунде и скорость движения данной фазы при этом равна $5 \cdot 10^{-4}$ м/с. Перепад давления в стационарном режиме колонны составляет $2 \cdot 10^5$ Па.

Установлено, что время достижения стационарного состояния в потоке газовой фазы меньше, чем время достижения стационарного состояния в жидкой фазе.

При расходе пара $G=0,1663 \cdot 10^{-3}$ кг/с максимальная скорость пара в стационарном режиме работы колонны составляет 0,2 м/с, при расходе $G=0,4867 \cdot 10^{-3}$ кг/с максимальная скорость пара в стационарном состоянии составляет 0,7 м/с, что соответствует литературным данным.

Область применения: полученные в ходе моделирования результаты могут быть использованы на любых разделительных производствах, в которых используются ректификационные колонны.

Оглавление

1 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКТИФИКАЦИОННОГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ИЗОТОПНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ.....	15
1.1 Процесс ректификации.....	15
1.2 Движение фаз в колонне.....	20
1.2.1 Влияние нерегулярных насадок на движение фаз.....	20
1.2.2 Изменение хода фаз регулярными насадками.....	23
1.3 Математические модели движения фаз.....	25
1.3.1 Законы движения фаз в свободной среде.....	25
1.3.2 Законы движения фаз в пористой среде.....	28
2 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....	34
2.1 Определение модели.....	34
2.2 Моделирование движения жидкой фазы в колонне.....	35
2.3 Моделирование движения газовой фазы в колонне.....	39
2.4 Анализ полученных результатов.....	44
3 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	46
3.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	46
3.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	47
3.1.2 SWOT-анализ.....	50
3.2 Планирование научно-исследовательской работы.....	52
3.2.1 Иерархическая структура работ проекта.....	52
3.2.2 Контрольные события проекта.....	52
3.2.3 План проекта.....	53
3.3 Бюджет научного исследования.....	56
3.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы.....	57
3.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды.....	60
3.3.4 Накладные расходы.....	60
3.3.5 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта.....	61

3.4	Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта	62
3.5	Выводы по разделу «Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение».....	64
4	СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	66
4.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов	66
4.2	Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ	68
4.2.1	Организационные мероприятия	68
4.2.2	Технические мероприятия.....	68
4.2.3	Условия безопасной работы	71
4.3	Электробезопасность	73
4.4	Пожарная и взрывная безопасность	74
4.5	Выводы по разделу «Социальная ответственность»	76
	Выводы	77
	Список используемых источников.....	78

Введение

Ректификация – процесс тепломассообмена между жидкой и газовой фазой, происходящий в специальном устройстве, называемом ректификационной колонной. Ректификация широко используется для разделения нерадиоактивных изотопных смесей и позволяет получать вещества заданного обогащения, применяемые в различных отраслях: металлургии, медицине, в нефтяной и атомной промышленности.

В обменных ректификационных колоннах реализуется противоток фаз, при котором снизу вверх движется газовая фаза, а сверху вниз – жидкая. В процессе движения и взаимодействия фаз происходит насыщение газовой фазы легколетучими компонентами, а жидкая фаза – труднолетучими. Многократный обмен позволяет получать вещества с нужной изотопной концентрацией.

Так как эффективность процесса разделения напрямую зависит от площади взаимодействия фаз, то в колоннах для увеличения площади контакта фаз используются специальные устройства: насадки, тарелки и т.д.

Ректификация – это энерго- и наукоемкий процесс, требующий постоянной регулировки. Проведение оптимизации на натуральных объектах связано с высокими материальными и временными затратами, поэтому актуальным является использование для этой цели компьютерного моделирования происходящих в колонне процессов. Представляемая работа является частью данных исследований и связана с описанием ректификационного процесса получения тяжелой воды.

Цель данной работы – исследовать гидравлические характеристики и провести моделирование потоков фаз системы вода – водяной пар в процессе их движения в насадочной ректификационной колонне для последующей оптимизации.

Для выполнения поставленной цели требовалось решить следующие задачи:

- изучить устройство ректификационной колонны;

– выделить основные гидравлические параметры, влияющие на характер потока фаз, и

– выполнить моделирование движения фаз в ректификационной насадочной колонне для системы вода–пар и провести анализ полученных результатов.

1 Использование ректификационного процесса для изотопного разделения

1.1 Процесс ректификации

Ректификация - наиболее распространенный метод разделения в химической промышленности. Процесс осуществляется, как показано на рис. 1.1, жидкая смесь двух или более компонентов подается в высокую цилиндрическую колонну где-то около середины. В нижней части емкости колонны у ее основания находится источник тепла, называемый нагревателем. Жидкость из потока питания стекает по колонне, нагревается и частично испаряется благодаря нагревателю [1]. Обычно часть жидкости в нагревателе непрерывно удаляется в виде кубового продукта. Пар, образующийся в нагревателе, поднимается вверх по направлению к верху колонны, где он конденсируется в резервуаре или секции колонны с внешним охлаждением, называемой конденсатором. Некоторая часть конденсированной жидкости в конденсаторе обычно удаляется в виде верхнего дистиллята. Остаток сконденсированной жидкости отправляется обратно в колонну в виде флегмы. При добавлении тепла снизу и отвода сверху температура снижается снизу-вверх в колонне, работающей при почти постоянном давлении.

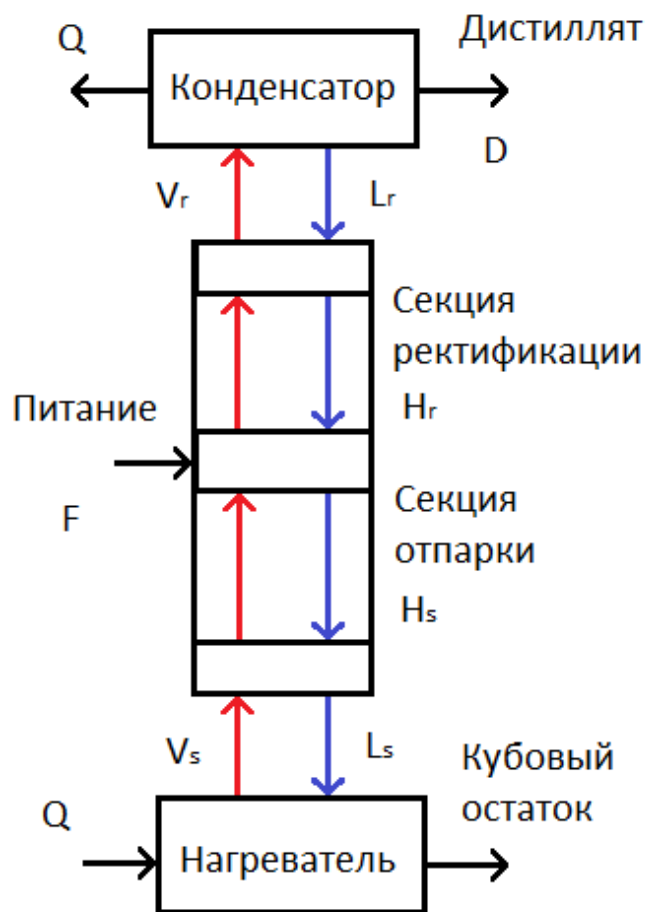


Рис. 1.1 - Модель ректификационной колонны

Процесс разделения внутри колонны регулируется разницей в склонности к испарению или летучести двух веществ. Как правило, вещества с более низкой температурой кипения легче испаряются и концентрируются в паровой фазе. Когда жидкость, текущая по колонне, контактирует с паром, поднимающимся вверх, происходит массообмен между фазами, поскольку каждый компонент стремится достичь химического равновесия [2]. Условие равновесия диктует относительные количества или состав каждого вида, которые будут в каждой фазе в равновесии при определенной температуре и давлении. Паровая фаза будет иметь более высокий состав более летучих веществ в каждой точке колонны. Когда паровая фаза поднимается вверх по колонне, равновесный состав смещается (с понижением температуры), чтобы довести паровую фазу до чистоты в более летучем компоненте. Точно так же жидкая фаза, текущая по колонне, приближается к чистоте менее летучего компонента [3].

Внутри колонна будет иметь один из двух типов внутренних устройств, предназначенных для обеспечения тесного контакта между паровой и жидкой фазами и облегчения их приближения к равновесию. Колонна будет либо содержать регулярную насадку, либо будет заполнена нерегулярной насадкой. Ступенчатая колонна состоит из ряда горизонтальных тарелок или тарелок, через которые протекает жидкость, а через нее проходят пузырьки пара. В идеализированной колонне жидкость, стекающая вниз после пересечения стадии, будет находиться в равновесии с паром, поднимающимся вверх из этой стадии. Насадочная колонна с нерегулярной насадкой будет содержать одну или несколько секций случайного или структурированного набивочного материала из металла, керамики или пластика специальной формы [1, 4]. Пустоты внутри и между частицами насадки обеспечивают высокий расход жидкости при ограниченном падении давления. В идеале насадка смачивается тонкой пленкой жидкости с паром, протекающим через жидкую пленку с большой площадью поверхности, чтобы способствовать массопереносу между фазами.

На практике химическое равновесие не будет достигнуто из-за ограничений массопереноса, а при конечной высоте колонны дистиллят и кубовые продукты не будут полностью чистыми. Больше ступеней или большая высота насадки в колонне обеспечат продукты более высокой чистоты, но для этого потребуется более высокая и дорогая колонна [5].

Как и практически во всех химических процессах, анализ и проектирование дистилляционной колонны требует сочетания массовых балансов, энергетических балансов, соотношений равновесия и уравнений скорости. В этом примере рассматривается бинарная дистилляция с насыщенным жидким сырьем в насадочной колонне и используются два общих упрощающих допущения:

- Молярные теплоты испарения исходных материалов равны
- Потери тепла из колонны и другие тепловые эффекты, такие как теплота раствора, незначительны

Эти допущения позволяют моделировать процесс без учета тепловых эффектов или энергетических балансов. Они также предписывают, чтобы молярные скорости потока жидкости и пара были постоянными в каждой секции колонны, в так называемой секции отпарки под нагрузкой и в так называемой секции ректификации над местом подачи. То есть на каждый моль жидкости, испарившейся внутри колонны, конденсируется моль пара. Это предположение известно, как постоянное молярное переполнение и на практике не так нереально, как может показаться [1].

Учет насыщенного жидкого сырья означает, что все сырье присоединяется к жидкости в секции отпарки таким образом, что:

$$L_s = L_r + F, \quad (1.1.1)$$

где L_s - расход жидкости из секции отпарки в нагреватель;

L_r - расход жидкости из конденсатора в секцию ректификации;

F - расход потока питания.

Рассматриваемая здесь задача конструкции колонны состоит в том, чтобы определить высоту насадки и место подачи, необходимые для разделения сырья с известным расходом и составом на дистиллятный и нижний потоки определенной чистоты. Дополнительные параметры процесса, которые необходимо указать, включают скорость вскипания или молярную скорость потока пара в колонне и общий коэффициент массопереноса в газовой фазе, K_{Ga} . На практике скорость вскипания будет зависеть от количества тепла, подаваемого в ребойлер. Так скорость вскипания опишем как:

$$V_s = V_r. \quad (1.1.2)$$

То есть расход пара из нагревателя в секцию отпарки равен расходу пара в конденсатор.

Общий и массовый баланс компонентов позволяет нам рассчитать молярные скорости потока наших кубовых остатков B и дистиллята D , решив два уравнения с двумя неизвестными:

$$F = B + D. \quad (1.1.3)$$

$$x_f F = x_b B + x_d D, \quad (1.1.4)$$

где x_f - мольная доля более летучих веществ в потоке питания;

x_b - мольная доля более летучих веществ в потоке кубового остатка;

x_d - мольная доля более летучих веществ в потоке дистиллята.

Внутренние потоки жидкости можно найти из выражения:

$$L_r = V_r - D. \quad (1.1.5)$$

Пренебрегая любыми изменениями в радиальном направлении, мы моделируем дистилляционную колонну в одном измерении, используя два отрезка линии. Один сегмент длины H_s представляет секцию очистки, а другой сегмент длины H_r представляет секцию ректификации. Цель модели - определить значения H_s и H_r , которые обеспечивают указанные кубовые остатки и составы дистиллятов. Мы предполагаем значения H_s и $H = H_s + H_r$, решаем составы в паровой и жидкой фазах в каждой точке колонны и повторяем, пока составы на выходе не будут соответствовать нужным значениям.

