

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**Инженерная школа новых производственных технологий**  
**Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**  
**Направление подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии**  
**Профиль Машины и аппараты химических производств**

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Проект реактора для получения карбамидоформальдегидной смолы

УДК 678.652'41'21.023.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К41	Желнорович Владимир Александрович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	К.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Верховская М.В.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Штейнле А.В.	К.М.Н.		

По разделу «Конструктивно-механический раздел»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	К.Т.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Краснокутская Е.А.	Д.Х.Н., профессор		

Томск – 2018 г.

## Планируемые результаты обучения

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P1	Применять базовые математические, естественнонаучные, социально-экономические и специальные знания в профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ПК-1,2,3,19,20), Критерий 5 АИОР (п.1.1)
P2	Применять знания в области энерго-и ресурсосберегающих процессов и оборудования химической технологии, нефтехимии и биотехнологии для решения производственных задач	Требования ФГОС (ПК-4,5,9,15 ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.1.1,1.2)
P3	Ставить и решать задачи производственного анализа, связанные с созданием и переработкой материалов с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии.	Требования ФГОС (ПК-4,5,8,11, ОК-2,4), Критерий 5 АИОР (пп.1.2)
P4	Проектировать и использовать новое энерго-и ресурсосберегающее оборудование химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-8,11,23,24), Критерий 5 АИОР (п.1.3)
P5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области энерго-и ресурсосберегающих процессов химической технологии, нефтехимии и биотехнологии	Требования ФГОС (ПК-1,4,5,19-22, ОК-7,10), Критерий 5 АИОР (п.1.4)
P6	Осваивать и эксплуатировать современное высокотехнологичное оборудование, обеспечивать его высокую эффективность и надежность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ПК-6,12,13,14,17, ОК-3,4,8), Критерий 5 АИОР (п.1.5)
P7	Применять знания по проектному менеджменту для ведения инновационной инженерной деятельности с учетом юридических аспектов защиты интеллектуальной собственности	Требования ФГОС (ПК-3, 8, 9, 10, 11, 12, 13), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Использовать современные компьютерные методы вычисления, основанные на применении современных эффективных программных продуктов при расчете свойств материалов, процессов, аппаратов и систем, характерных для профессиональной области деятельности; находить необходимую литературу, использовать компьютерные базы данных и другие источники информации	Требования ФГОС (ПК-4, 5, 9, 10, 11, 14)

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные компетенции</i>		
Р9	Демонстрировать знания социальных, этических и культурных аспектов профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,2,6-10), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5)
Р10	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-6,7,8), Критерий 5 АИОР (2.6)
Р11	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-11) , Критерий 5 АИОР (п.2.2)
Р12	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	Требования ФГОС (ОК-3,4,5,12) , Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3)

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Инженерная школа новых производственных технологий**

**Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**

**Направление подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии**

**Профиль Машины и аппараты химических производств**

**УТВЕРЖДАЮ:**

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера

\_\_\_\_\_ Е.А. Краснокутская  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4К41	Желнорович Владимир Александрович

Тема работы:

Проект реактора для получения карбамидоформальдегидной смолы	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	21.02.2018 №1198/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	05.06.2018
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	
<i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	<i>Объектом исследования является химический реактор с гладкой теплообменной рубашкой и перемешивающим устройством для синтеза карбамидоформальдегидной смолы марки КФ-Ж.</i> <i>1. Производительность, т/год – 56500;</i> <i>2. Состав сырья: карбамид, формалин, натрий едкий (20%), аммиак водный, бура, кислота серная;</i> <i>3. Продукт: карбамидоформальдегидная смола марки КФ-Ж (ГОСТ 14231-88);</i> <i>4. Способ организации процесса: непрерывный;</i> <i>5. Годовой фонд рабочего времени, дн – 333.</i>