Скорость источника определяется как:

$$R_l = K_{ya}(y_{e1} - y_l)M_l, \quad (1.1.6)$$

где K_{ya} - общий коэффициент массопереноса в газовой фазе $\frac{\text{моль}}{(\text{м}^3 \times \text{с})}$;

y_{e1} - мольная доля более летучих частиц, которая могла бы быть достигнута при равновесии;

M_l - молярная масса более летучих частиц.

Выражение показывает скорость массопереноса более летучих частиц из жидкой фазы в паровую. Подобное выражение с противоположным знаком описывает одновременный массоперенос менее летучего компонента в соответствии с нашим предположением о постоянном молярном переполнении. Значение y_{e1} в каждой точке определяется с помощью узла расчета равновесия. Коэффициент массопереноса будет зависеть от свойств жидкости и насадки, а также от скоростей жидкости в различных частях колонны и может изменяться по высоте колонны. Различные значения K_{ya} можно найти в литературе.

Молярные потоки жидкости и пара в колонне учитываются путем определения скорости в каждой фазе. В этой модели с сосредоточенными параметрами, основанной на общем коэффициенте массопереноса в газовой фазе, используем эквивалентную скорость газовой фазы для жидкой фазы. По сути, это форма масштабирования скорости жидкой фазы, чтобы она была того же порядка величины, что и скорость газовой фазы [6]. Чтобы преобразовать молярный расход, например, L_r , в скорость, uL_r , предполагаем диаметр колонны, определяем площадь поперечного сечения A и предполагаем молярный объем идеального газа при стандартных условиях для обеих фаз:

$$uL_r = \frac{L_r \times 0.022414}{A}. \quad (1.1.7)$$

Указываем массовую долю кубовых остатков в паровой фазе и массовую долю сырья и дистиллята в жидкой фазе. N_s и N изменяются путем предположений и проверок или с использованием развертки параметров до тех пор, пока не будет найдено решение, в котором состав кубовых остатков жидкой фазы равен указанному для паровой фазы, а состав дистиллята паровой фазы равен указанному для жидкой фазы.

1.2 Движение фаз в колонне

1.2.1 Влияние нерегулярных насадок на движение фаз

Колонны различаются главным образом по виду заполняющей корпус насадки. Насадки, различающиеся, в свою очередь, формой и размером элементов, изготавливают из металла (лист, сетка, проволока), силикатных (керамика, кварц) или полимерных материалов. Геометрические свойства и массу насадок характеризуют следующими величинами: масса единицы объема (насыпная масса) γ , кг/м³; доля свободного объема (пористость) $V_{св}$, м³/м³; удельная поверхность a , м²/м³ - суммарная геометрическая поверхность всех

элементов, заполняющих единицу объема. Первые две из указанных величин связаны соотношением:

$$V_{св} = 1 - \gamma/\rho_n, \quad (1.2.1)$$

где ρ_n - плотность материала насадки.

Будем различать промышленные насадки с размером элемента 10×10 мм и более, применяемые в массообменных колоннах, рассчитанных на большие потоки, и мелкие или высокоэффективные насадки с размером элемента менее 10 мм (чаще всего от 1,5 - 2 до 5 - 6 мм).

При производстве большинства изотопов легких элементов требуется высокая эффективность разделения. Этим требованиям в наибольшей мере отвечают насадочные колонны, заполненные нерегулярной мелкой насадкой. В качестве последней используются элементы различной формы, размером от 1,5 - 2 до 6 - 8 мм, изготавливаемые из металлической проволоки или сетки, стекла или кварца, полимерных материалов (капрон, полихлорвинил, полиолефины, фторопласт). Такие насадки обладают развитой поверхностью (от 1000 до 3500 м²/м³) и капиллярными свойствами, способствующими более полному использованию последней. В узких извилистых каналах слоя насадки создаются условия для турбулизации газовой фазы [5].

Наибольшее применение в нашей стране получили спирально-призматическая насадка и насадка в виде цилиндрических колец (колец Рашига). Кольца Рашига обычно делают из полихлорвинила, фарфора, никеля или других механически и химически стойких материалов. Общий вид колец Рашига изображен на рис. 1.2. Для обозначения размеров колец Рашига используются: D - внешний диаметр; h - высота кольца; δ - толщина стенки. Запись ведется следующим образом D×h× δ (см. таблицу 1.1, где приведены примерные размеры используемых колец Рашига).

Спирально-призматическая насадка (насадка Левина), представляющая собой отрезки проволочной спирали, навиваемой на трехгранный конус [5]. Отрезки включают несколько витков с таким расчетом, чтобы длина элемента

была близка к его диаметру.

В МХТИ разработана спирально-призматическая полимерная насадка (рис. 1.3), изготавливаемая из капроновой нити диаметром 0,2 - 0,22 мм.

Характеристика мелких нерегулярных насадок приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристика мелких эффективных насадок

Наименование	Материал	Размер элемента, мм	Доля свободного объема	Удельная поверхность, м ² /м ³	Насыпная масса, кг/м ³
Кольца Рашига	Фарфор	5,2×5,4×1,3	0,64	896	1060
	Кварц	4,1×5,2×0,6	0,65	1380	780
	Стекло	6,2×6,2×0,6	0,77	850	560
	Полихлорвинил	5×5×0,5	0,74	1150	350
Одиночные витки*	Стекло	4,0×0,5	0,74	1645	610
	Кварц	5,8×1,6	0,72	760	500
	Сталь	4,0×0,5	0,82	1440	1370
Двухвитковые спирали	Кварц	5,6×4,4×1,5	0,72	760	500
Спирально-призматические насадки	Проволока никелевая	3×3×0,5	0,85	2640	720
	Проволока из нержавеющей стали	2×2×0,2	0,82	3500	1400

* В графе "размер элемента" указан диаметр спирали и нити.



Рис. 1.2 – Кольцо Рашига

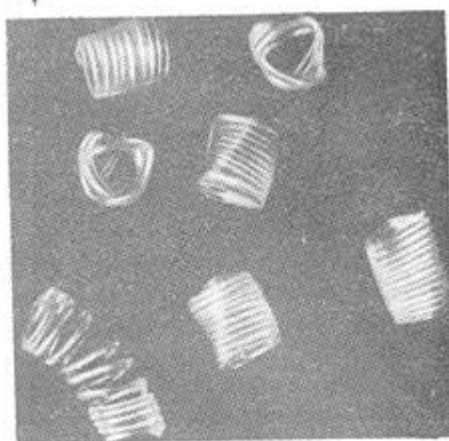


Рис. 1.3 – Капроновая спирально-призматическая насадка

1.2.2 Изменение хода фаз регулярными насадками

Регулярные насадки в отличие от нерегулярных представляют собой упорядоченную структуру пластин или сеток, но структура обеспечивает прохождение жидкой и газовой фазы сложных путей внутри колонны, это позволяет достичь большой площади поверхности контакта между фазами. Чаще всего регулярные насадки выполняются из тонких гофрированных пластин.

Набивка регулярной насадкой выполняется в виде гофрированных листов из металла, пластика или проволоки. Такая структура представляет собой открытые соты с каналами, в которых протекает фаза, расположенными под углом, что и обеспечивает большую площадь взаимодействия фаз. Насадки укладываются таким образом, чтобы иметь максимально улучшенную поверхность для протекания по ним жидкой фазы, однако такая структура имеет низкое сопротивление по отношению к потокам газовой фазы. Регулярные насадки очень эффективны при разделении вещества при низком давлении в колонне и малому потоку орошения.

Одним из самых важных поколений в регулярных насадках является третье, оно появилось, когда компания Sulzer в конце 70-х годов представила свои регулярные насадки. Они имеют высокую производительность, низкую стоимость, имеют большую емкость и малую чувствительность к твердым частицам. В следующем десятилетии популярность этих насадок резко возросла, особенно на тех ректификационных колоннах, где проводился капитальный ремонт со сменой оборудования. Такие отличительные свойства насадка имела из-за того, что используемые в производстве металлические листы были обработаны химическим и механическим способом, что повышала их смачиваемость фазой. Следовательно, увеличивалась площадь контакта фаз, что повышало разделительные характеристики.

Далее в середине 90-х была разработана улучшенная геометрия насадок, а к концу десятилетия вычислительные мощности позволили проводить моделирование различных структур, что позволило также улучшить существующие насадки, имеющие меньшие перепады давления и увеличивающие разделительные характеристики.

Структурированная набивка производится в широком диапазоне размеров за счет изменения высоты обжима. Поверхность упаковки колеблется от $50 \text{ м}^2/\text{м}^3$ (самая низкая эффективность, максимальная производительность) до $750 \text{ м}^2/\text{м}^3$ (максимальная эффективность, самая низкая производительность).

Типичные области применения включают вакуумные и атмосферные фракционаторы сырой нефти. Разделение моно-, ди- и триэтаноламина, проводимое в вакууме, также может использовать структурированную насадку из-за ее относительно низкого перепада давления. При фракционировании таллового масла, процессе отделения жирных кислот от смоляных кислот и пека, получаемого в качестве побочного продукта крафт-процесса производства древесной массы, также используется структурированная насадка [5, 7].

На рис. 1.4 представлено несколько видов регулярных насадок.

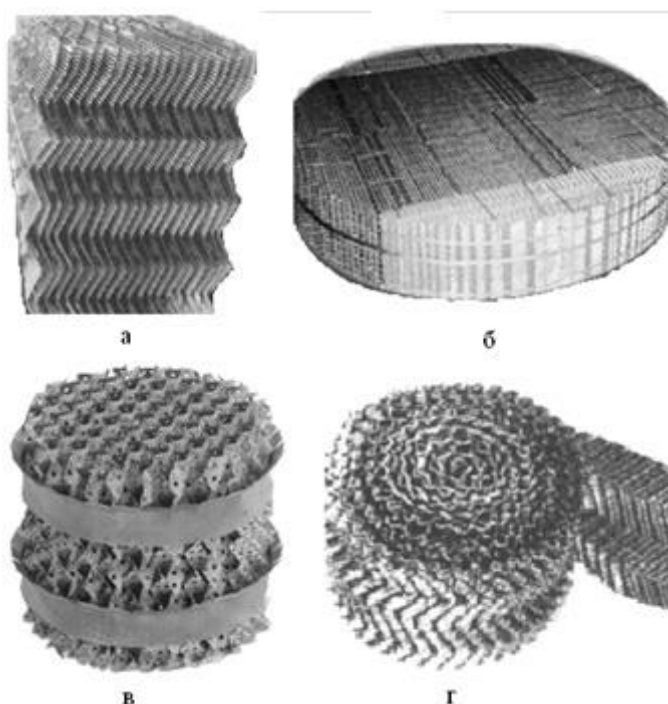


Рис. 1.4 – Регулярные насадки.

а – Вакупак; б – «Кедр»; в – Меллапак 250; г – насадка Гудлоу

1.3 Математические модели движения фаз

1.3.1 Законы движения фаз в свободной среде

Уравнения Навье–Стокса собой набор дифференциальных уравнений в частных производных, которые описывают движение жидкостей. Их можно

рассматривать, как второй закон Ньютона для жидкостей. В случае сжимаемой ньютоновской уравнение Навье-Стокса можно записать как:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) + \mathbf{F} \quad (1.3.1)$$

где \mathbf{u} – вектор скорости жидкости [м/с];

p – давление жидкости [Па];

ρ – плотность жидкости [кг/м³];

μ – динамическая вязкость жидкости [кг/(м·с)];

\mathbf{F} – вектор внешних сил [Н].

Уравнения Навье-Стокса всегда решаются вместе с уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1.3.2)$$

Уравнения Навье-Стокса представляют собой сохранение количества движения, а уравнение неразрывности представляет собой сохранение массы.

Эти уравнения лежат в основе моделирования потока жидкости. Их решение для определенного набора граничных условий (таких как входы, выходы и стенки) предсказывает скорость жидкости и ее давление в заданной геометрии [8]. Из-за своей сложности эти уравнения допускают лишь ограниченное число аналитических решений. Например, относительно легко решить эти уравнения для потока между двумя параллельными пластинами или для потока в круглой трубе. Однако для более сложной геометрии уравнения необходимо решать численно.

В зависимости от интересующего режима потока часто можно упростить эти уравнения. В других случаях могут потребоваться дополнительные уравнения. В области гидродинамики различные режимы потока классифицируются с использованием безразмерного числа, такого как число Рейнольдса и число Маха [9].

Когда число Маха очень низкое, можно предположить, что поток несжимаемый. Часто это хорошее приближение для жидкостей, которые намного менее сжимаемы, чем газы. В этом случае плотность считается постоянной и

уравнение неразрывности сводится $k\nabla \cdot u = 0$. Пример ползучего потока, показывающий воду, текущую с низкой скоростью через пористую среду, является хорошим примером несжимаемого потока.

В некоторых случаях скорость потока достаточно велика, чтобы вносить значительные изменения в плотность и температуру жидкости. Этими изменениями можно пренебречь при $M < 0,3$. Однако при $M > 0,3$ связь между полем скорости, давления и температуры становится настолько сильной, что уравнения неразрывности и неразрывности необходимо решать вместе с уравнением энергии (уравнение теплопередачи в жидкостях) [10]. Уравнение энергии предсказывает температуру жидкости, которая необходима для расчета свойств материала, зависящих от температуры.

Уравнения Эйлера представляют собой набор квазилинейных гиперболических уравнений, управляющих адиабатическим и невязким потоком. Уравнения представляют собой уравнения Коши с сохранением массы и баланса импульса и энергии, и их можно рассматривать как частные уравнения Навье–Стокса с нулевой вязкостью и нулевой теплопроводностью. Фактически, уравнения Эйлера могут быть получены путем линеаризации некоторых более точных уравнений неразрывности, таких как уравнения Навье–Стокса в локальном состоянии равновесия. Уравнения Эйлера могут применяться к несжимаемому и сжимаемому потокам - при условии, что скорость потока является соленоидальным полем, или с использованием другого подходящего уравнения энергии соответственно.

С математической точки зрения уравнения Эйлера представляют собой особенно гиперболические уравнения сохранения в случае отсутствия внешнего поля. Фактически, как и любое уравнение Коши, уравнения Эйлера, первоначально сформулированные в конвективной форме (также называемой «лагранжевой формой»), также могут быть помещены в «форму сохранения» (также называемую «формой Эйлера»). Форма сохранения подчеркивает математическую интерпретацию уравнений как уравнений сохранения через контрольный объем, закрепленный в пространстве, и является наиболее важной

для этих уравнений также с числовой точки зрения. Конвективная форма подчеркивает изменения состояния в системе отсчета, движущейся вместе с жидкостью.

Для идеальной жидкости в поле тяжести уравнение Эйлера можно записать как:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\nabla \mathbf{u})\mathbf{u} = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (1.3.3)$$

где \mathbf{u} – вектор скорости жидкости [м/с];

p – давление жидкости [Па];

ρ – плотность жидкости [кг/м³].

1.3.2 Законы движения фаз в пористой среде

Взаимодействие жидкости и какого-либо тела - это мультифизическая связь между законами, описывающими гидродинамику и механику. Это явление характеризуется взаимодействием, которое может быть стабильным или нестабильным, между деформируемой или движущейся структурой и окружающим или внутренним потоком жидкости.

Когда поток жидкости встречает тело, на твердый объект действуют напряжения - силы, которые могут привести к деформациям. Эти деформации могут быть довольно большими или очень маленькими, в зависимости от давления и скорости потока, а также свойств материала реальной конструкции.

Для решения задач переноса массы различных фаз необходимо понимание взаимодействия фазы с порами, для этого вводится понятие пороупругости. Пороупругость - это термин, используемый для описания взаимодействия между потоком жидкости и деформацией твердых тел в пористой среде. Как указывает их название, пористые материалы представляют собой твердые структуры, состоящие из пор или пустот. Этот тип материала обычно ассоциируется с природными объектами, такими как камни и твердые тела, а также с биологическими тканями, пеной, керамикой и бумажными изделиями.

Когда к пористой среде прилагается внешняя нагрузка, это влияет на объемную долю пор. Поры, заполненные жидкостью, испытывают изменение давления под действием этого механического напряжения, что, в свою очередь, приводит к движению жидкости. В ответ на это изменение объема пор твердый материал упруго смещается и деформируется.

Моделирование пороупругости требует сочетания двух законов. Первым из них является закон Дарси, который описывает связь между движением жидкости и давлением в пористой среде. Согласно этому закону, скорость жидкости прямо пропорциональна разнице давлений на заданном расстоянии, вязкости жидкости и способности пористого материала препятствовать потоку. Второй закон - структурное смещение пористой матрицы.

В пористой среде глобальный перенос количества движения за счет касательных напряжений в жидкости часто незначителен, поскольку стенки пор препятствуют переносу количества движения к жидкости за пределами отдельных пор [11]. Подробное описание, вплоть до разрешения каждой поры, нецелесообразно в большинстве приложений. Распространенным альтернативным подходом является гомогенизация пористой и текучей среды в единую среду. **Закон Дарси** вместе с уравнением неразрывности и уравнением состояния порового флюида (или газа) обеспечивает полную математическую модель, подходящую для широкого круга приложений, включающих потоки пористой среды, для которых градиент давления является основной движущей силой.

Закон Дарси описывает движение жидкости через пустоты в пористой среде. Поскольку жидкость теряет значительную энергию на сопротивление трению внутри пор, скорости потока в пористой среде очень низкие. Интерфейс закона Дарси может быть применен к мелкомасштабным задачам в химической инженерии, а также к крупномасштабным геофизическим или гидрологическим задачам, таким как движение воды в водоносном горизонте или берегу ручья, миграция нефти в скважину и даже подъем магмы сквозь землю [12]. Также

возможно моделирование нескольких потоков для моделирования многофазных потоков, включающих более одной подвижной фазы.

Закон Дарси описывает течение в пористой среде, вызываемое градиентами в поле гидравлического потенциала, которое имеет единицы давления [13]. Для многих приложений удобно представлять полный гидравлический потенциал или компоненты давления и гравитации с эквивалентными высотами жидкости или напора. Разделение потенциала на вес жидкости может упростить моделирование, поскольку единицы длины упрощают сравнение со многими физическими данными. Рассмотрим, например, уровни жидкости в скважинах, высоту потока, топографию и скорости. Физический интерфейс также поддерживает задание граничных условий и оценку результатов с использованием гидравлического напора и напора. В физическом интерфейсе давление всегда является зависимой переменной.

Закон Дарси гласит, что поле скорости определяется градиентом давления, вязкостью жидкости и структурой пористой среды:

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p \quad (1.3.4)$$

где u – вектор скорости жидкости [м/с];

p – давление жидкости [Па];

μ – динамическая вязкость жидкости [кг/(м·с)];

κ – проницаемость пористой среды [м²].

Если объединить закон Дарси с уравнением неразрывности можно получить выражение:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_m, \quad (1.3.5)$$

где ρ – плотность жидкости [кг/м³],

ε_p – пористость,

Q_m – источник или поглотитель массы [кг/(м³·с)].

Пористость определяется как доля контрольного объема, занимаемая порами. Таким образом, пористость может изменяться от нуля для чистых твердых областей до единицы для областей свободного течения [14].

Для крупномасштабных приложений может потребоваться учет гравитационных эффектов. Затем закон Дарси применяется, когда градиент гидравлического потенциала управляет движением жидкости в пористой среде. Тогда закон Дарси имеет вид:

$$\mathbf{u} = -\frac{\kappa}{\mu}(\nabla p - \rho \mathbf{g}) \quad (1.3.6)$$

где g – ускорение свободного падения [м/с^2].

Уравнения Бринкмана описывают быстро движущиеся жидкости в пористой среде с кинетическим потенциалом, определяемым скоростью жидкости, давлением и гравитацией, чтобы управлять потоком. Эти уравнения расширяют закон Дарси, чтобы описать диссипацию кинетической энергии за счет вязкого сдвига, как с уравнениями Навье-Стокса. Следовательно, этот физический интерфейс хорошо подходит для переходов между медленным течением в пористой среде, подчиняющимся закону Дарси, и быстрым течением в каналах, описываемым уравнениями Навье-Стокса [15]. Интересные применения сочетания Бринкмана и Навье-Стокса включают моделирование гипорейной зоны возле реки, потока нефти через пласт к перфорации скважины и неньютоновских потоков.

В пористых областях переменные потока и свойства жидкости определяются в любой точке внутри среды посредством усреднения фактических переменных и свойств по определенному объему, окружающему точку. Этот контрольный объем должен быть небольшим по сравнению с типичными макроскопическими размерами задачи, но он должен быть достаточно большим, чтобы содержать много пор и твердых матричных элементов.

Пористость определяется как доля контрольного объема, занимаемая порами. Таким образом, пористость может изменяться от нуля для чистых твердых областей до единицы для областей свободного течения.

Физические свойства жидкости, такие как плотность и вязкость, определяются как средние собственные объемы, которые соответствуют

единице объема пор. Определенные таким образом, они представляют соответствующие физические параметры, которые могут быть измерены экспериментально, и предполагается, что они являются непрерывными с соответствующими параметрами в соседнем свободном потоке [15].

Скорость потока определяется как среднее поверхностное значение объема и соответствует единице объема среды, включающей как поры, так и матрицу. Иногда ее называют скоростью Дарси, определяемой как объемный расход на единицу поперечного сечения среды. Такое определение делает поле скорости непрерывным на границах между пористыми областями и областями свободного потока.

Зависимыми переменными в уравнениях Бринкмана являются скорость Дарси и давление. Течение в пористой среде определяется комбинацией уравнения неразрывности и уравнения количества движения, которые вместе образуют уравнения Бринкмана:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_p \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_m, \quad (1.3.7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{\varepsilon_p} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{u}}{\varepsilon_p} \right) = \\ = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\frac{1}{\varepsilon_p} \left\{ \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} \right] - \left(\kappa^{-1} \mu + \frac{Q_m}{\varepsilon_p^2} \right) \mathbf{u} + \mathbf{F}, \quad (1.3.8) \end{aligned}$$

где μ – динамическая вязкость жидкости [кг/(м·с)],

\mathbf{u} – вектор скорости [м/с],

ρ – плотность жидкости [кг/м³],

p – давление [Па],

ε_p – пористость,

κ – проницаемость пористой среды [м²],

Q_m – источник или поглотитель массы [кг/(м³·с)].

Для моделирования потока в пористой и свободной среде уравнения Навье-Стокса для описания потока в открытых областях и уравнения Бринкмана для описания потока в пористых областях.

Для одних и тех же полей u и p решаются как в областях свободного течения, так и в пористых областях. Это означает, что давление в свободной жидкости и давление в порах непрерывно на границе раздела между областью свободного течения и пористой областью. Это также означает, что обеспечивается непрерывность между скоростью жидкости в свободном потоке и скоростью Дарси в пористой области [16].

Непрерывность в u и p подразумевает разрыв напряжения на границе раздела между областью свободного течения и пористой областью. Разница соответствует напряжению, поглощаемому жесткой пористой матрицей, что является следствием неявных формулировок уравнений Навье-Стокса и Бринкмана.

2 Практическая часть

2.1 Определение модели

Для расчета используется программа Comsol Multiphysics, предоставляющая множество решений для моделирования различных физических процессов, конкретно в этой работе рассматривается интерфейс моделирования пористых сред.

В качестве модели используется колонна высотой $h=2,2$ м, внутренний диаметр колонны $d_{col}=4,8$ см. От 0 м до 0,1 м высоты колонна пуста, от 0,1 м до 2,1 м колонна заполнена спирально призматической насадкой из нержавеющей стали с пористостью $\varepsilon=0,82$, от 2,1 м до 2,2 м высоты колона пуста. На рис. 2.1 представлена модель колонны.

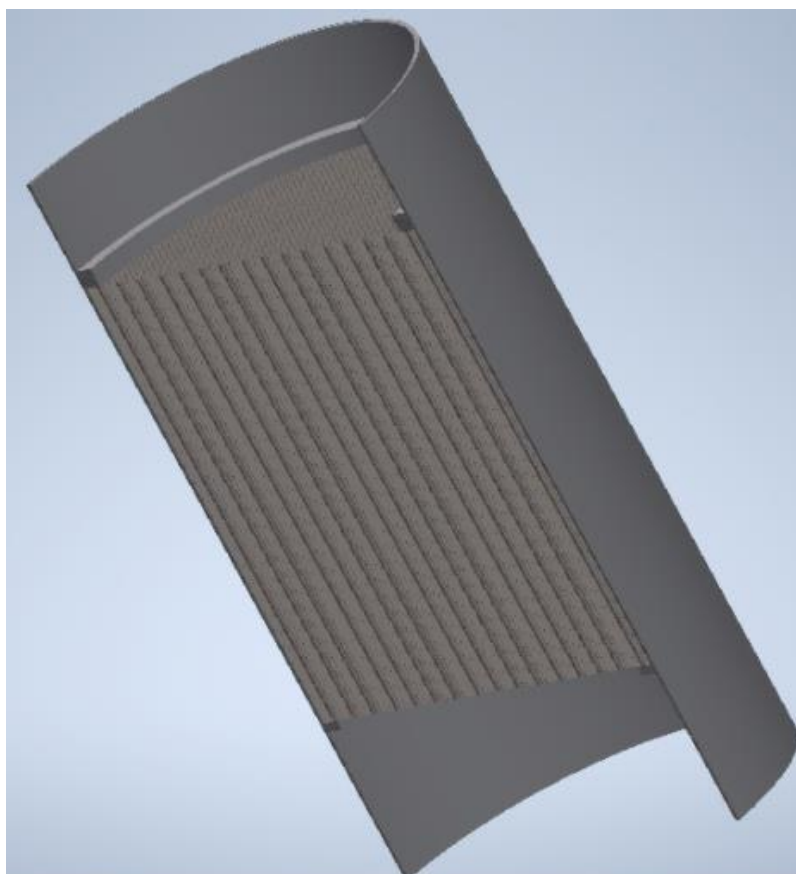


Рис. 2.1 - Модель колонны

Изначально будет произведено моделирование воды в виде жидкой фазы, стекающей вниз по колонне, затем моделирование водяного пара, движущегося вверх по колонне.

Давление в колонне $p=100000$ Па, температура $T=393$ К.

2.2 Моделирование движения жидкой фазы в колонне

Расход воды в колонне составляет $L=0,0291$ моль/с.

Исследуя данный процесс рассмотрим движение потока как в стационарном, так и в не стационарном режиме.

Рассмотрим скорость фазы сверху и снизу колонны, в местах границ пустого пространства и пористой структуры.

На рис. 2.2 изображены профили скоростей движения жидкой фазы на верхней и нижней части колонны на 5 секунде после старта процесса.

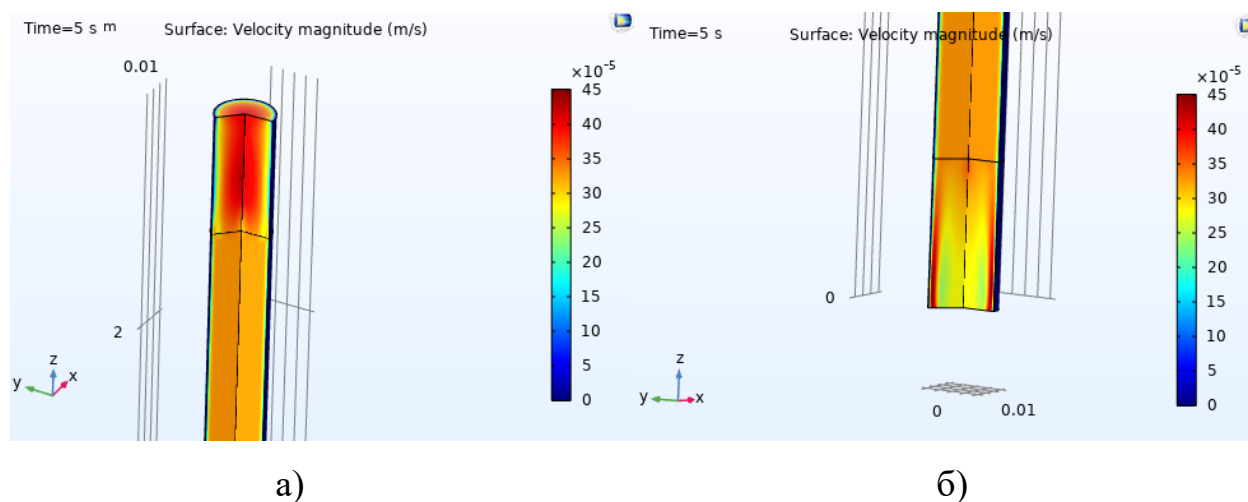


Рис. 2.2 - Профили скоростей движения жидкой фазы на 5 секунде после старта процесса: а) верхняя часть колонны, б) нижняя часть колонны

Из рис. 2.2 видно, что через 5 секунд после начала моделирования в зонах, где отсутствует насадка наблюдаются большие скорости, чем в зонах, где насадка присутствует. Так наибольшая скорость $4,5 \cdot 10^{-4}$ м/с фазы в верхней части колонны больше максимальной скорости $3,0 \cdot 10^{-4}$ в насадочном слое в 1,5

раза. На рис. 2.2б максимальные скорости распределяются несколько иначе, максимальные скорости наблюдаются по бокам колонны.

На рис. 2.3 изображены профили скоростей движения жидкой фазы на верхней и нижней части колонны на 10 секунде после старта процесса.

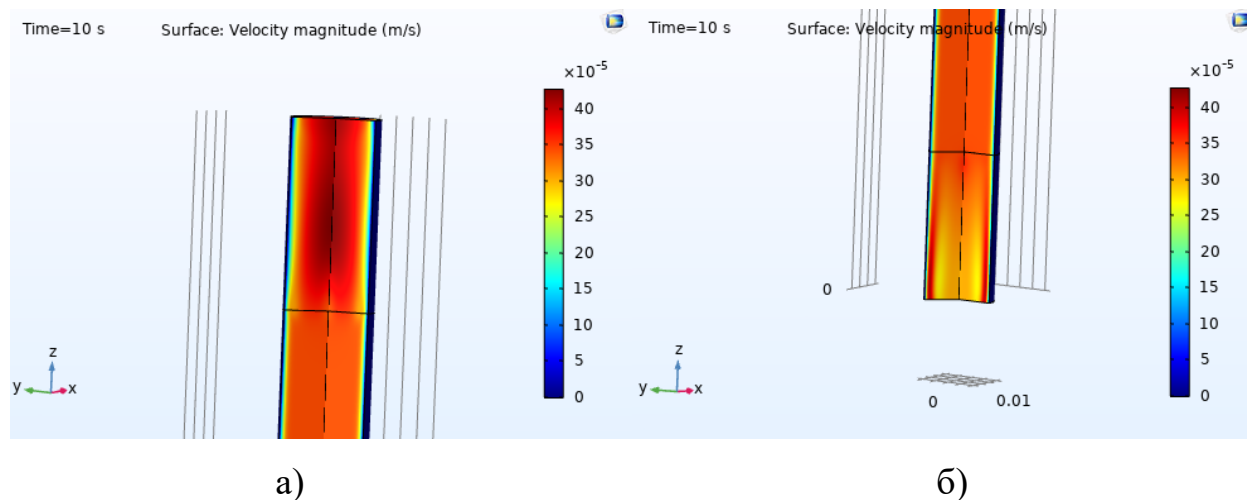


Рис. 2.3 - Профили скоростей движения жидкой фазы на 10 секунде после старта процесса: а) верхняя часть колонны, б) нижняя часть колонны

Из рис. 2.3 видно, что через 10 секунд после начала моделирования в зонах, где отсутствует насадка скорость ниже, чем в верхней части колонны. В верхней части колонны скорость составляет $4,0 \cdot 10^{-4}$ м/с, в части, где присутствует насадка скорость составляет $3,5 \cdot 10^{-4}$ м/с. Скорость в верхней части больше скорости в насадочной части в 1,14 раз. В нижней части колонны, как и в случае 5 секунд после начала максимальные скорости наблюдаются по бокам колонны, но зона с высокими скоростями расширяется, то есть наблюдается более равномерное распределение скоростей.

На рис. 2.4 изображены профили скоростей движения жидкой фазы на верхней и нижней части колонны на 15 секунде после старта процесса.

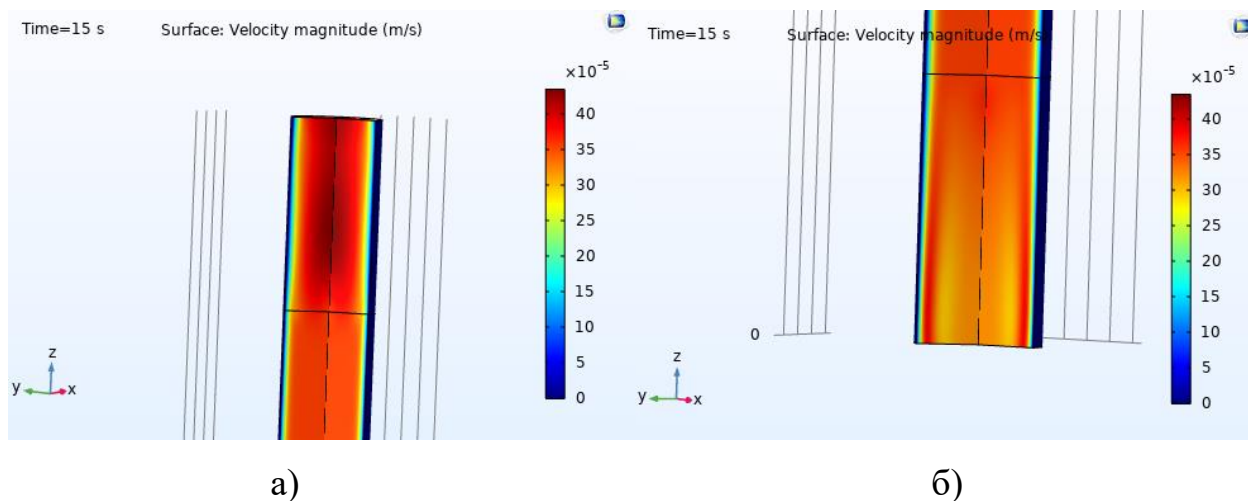


Рис. 2.4 - Профили скоростей движения жидкой фазы на 15 секунде после старта процесса: а) верхняя часть колонны, б) нижняя часть колонны

Из рис. 2.4 видно, что через 15 секунд после начала моделирования система еще больше равномерно перераспределяется, то есть изменения в скоростях в разных частях колонны останавливаются.

На рис. 2.5 изображены профили скоростей после выхода системы на стационарное состояние.

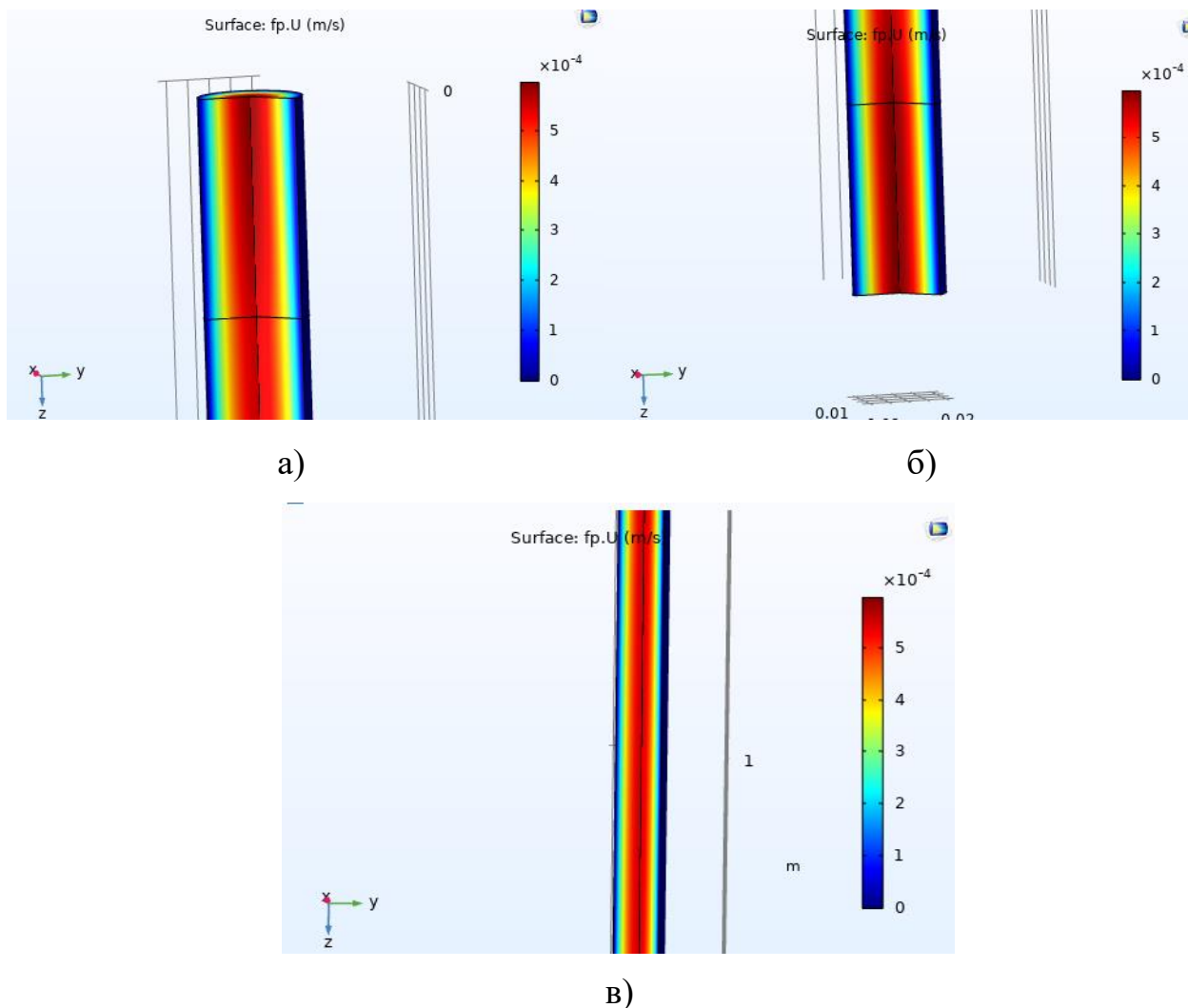


Рис. 2.5 - Профили скоростей движения жидкой фазы после выхода на стационарное состояние: а) верхняя часть колонны, б) нижняя часть колонны, в) средняя часть колонны

Из рис. 2.5 видно, что по всей колонне по оси Z установилась примерно одинаковая скорость, максимальная скорость в центре составляет $5 \cdot 10^{-4}$ м/с.

На рис. 2.6 представлен профиль распределения давления после установления стационарного состояния в колонне.

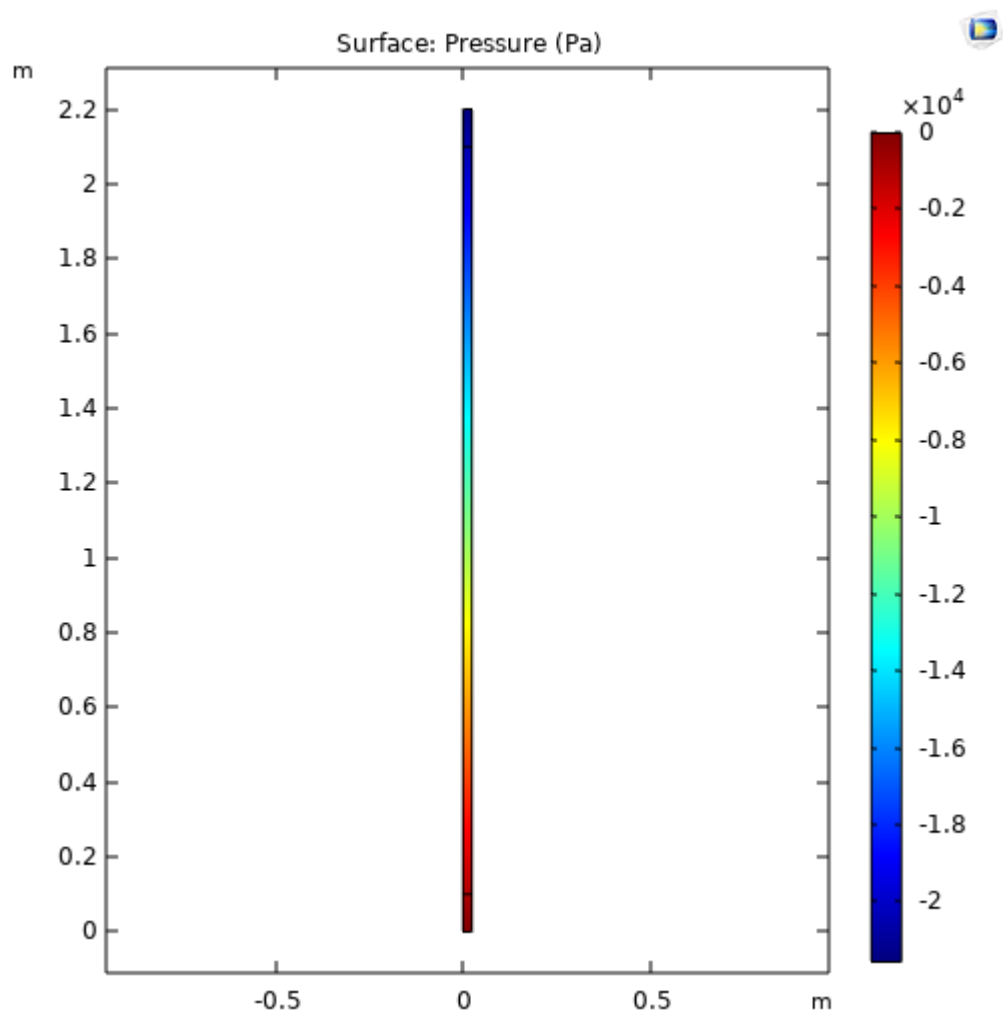


Рис. 2.6 – Распределение давления в колонне в стационарном состоянии с жидкой фазой

Из рис. 2.6 видно, что перепад давления в колонне составляет $2 \cdot 10^4$ Па.

2.3 Моделирование движения газовой фазы в колонне

Расход пара зададим $G=0,1663 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

Исследование скорости движения пара проведем, как в стационарном, так и в стационарном режиме работы.

На 0,5 секунде работы колонны профиль скорости движения фазы выглядит, как представлено на рис. 2.7.

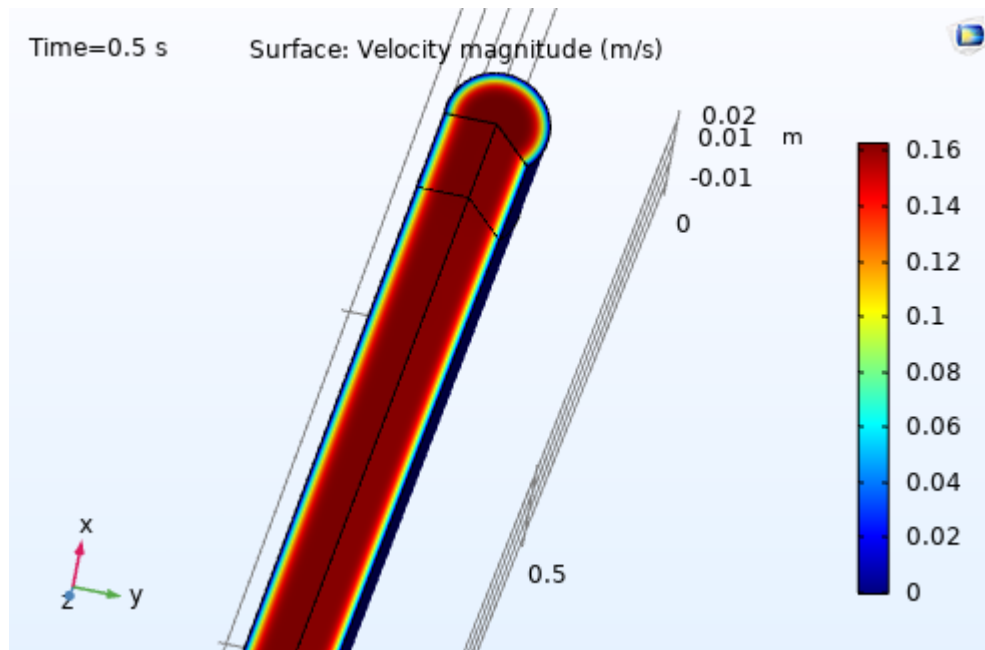


Рис. 2.7 – Профиль скорости движения пара на 0,5 секунде после старта процесса при потоке $G=0,1663 \cdot 10^{-3}$ кг/с

Как видно из рис. 2.7, к 0,5 секунде поток пара близок к стационарному состоянию, так как не наблюдается никаких турбулентных потоков, скорость распределена равномерно. Наибольшая скорость движения наблюдается в середине колонны и равна 0,16 м/с.

На рис. 2.8 представлен профиль скорости пара после достижения стационарного состояния.

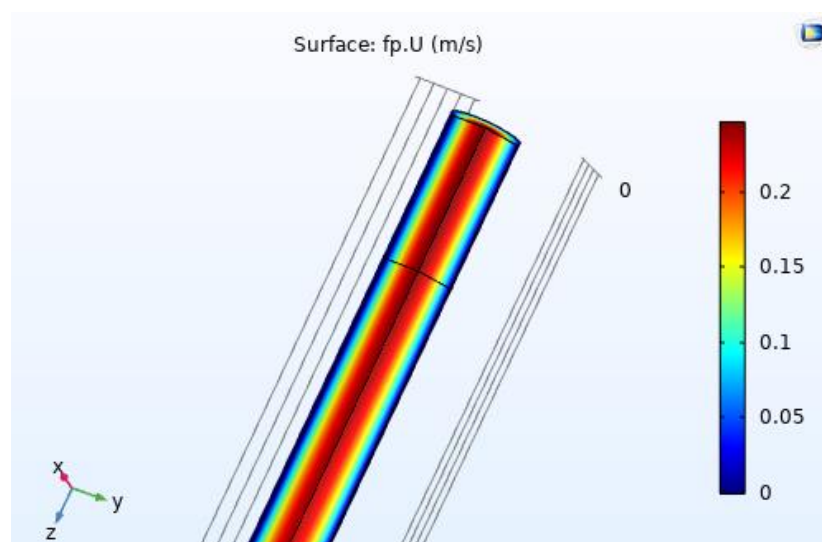


Рис. 2.8 - Профиль скорости движения пара при достижении стационарного состояния в колонне при потоке $G=0,1663 \cdot 10^{-3}$ кг/с

Как видно из рис. 2.8 максимальная скорость потока равна 0,2 м/с.

На рис. 2.9 представлен профиль давления в стационарном режиме работы колонны с газовой фазой.

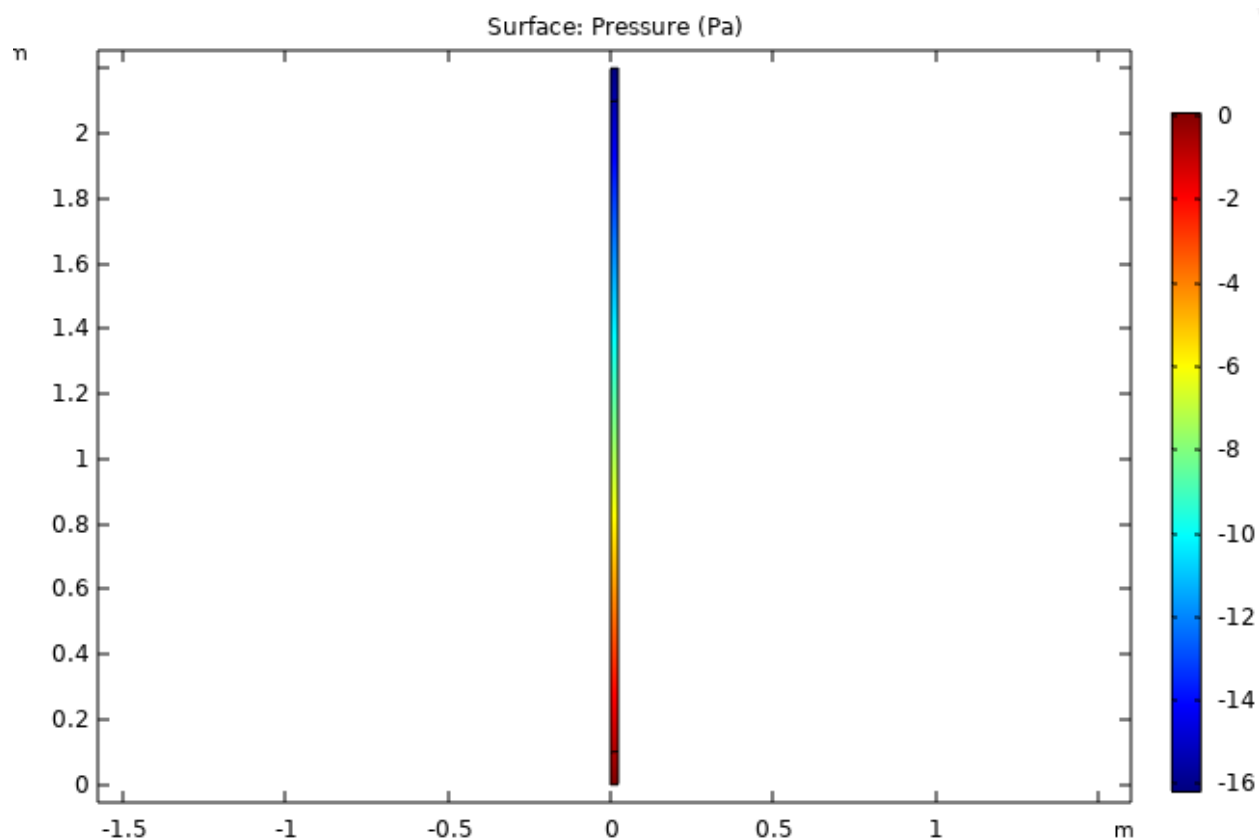


Рис. 2.9 – Профиль давления в стационарном режиме работы колонны с газовой фазой при потоке $G=0,1663 \cdot 10^{-3}$ кг/с

Как видно из рис. 2.9 перепад давления составляет 16 Па, это связано с тем, что расход пара слишком мал для создания высокого перепада давления.

Изменим расход пара до значения $G=0,4867 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

На 0,5 секунде работы колонны профиль скорости движения фазы выглядит, как представлено на рис. 2.10.

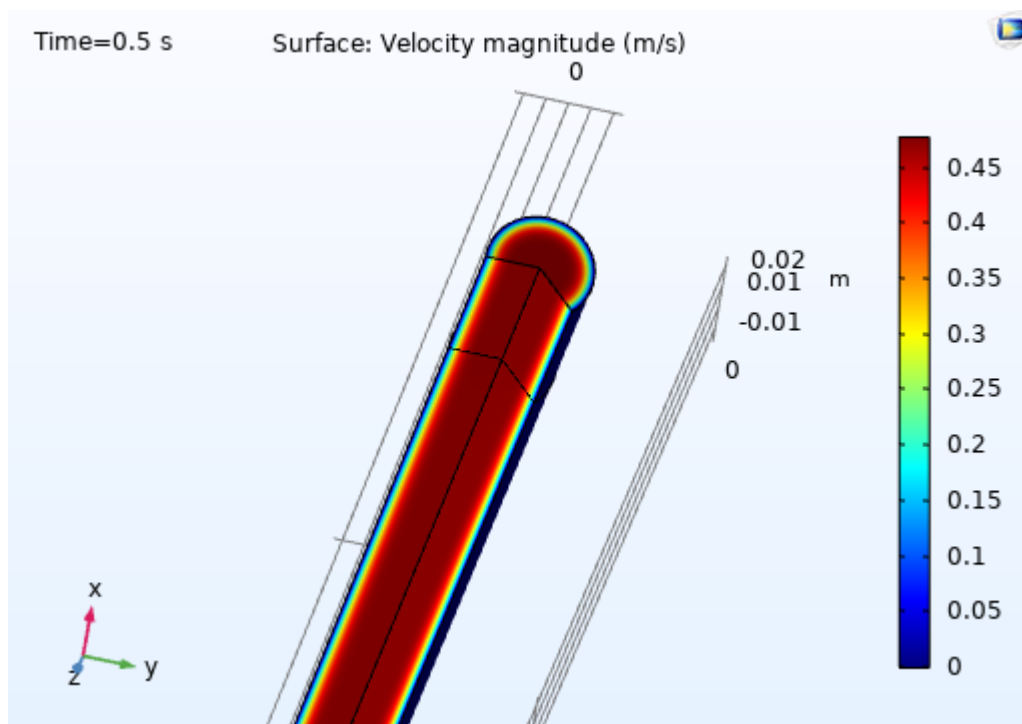


Рис. 2.10 – Профиль скорости движения пара на 0,5 секунде после старта процесса при потоке $G=0,4867 \cdot 10^{-3}$ кг/с

Как видно из рис. 2.10, к 0,5 секунде поток пара близок к стационарному состоянию, так как не наблюдается никаких турбулентных потоков, скорость распределена равномерно. Наибольшая скорость движения наблюдается в середине колонны и равна 0,45 м/с.

На рис. 2.11 представлен профиль скорости пара после достижения стационарного состояния.

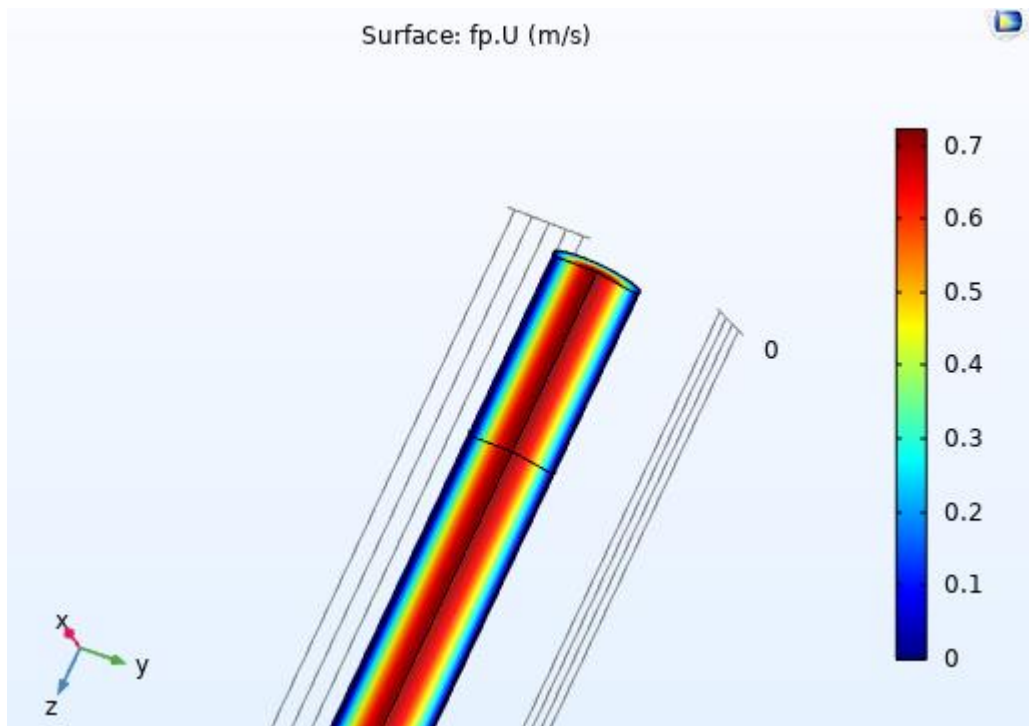


Рис. 2.11 - Профиль скорости движения пара при достижении стационарного состояния в колонне при потоке $G=0,4867 \cdot 10^{-3}$ кг/с

Как видно из рис. 2.11 максимальная скорость потока равна 0,7 м/с.

На рис. 2.12 представлен профиль давления в стационарном режиме работы колонны с газовой фазой.

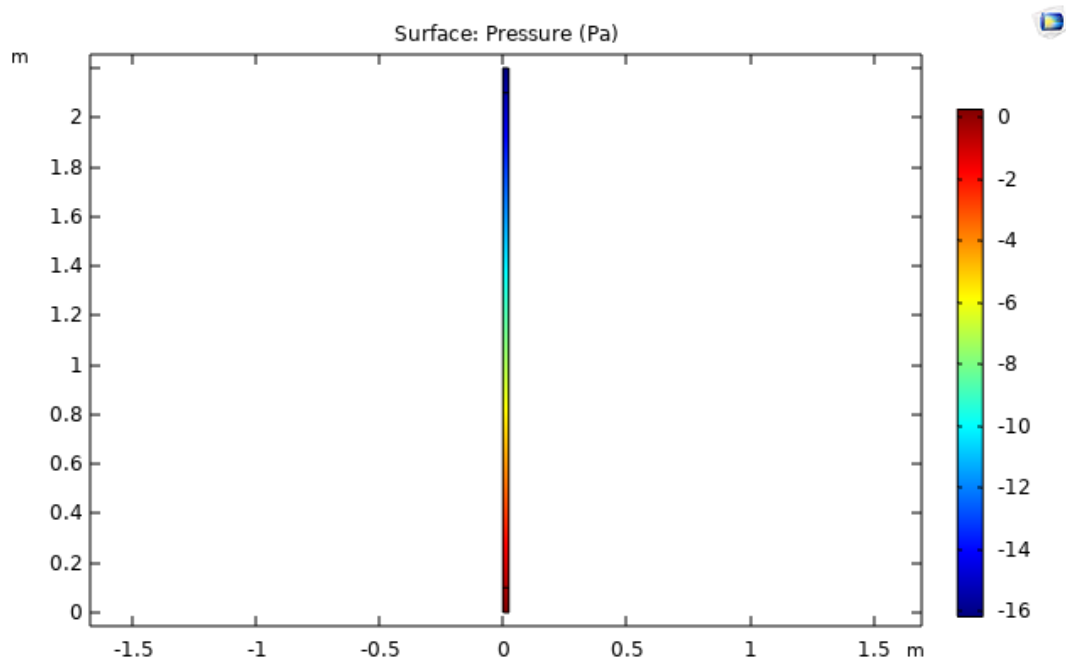


Рис. 2.12 – Профиль давления в стационарном режиме работы колонны с газовой фазой при потоке $G=0,4867 \cdot 10^{-3}$ кг/с

2.4 Анализ полученных результатов

Движение жидкой фазы через колонну, содержащую пористую структуру является сложным гидромеханическим процессом. В зонах, где не содержится насадка наблюдается наибольшая скорость, причем как видно из рис. 2.2а, рис. 2.3а и рис. 2.4а в верхней части колонны наибольшая скорость достигается в середине колонны, так как у стенок колонны жидкая фаза испытывает сопротивление. Скорость жидкости в пористой структуре имеет равномерное распределение, так как там гидравлическое сопротивление примерно одинаково по всей геометрии колонны.

Из рис. 2.2б, рис. 2.3б и рис. 2.4б видно, что при выходе жидкости из пористой структуры максимальная скорость наблюдается у стенок, а в середине наблюдается умеренная скорость. Это происходит из-за того, что имеется сопротивление стенок, которое выталкивает фазу в середину и сопротивление насадки, турбулизирующее поток. Однако, как видно из рис. 2.5 в стационарном состоянии скорость перестает изменяться и равномерно распределяется по колонне. Стоит добавить, что в [18] не указаны скорости движения жидкой фазы, но по результатам моделирования они оказались весьма малы (менее 1 мм/с).

По результатам моделирования движения водяного пара в колонне видно, что скорость движения пара приходит в стационарное состояние намного быстрее, чем жидкость, что объясняется разницей в свойствах пара и жидкости. Из рис. 2.7 и 2.10 видно скорость пара равномерно увеличивается по геометрии колонны, также видно, что при увеличении расхода пара увеличивается и скорость движения фазы.

Так как процесс установления стационарного состояния у пара происходит быстрее, чем у жидкости, то заметить изменения характеристик в зонах, граничащих с насадкой намного сложнее, поэтому можно считать, что установление стационарного состояния в газовой фазе моментально по сравнению с жидкой фазой.

Для проверки адекватности получаемых результатов проведен расчет изменения скорости по колонне при величинах расхода соответствующих экспериментальным данным из [18]. Результаты расчета и экспериментальные данные приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Экспериментальные и моделируемые значения скоростей пара

Расход пара, г/с	0,1663	0,4867
Скорость пара, взятая из литературных данных, м/с	0,154	0,451
Скорость пара, получившаяся при моделировании, м/с	0,148	0,467

Видно, что разница рассчитанной скорости пара и экспериментальной в случае двух потоком различаются менее чем на 5%. Следовательно, разработанная модель движения, может быть использована как для количественного, так и для качественного анализа характеристик фаз в ректификационной колонне.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования [19].

Данная ВКР направлена на исследование и оптимизацию процесса ректификации системы легкой и тяжелой воды в ректификационной колонне.

3.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Результатом исследования является получение расчетной модели движущихся фаз в ректификационной насадочной колонне.

Целевым рынком данного исследования будут являться нефтяные компании, промышленные компании, использующие различные изотопы, корпорации атомной промышленности, области производства, где необходимы определенные изотопы, добытые с помощью ректификационных колонн. Также результаты могут использоваться в научной отрасли, связанной с оптимизацией разделительных процессов.

Сегментировать рынок услуг можно по степени потребности использования данной методики. Результаты сегментирования представлены в рисунке 3.1.

		Расчётная модель движущихся фаз в ректификационной насадочной колонне			
		Нефтяные компании	Промышленность	Атомная отрасль	Научная отрасль
Потребность	Высокая				
	Низкая				

Рисунок 3.1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию оптимальной методики измерения

3.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Основное преимущество разрабатываемой оценки параметров – определение оптимальных потоков, при которых должны наблюдаться наилучшие характеристики разделения. Расчетная модель позволяет уменьшить материальные затраты, которые понадобились бы при построении натурального эксперимента. Тогда конкурентами являются:

- Экспериментальные исследования потоков ректификационных колонн;
- Теоретический расчёт гидравлических параметров ректификационных колонн.

Оценочная карта анализа модели оптимальных потоков представлена в таблице 4.1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным

путем, в сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений через интегральные коэффициенты определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (3.1.1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Для оценки конкурентных решений были выбраны следующие критерии: выход полезного продукта (насколько увеличивается исходный продукт при использовании данной модели); скорость обработки (насколько быстро можно получить данные для заданных начальных параметров); удобство использования (насколько для работника, который видит модель впервые легко начать работать с моделью); экономичность (сокращение материальных затрат; надежность (точность получаемых данных); использование материальных ресурсов (необходимость использовать материальные ресурсы для получения данных); стабильность (постоянная работа модели при разных входных данных); затраты на разработку (сколько потрачено материальных ресурсов на реализацию модели); конкурентоспособность (преимущества данной расчетной модели над иными способами получения данных); предполагаемый срок эксплуатации (время, которое предположительно данная модель будет актуальна). В таблице 3.1 представлена оценочная карта сравнения конкурентных технических решений.

Таблица 3.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		B_{ϕ}	B_{k1}	B_{k2}	K_{ϕ}	K_{k1}	K_{k2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Выход полезного продукта	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
2. Скорость обработки	0,15	5	4	3	0,75	0,6	0,45

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность			
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
3. Удобство использования	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32
4. Экономичность	0,12	5	2	3	0,6	0,24	0,36
5. Надежность	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
6. Использование материальных ресурсов	0,1	4	1	2	0,4	0,1	0,2
7. Стабильность	0,02	4	4	4	0,08	0,08	0,08
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Затраты на разработку	0,1	4	1	3	0,4	0,1	0,3
2. Конкурентоспособность	0,13	5	4	4	0,65	0,52	0,52
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	4	4	0,4	0,4	0,4
Итого	1				4,6	3,36	3,63

В таблице рассмотрены различные критерии оценки эффективности модели, суммарный вес равен 1. Каждому критерию присваивается оценка от наиболее слабой 1, до наиболее сильной позиции с оценкой 5.

Наиболее важными критериями выбраны скорость обработки - 0,15, конкурентоспособность - 0,13 и экономичность - 0,12. Наименее важными: стабильность и удобство использования.

Видно, что коэффициент конкурентоспособности для разрабатываемого метода равен 4,6, для экспериментального метода 3,36, для теоретического исследования 3,63.

Можно сделать вывод, что разработанная в работе модель потоков фаз является наиболее оптимальной для использования в практических целях. Методы конкурентных разработок хуже разрабатываемого метода, который имеет наибольшую скорость обработки, экономичность, минимальное использование материальных ресурсов, минимальные затраты на разработку и наивысшую конкурентоспособность.

Наиболее модель повышает скорость обработки, снижает затраты и является наиболее конкурентоспособной среди остальных способов получения подобного знания.

3.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта [20].

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Актуальность выбранной темы. 2. Бюджетное финансирование. 3. Быстрое получение результатов высокой точности. 4. Возможность улучшение модели. 	<p>Слабые стороны проекта:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ограниченное применение конкретной модели. 2. Необходимо экспериментальное подтверждение. 3. Ограниченные возможности расчёта (только для определенных компонентов). 4. Сложное изменение начальных параметров модели
<p>Возможности:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Использование модели для оптимизации разделения. 2. Дополнительное финансирование для создания отдельного ПО для лучшего получения результатов. 3. Расширение возможностей 	<p>1. Все возможности для улучшения оптимизации потоков и характеристик разделения.</p> <p>2. Высокий спрос, обеспечение материальными ресурсами для апробации модели.</p> <p>3. При создании дополнительного ПО появляются дополнительные сильные стороны, возможно повышение спроса и увеличение прибыли</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Апробация модели весьма тяжела и в условиях университета маловероятна, но возможна. 2. Создание дополнительного ПО может решить проблему изменения начальных параметров. 3. Круг потребителей можно увеличить с помощью увеличения возможностей расчётной модели.

расчётной модели благодаря имеющейся экспериментальной базе.		
Угрозы: 1. Консервативность предприятий, нежелание использовать новую модель. 2. Оптимизация потоков другими компаниями. 3. Сложность в продвижении модели. 4. Практически полное отсутствие спроса вне госкомпаний.	1. Предприятия вынуждены использовать результаты оптимизации из-за актуальности темы. 2. Расширение возможностей данной модели позволит конкурировать с разработками других компаний. 3. Хотя спрос возможен только в госкомпаниях, однако финансирование от них возможно достаточно большое.	1. Узкий круг потребителей решается тем, что им необходимо улучшать характеристики разделение, что также решает вопрос консервативности. 2. Сложность в продвижении и изменение параметров модели решаются ее модернизацией.

В таблице 3.3 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 3.3 – Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	1	2	3	4	5
1	+	+	+	+	+
2	+	+	-	+	-
3	+	-	+	+	+

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

Вышеприведенный SWOT-анализ показывает, что данный метод оптимизации разделительного процесса имеет множество преимуществ таких как: множество возможностей для оптимизации и улучшения полученных

результатов; подкрепление высоким спросом в промышленности; имеет достаточную доступность и удобство эксплуатации для пользователя; высокую конкурентоспособность. Некоторые несовершенства такие как: спрос в основном госкомпаний или сложность апробации решаются получением гранта на исследование, что повысит узнаваемость среди потенциальных покупателей и предоставит возможность экспериментального подтверждения модели.

3.2 Планирование научно-исследовательской работы

3.2.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ [21]. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта. ИСР представлена на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 – Иерархическая структура работ

3.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания НИР	4.03.2021	Приказ по ИШЯТ
2	Составление и утверждение технического задания	5.03.2021	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	8.03.2021	
4	Подбор и изучение материалов по теме	9.03.2021	Отчёт
5	Календарное планирование работ	11.03.2021	План работ
6	Изучение возможностей расчётной модели	12.03.2021	Отчёт
7	Освоение методики расчёта на практике	13.03.2021	Отчёт
8	Проведение расчётов	15.03.2021- 20.04.2021	Отчёт
9	Анализ полученных данных	21.04.2021	Отчёт
10	Обобщение и оценка результатов	22.04.2021	Отчёт
11	Составление пояснительной записки	5.03.2021- 10.05.2021	Пояснительная записка
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	11.05.2021	
13	Подготовка к защите	25.04.2021- 25.05.2021	

3.2.3 План проекта

В рамках планирования исследовательского проекта построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта. В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ [21]. Далее студент, выполняющий ВКР будет именоваться как Исполнитель.

Для расчета трудоемкости выполняемых работ использовалась формула:

$$t_{ож\ i} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (3.2.1)$$

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Линейный график представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Календарный план проекта

Код работ	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	1	4.03.2021	5.03.2021	Руководитель
2	Составление и утверждение технического задания	1	5.03.2021	6.03.2021	Руководитель
3	Выбор направления исследований	1	8.03.2021	9.03.2021	Руководитель, исполнитель
4	Подбор и изучение материалов по теме	5	9.03.2021	13.03.2021	Исполнитель
5	Календарное планирование работ	1	11.03.2021	11.03.2021	Руководитель, исполнитель
6	Изучение возможностей расчётной модели	3	12.03.2021	14.03.2021	Исполнитель

Код работ	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
7	Освоение методики расчёта на практике	1	13.03.2021	13.03.2021	Исполнитель
8	Проведение расчётов	36	15.03.2021	20.04.2021	Исполнитель
9	Анализ полученных данных	2	21.04.2021	22.04.2021	Исполнитель
10	Обобщение и оценка результатов	2	22.04.2021	23.04.2021	Руководитель, исполнитель
11	Составление пояснительной записки	66	5.03.2021	10.05.2021	Исполнитель
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	11.05.2021	11.05.2021	Руководитель, исполнитель
13	Подготовка к защите	30	25.04.2021	25.05.2021	Исполнитель

В таблице 3.6 представлен календарный план-график проведения научного исследования. В календарном графике месяц разбит на 4 периода по 7,5 дней каждый. Цветами обозначен состав участников: синим – руководитель; желтым – исполнитель; зеленым – руководитель и исполнитель.

Таблица 3.6 – Календарный план-график проведения научного исследования

Код работы	Март				Апрель				Май			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												

3.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

3.3.1 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхi}, \quad (3.3.1)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.);

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15 – 25 % от стоимости материалов.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 3.7.

Затраты на электроэнергию для работы ПЭВМ рассчитываются по формуле:

$$C = C_{эл} \cdot P \cdot F_{об} = 3,5 \cdot 0,065 \cdot 650 = 148,$$

где $C_{эл}$ – тариф на электроэнергию (3,5 руб. за 1 кВт·ч);

P – мощность оборудования, кВт;

$F_{об}$ – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 107 рубля.

Таблица 3.7 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электроэнергия	–	4,225 кВт·ч	3,5	148
Всего за материалы				148
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого				148

3.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (3.3.2)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_{раб}, \quad (3.3.3)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{дн} = (Z_m \cdot M) / F_d, \quad (3.3.4)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 3.8). Так как руководитель и исполнитель работают 6 дней в неделю, в таблице укажем баланс для шестидневной рабочей недели.

Таблица 3.8 – Баланс рабочего времени для шестидневной рабочей недели

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	66	66
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	28	48
– невыходы по болезни	–	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	271	251

Оплата исполнителя соответствует законодательству и равняется минимальному размеру оплаты труда без учета районного коэффициента и составляет 12792 руб. в месяц.

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

- оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

- стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

- иные выплаты: районный коэффициент.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью профессор и степенью доктор наук. Оклад профессора составляет 45000 руб. без учета районного коэффициента.

Для расчета месячного должностного оклада работника применяется формула:

$$Z_m = Z_{ок} \cdot k_p, \quad (3.3.5)$$

где $Z_{ок}$ – заработная плата по окладу, руб.;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

В таблице 3.9 представлены значения заработной платы исполнителей работы.

Таблица 3.9 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Исполнители	$Z_{ок}$, руб.	k_p	Z_m , руб.	$Z_{дн}$, руб.	Z_q , руб.	$T_{раб}$	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	45000	1,30	58500	2659	–	7 д.	18613
Исполнитель	12792	1,30	16630	–	–	3,5 м.	58205
Итого $Z_{осн}$:							76818

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с

обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

$$Z_{\text{доп}} = Z_{\text{осн}} \cdot k_{\text{доп}}, \quad (3.3.6)$$

где $Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной зарплаты ($k_{\text{доп}} = 0,14$);

$Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата, руб.

Дополнительная заработная плата руководителя составит:
 $0,14 \cdot 18613 = 2606$ руб., исполнителя $0,14 \cdot 58205 = 8149$ руб.

3.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 30,2 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (3.3.7)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Величина отчислений во внебюджетные фонды исполнителя составляет:

$$C_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 66354 = 20039 \text{ руб.}$$

Величина отчислений во внебюджетные фонды руководителя составляет:

$$C_{\text{внеб}} = 0,302 \cdot 21219 = 6409 \text{ руб.}$$

3.3.4 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и

ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (3.3.8)$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы в ТПУ составляют 12 – 16 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы. Примем $k_{\text{накл}} = 14 \%$. Также в накладные расходы пойдут: бумага Dooble A 96 руб., печать на бумаге 200 руб., две ручки Attache 0,5 мм 20 руб., доступ в интернет на 3 месяца 1500 руб. Ручки, бумагу, печать и интернет поделим поровну между исполнителем и руководителем

Накладные расходы исполнителя составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,14 \cdot 66354 + 48 + 100 + 10 + 750 = 10198 \text{ руб.}$$

Накладные расходы руководителя составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,14 \cdot 21219 + 48 + 100 + 10 + 750 = 3879 \text{ руб.}$$

3.3.5 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Так как все основные расчеты производятся на ноутбуке стоимостью 38500 руб. амортизационные отчисления на основные средства рассчитывать не нужно.

Ноутбук в стоимость не включается, так как он был приобретен до начала исследования.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.	Удельный вес, %
1. Материальные затраты исследования	148	0,12
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	76818	59,90
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	10755	8,39
4. Отчисления во внебюджетные фонды	26448	20,62
5. Накладные расходы	14077	10,98
Бюджет затрат исследования	128246	

3.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} \quad (3.4.1)$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта.

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{31507}{96591} = 0,33$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{96591}{96591} = 1$$

Полученная величина интегрального финансового показателя проекта отражает соответствующее численное удешевление стоимости разработки, т.к. полученное значение для разных исполнителей не превышает единицы.

В таблице 3.11 представлено сравнение характеристик вариантов исполнения проекта.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i \quad (3.4.2)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки;

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

b_i^a, b_i^p – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

n – число параметров сравнения.

Таблица 3.11 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Руководитель (исп.1)	Исполнитель (исп.2)
Точность вычислений	0,2	5	4
Визуализация результатов	0,3	5	4
Скорость производства расчетов	0,2	4	4
Удобство в эксплуатации	0,15	5	5
Экономия средств	0,15	4	4
Итого	1	4,6	4,2

$$I_{p-исп1} = 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 = 4,65;$$

$$I_{p-исп2} = 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 = 4,15.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр.i}} \quad (3.4.3)$$

$$I_{исп.1} = \frac{4,65}{0,33} = 14,09$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{4,15}{1} = 4,15$$

С целью определения наиболее целесообразного варианта из предложенных сравним интегральные показатели эффективности вариантов исполнения разработки и определим сравнительную эффективность проекта, представленную в таблице 3.12:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.1}}}{I_{\text{исп.2}}}. \quad (3.4.4)$$

Таблица 3.12 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатель	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,33	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	4,15
3	Интегральный показатель эффективности	14,09	4,15
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	3,4	

3.5 Выводы по разделу «Финансовый менеджмент ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

По итогам анализа можно сделать выводы, что разрабатываемая модель оптимизации имеют высокую конкурентоспособность, обладает наибольшей скоростью обработки и наиболее экономична.

В ходе планирования построен план графика работ, по которому построен график Ганта. Коллектив состоит из руководителя и исполнителя.

На материалы в бюджете затрачивается 148 руб., на основную заработную плату участникам 76818 руб., отчисления во внебюджетные 26448 руб., накладные расходы 14077 руб. В общем, бюджет составил 118246 руб.

Сравнивая характеристики эффективности разработки на основании интегрального показателя эффективности, сделан вывод, что реализовывать проект выгоднее и эффективнее в варианте, предлагаемом в данной работе.

4 Социальная ответственность

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Охрана труда – это система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Правила по охране труда и техники безопасности вводятся в целях предупреждения несчастных случаев, обеспечения безопасных условий труда работающих и являются обязательными для исполнения рабочими, руководителями, инженерно-техническими работниками.

Опасным производственным фактором, согласно [22], называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводят к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой производственный фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	ФАКТОРЫ ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа на ПЭВМ Отделение ОЯТЦ НИ ТПУ	—	Электрический ток	ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность
	Воздействие радиации (ВЧ, УВЧ, СВЧ и так далее)	—	СанПиН 1.2.3685-21 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»
	—	Пожарная безопасность	Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р 12.1.004-91 ССБТ Пожарная безопасность

На студента, работающего на компьютере, воздействуют следующие факторы:

– физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой частоты; освещённость; наличие излучения;

– психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ

4.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа непосредственно на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией или лицом ответственным за рабочее место после обучения на рабочем месте. После чего сотруднику присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается удостоверение специального образца.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием перед устройством на работу.

4.2.2 Технические мероприятия

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации.

То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 4.1.

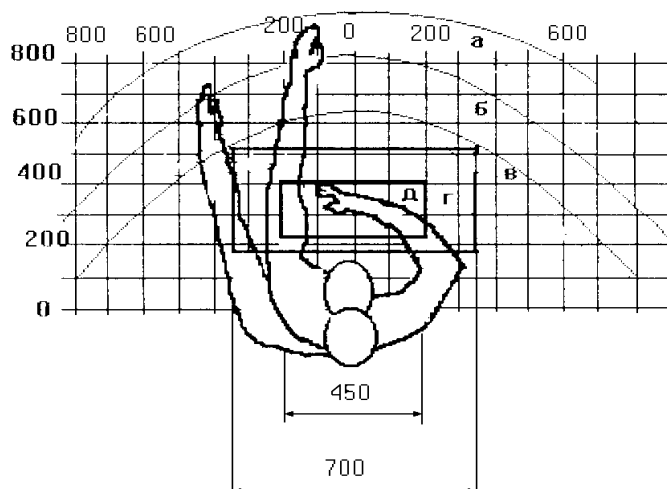


Рисунок 4.1 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости
а – зона максимальной досягаемости рук; б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке; в – зона легкой досягаемости ладони; г – оптимальное пространство для грубой ручной работы; д – оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук:

- дисплей размещается в зоне а (в центре);
- клавиатура – в зоне г/д;
- системный блок размещается в зоне б (слева);
- принтер находится в зоне а (справа);
- документация размещается в зоне легкой досягаемости ладони
- (слева) литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680–800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура,

должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420 – 550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500 – 600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 – 300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого цветов). При

работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

4.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда – это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [22] и приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оптимальные и допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	23–25	40–60	0,1
Тёплый	23–25	40	0,1

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями

к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20 – 25 °С, зимой – 13 – 15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основным недостатком такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеосигнального кабеля.

Согласно [22] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкР/час. По нормам [22] конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 5 см от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

4.3 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75 %), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность поражения электрическим током в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ЭВМ;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей ЭВМ);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;

– при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Действие электрического тока на организм человека носит своеобразный и разносторонний характер. Проходя через организм человека, электрический ток производит термическое, электролитическое и биологическое действие.

Термическое действие тока проявляется в ожогах тела, нагреве и повреждении кровеносных сосудов, нервов, мозга и других органов, и систем, что вызывает их серьезные функциональные расстройства. Электролитическое действие тока проявляется в разложении крови и других жидкостей в организме, вызывая тем самым значительные нарушения их физико-химических составов, а также ткани в целом. Биологическое действие тока выражается главным образом в нарушении биоэлектрических процессов, свойственных живой материи, с которыми связана ее жизнеспособность.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей) [23].

4.4 Пожарная и взрывная безопасность

Согласно [24], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Так как помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, т.е. к помещениям с

твердыми сгорающими веществами, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Возможные причины загорания:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);

- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения – предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

4.5 Выводы по разделу «Социальная ответственность»

В разделе по социальной ответственности рассмотрены основные пункты, связанные с формальными обязательствами обеспечения безопасности, в которую входят пожарная, взрывная и производственная безопасность с точки зрения правовых и организационных вопросов.

Рассмотрены специальные правовые нормы трудового законодательства, относящиеся к исследовательской работе в сидячем положении, в частности за ПК, также рассмотрены организационные мероприятия, которые способствовали безопасной работе. Рассмотрены опасные факторы, которые могут повлиять человека, проводящего исследования, также описаны способы минимизации воздействия опасных и вредных факторов на человека.

Выводы

1. Используя программное обеспечение построена и численно исследована трехмерная модель процесса противоточного движения воды и водяного пара с внутренним диаметром колонны $d_{col}=4,8$ см и высотой колонны $h=2,2$ м. Рассчитаны скорости и перепады давления для стационарного и нестационарного режима работы ректификационной колонны для воды и водяного пара.

Показано, что при расходе $L=0,0291$ моль/с скорость жидкой фазы нелинейно возрастает и достигает $5 \cdot 10^{-4}$ м/с в стационарном состоянии.

Установлено, что при заданных расходах пар имеет наибольшую скорость в стационарном состоянии. Показано, что скорость движения пара, полученная с помощью моделирования, отличается от экспериментальных данных, взятых из литературных источников, менее чем на 5%.

2. Установление стационарного состояния в жидкой фазе занимает примерно 20 секунд. По сравнению с жидкостью стационарное состояние в фазе пара устанавливается более чем в 10 раз быстрее.

3. Показано, что перепад давления в жидкой фазе составляет $2 \cdot 10^4$ Па и не может деформировать колонну или насадку.

Сравнение скоростей по двум различным расходам пара показало, что разработанная модель движения, может быть использована как для количественного, так и для качественного анализа характеристик фаз в ректификационной колонне.

Полученные в ходе математического моделирования результаты могут быть использованы в любых технологических цепочках, использующих ректификационное разделение при оптимизации данного процесса.

Список используемых источников

1. Жаворонков, Н. М. Ректификационная колонна для получения тяжело-кислородной воды / Н. М. Жаворонков, О. В. Уваров, В. А. Сокольский // Химическая промышленность. – 1956. – № 7. – С. 20.
2. Жаворонков, Н. М. Исследование эффективности регулярных насадок в процессе ректификации воды / Н. М. Жаворонков, В. А. Малюсов, Н. А. Малафеев, Р. Н. Ромейков // Химическая промышленность. – 1962. – № 7. – С. 53.
3. Иванов, И. В. Массообмен в насадочной колонне экстрактивной ректификации / И. В. Иванов, В. А. Лотхов, К. А. Моисеева, Н. Н. Кулов // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – № 5. – С. 485.
4. Магомедбеков, Э.П. Кондиционирование тяжело-кислородной воды методом ректификации под вакуумом / Э. П. Магомедбеков, И. Л. Селиваненко, Н. Н. Кулов, Г. В. Веретенникова // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – № 5. – С. 493.
5. Магомедбеков, Э. П. Массообменные характеристики спирально-призматической насадки в колоннах изотопного обмена при ректификации воды под вакуумом / Э. П. Магомедбеков, Д. Ю. Белкин, И. Л. Селиваненко, И. Л. Растунова // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – № 5. – С. 502.
6. Oxygen isotope fractionation studies of solute-water interactions : research / J. R. Neil, A. H. Truesdell, H. P. Jr. Taylor [etc.] ; Stable Isotope Geochemistry. – Washington, DC : Science book, 1991. – P. 17.
7. Сокол, Б. А. Насадки массообменных колонн / Б. А. Сокол, А. К. Чернышев, Д. А. Баранов, М. Г. Беренгартен, Б. В. Левин // ИНФОХИМ. – 2009. – № 8. – С. 44.
8. Sajben, M. A High-Speed Schlieren Investigation of Diffuser Flows with Dynamic Distortion / M. Sajben, J.C. Kroutil, C.P. Chen // AIAA Journal. – 1977. – № 77. – P. 75.

9. Bogar, T. J. Characteristic Frequencies of Transonic Diffuser Flow Oscillations / T.J. Bogar, M. Sajben, J.C. Kroutil // AIAA Journal. – 1983. – № 219. – P. 1232 – 1240.
10. Salmon, J. T. Laser Doppler Velocimetry in Unsteady, Separated, Transonic Flow / J. T. Salmon, T. J. Bogar, M. Sajben // AIAA Journal. – 1983. – № 2112. – P. 1690 – 1697.
11. Wesselingh, J. A. Mass Transfer in Multicomponent Mixtures / J. A. Wesselingh // AIAA Journal. – 2020. – № 21. – P. 15.
12. Bear, J. Hydraulics of Groundwater: Laser Doppler Velocimetry in Unsteady, Separated, Transonic Flow / J. Bear // AIAA Journal. – 1979. – № 5. – С. 40.
13. Sleep, N. H. Principles of Geophysics : science book / N. H. Sleep, K. Fujita. – Washington, DC : Blackwell Science, 1997. – 273 p.
14. Bear, J. Dynamics of Fluids in Porous Media : science book / J. Bear ; compiler J. A. Wesselingh. – Washington, DC : Elsevier Scientific Publishing, 1972. – 139 p.
15. Nield, D. Convection in Porous Media / D. Nield, A. Bejan // Springer. – 2006. – vol. 2 – № 73. – P. 98.
16. Le Bars, M. Interfacial Conditions Between a Pure Fluid and a Porous Medium: Implications for Binary Alloy Solidification / M. Le Bars, M.G. Worster // Fluid Mech. – 2006. – № 550. – P. 149-173.
17. Кулов, Н. Н. Фракционирование изотопов воды D/H и $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в насадочной ректификационной колонне / Н. Н. Кулов, А. В. Полковниченко, Е. В. Лупачев // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54. – № 53. – С. 267-275.
18. Кулов, Н. Н. Распределение тяжелых изотопов водорода и кислорода при ректификации / Н. Н. Кулов, И. Л. Растунова, И. Л. Селиваленко // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53. – № 2. – С. 123-130.
19. Платэ, Н.А. Основы химии и технологии мономеров : учебное пособие / Н. А. Платэ, Е. В. Сливинский. – Москва : Наука, 2002. – 696 с.

20. Видяев, И. Г. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение : учебно–методическое пособие / И.Г. Видяев, Н. А. Гаврикова, Г. Н. Серикова. – Томск : НИ ТПУ, 2014. – 36 с.
21. Скворцов, Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: учебное пособие / Ю.В. Скворцов – Москва : Высшая школа, 2006. – 399 с.
22. Российская Федерация. Трудовой кодекс Российской Федерации. Об основах охраны труда в Российской Федерации: Федеральный закон №197 – ФЗ : [принят Государственной думой 30 декабря 2001 года (ред. от 30.04.2021)] – Москва, 2001. – 158 с.
23. СанПиН 1.2.3685-21. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». – URL : <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 15.05.2021). – Текст: электронный.
24. ГОСТ Р 12.1.019-2009. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. Дата введения: 2011-01-01. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/1200080203> (дата обращения: 25.04.2021). – Текст: электронный.