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Обзор литературы</li> <li>2. Технологическая схема установки синтеза смолы</li> <li>3. Технологические расчеты реактора синтеза смолы</li> <li>4. Выбор конструкционных материалов</li> <li>5. Механический расчет реактора синтеза смолы</li> <li>6. Поверочный расчет реактора синтеза смолы</li> <li>7. Результаты расчётов реактора синтеза карбамидоформальдегидной смолы</li> <li>8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</li> <li>9. Социальная ответственность</li> <li>10. Выводы</li> <li>11. Список публикаций студента</li> <li>12. Список использованных источников</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Технологическая схема (А1)</li> <li>2. Реактор. Вид обций (А0)</li> <li>3. Реактор. Сборочные единицы (А1)</li> </ol>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p style="text-align: center;"><b>Раздел</b></p>	<p style="text-align: center;"><b>Консультант</b></p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Верховская Марина Витальевна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Штейнле Александр Владимирович</p>
<p>Конструктивно-механический раздел</p>	<p>Беляев Василий Михайлович</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p> </p>	
<p> </p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	<p>22.02.2018</p>
--	-------------------

**Задание выдал руководитель:**

<p style="text-align: center;">Должность</p>	<p style="text-align: center;">ФИО</p>	<p style="text-align: center;">Ученая степень, звание</p>	<p style="text-align: center;">Подпись</p>	<p style="text-align: center;">Дата</p>
<p>Доцент</p>	<p>Беляев В.М.</p>	<p>к.т.н.</p>	<p> </p>	<p> </p>

**Задание принял к исполнению студент:**

<p style="text-align: center;">Группа</p>	<p style="text-align: center;">ФИО</p>	<p style="text-align: center;">Подпись</p>	<p style="text-align: center;">Дата</p>
<p>4К41</p>	<p>Желнорович Владимир Александрович</p>	<p> </p>	<p> </p>

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
4К41	Желнорович Владимир Александрович

<b>Школа</b>	<b>ИШНПТ</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>Н. М. Кижнера</b>
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	МАХП

**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>Использование информации, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах и изданиях, нормативно-правовых документах.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</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>Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. Выполнение SWOT-анализа проекта.</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИ</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Проведение оценки экономической эффективности исследования.</i>

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i></li> <li>2. <i>Матрица SWOT</i></li> <li>3. <i>График проведения и бюджет НИ</i></li> <li>4. <i>Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ</i></li> </ol>	
--	--

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Верховская Марина Витальевна	К.Э.Н		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
4К41	Желнорович Владимир Александрович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4К41	Желнорович Владимир Александрович

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Н.М. Кижнера
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	МАХП

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p>	<p><i>Объектом исследования является химический реактор с гладкой теплообменной рубашкой и перемешивающим устройством, применяющийся для производства карбамидоформальдегидной смолы.</i></p>
<p>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</p>	
<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– опасность поражения электрическим током (источники, средства защиты)</li> </ul>	<p><i>1.1 Наиболее вредный фактор на производстве – наличие в воздухе рабочей зоны паров вредных химических соединений.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– природа фактора – химическая;</li> <li>– дано описание действия вредных веществ, действовавших в производстве, на организм человека при вдыхании, попадании на кожу, в глаза и проглатывании;</li> <li>– в качестве средства коллективной защиты выбрана правильно организованная система вентиляции;</li> <li>– в качестве средств индивидуальной защиты рекомендованы респираторы и противогазы, прорезиненные костюмы, перчатки, фартуки.</li> </ul> <p><i>1.2 Опасные производственные факторы на производстве:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– вращающиеся механизмы (перемешивающее устройство, необходимо соблюдение техники безопасности при эксплуатации);</li> <li>– высокая температура теплоносителей (греющий пар, поступающий в рубашку; необходимо использовать индивидуальные средства защиты – перчатки и костюмы, предотвращающие ожоги);</li> <li>– поражение электрическим током (неисправные электросети, незаземлённое оборудование, на котором может скапливаться статическое электричество; необходимо соблюдение техники безопасности при работе с электроприборами и организация заземления для отвода статического электричества).</li> </ul>
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> </ul>	<p><i>2 В соответствии с нормами по охране окружающей среды необходимо предусмотреть следующие решения:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– организация системы по очистке выбросов в атмосферу от формальдегида,</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>- анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> <li>- разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</li> </ul>	<p><i>метанола, аммиака посредством абсорберов;</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>организация очистки сточных вод от растворённых в них формальдегида, метанола, аммиака методами биохимической очистки;</i></li> <li>- <i>организация отвала для вывоза твёрдых осадков смолы, получаемых при чистке и ремонте оборудования.</i></li> </ul>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>- выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>- разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> <li>- разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>	<p><i>3 В качестве возможных чрезвычайных ситуаций для производства определены: пожар, взрыв, химическая авария. В качестве наиболее типичной ЧС выбрана химическая авария. Даны рекомендации по предупреждению ЧС, порядок действий при возникновении ЧС и мер по ликвидации её последствий.</i></p>
<p><b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>- организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p><i>4 В соответствии с Трудовым кодексом Российской Федерации даны рекомендации по обеспечению компенсаций работникам вредного производства. Предложен закрытый тип компоновки производства. Дан перечень помещений производственного и общественного назначения, необходимых на предприятии. Даны рекомендации по организации эвакуационных выходов.</i></p>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Штейнле А.В.	К.М.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4К41	Желнорович Владимир Александрович		

## РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа состоит из графической части и пояснительной записки, была выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013, а также при помощи системы компьютерной алгебры MathCad, графическая часть выполнена в программе Компас 2016. Графическая часть состоит из 2-х листов форматом А1 и 1 листа формата А0. Пояснительная записка состоит из 169 страниц, включает в себя 16 таблиц, 30 рисунков, основана на 74 источниках.

Ключевые слова: реактор с мешалкой, карбаминоформальдегидная смола, реактор с рубашкой, карбамид, поликонденсация.

Объектом разработки являлся реактор с перемешивающим устройством и гладкой рубашкой для синтеза карбаминоформальдегидной смолы методом поликонденсации.

Цель работы – расчет и выбор реактора синтеза карбаминоформальдегидной смолы, который будет удовлетворять всем условиям технологического процесса. Производительность реактора 56,5 тыс.т./год.

Произведены материальный, тепловой, конструктивный и механический расчеты. Разработана технологическая схема и конструкция основного реактора. В конструктивно-механическом расчете были произведены расчеты толщин стенок обечайки, крышки и днища, элементов рубашки, штуцеров, фланцевых соединений, а так же расчет вала перемешивающего устройства на прочность, жесткость и вибростойкость. Рассчитано шпоночное соединение.

Область применения: промышленные предприятия в области органического синтеза.

Экономическая значимость работы: разработанный реактор является наиболее оптимальным средством для проведения реакции поликонденсации карбаминоформальдегидной смолы.

## ABSTRACT

The bachelor's work consists of a graphic part and an explanatory note and was executed by the text editor Microsoft Word 2013 with the additional use of the computer algebra system MathCad, the graphic part was executed by the program “Компас-3D 2016”. The graphic part consists of 2 sheets of A1 and 1 sheet of A0 format. The explanatory note consists of 169 pages, contains 16 tables, 30 figures and was based on 74 sources of literature.

Keywords: reactor with a stirrer, urea-formaldehyde resin, reactor with a jacket, urea, polycondensation.

The object of development was a reactor with a mixing device and a smooth jacket for the synthesis of urea-formaldehyde resin by the process of polycondensation.

The purpose of this work is the calculation and selection of a reactor for the synthesis of urea-formaldehyde resin, which will satisfy all the conditions of the technological process. The reactor's productivity is 56,5 thousand tons per year.

Material, thermal, constructive and mechanical calculations were made. The technological scheme and design of the main reactor have been developed. In the constructive-mechanical calculation, the thicknesses of the shell walls, covers and bottoms, fittings, flange connections were calculated, as well as calculation of the shaft of the agitator for strength, rigidity and vibration resistance. A keyed connection was calculated.

Scope: industrial enterprises in the field of organic synthesis.

Economic significance of the work: the developed reactor is the most optimal mean for carrying out the polycondensation reaction of urea-formaldehyde resin.

## Оглавление

Введение.....	14
1 Обзор литературы.....	16
1.1 Исходное сырьё для получения смолы.....	17
1.2 Способы получения карбамидоформальдегидной смолы.....	18
1.3 Масштабы производства и мировой рынок смолы.....	19
1.4 Сферы применения карбамидоформальдегидной смолы.....	20
1.5 Выбор аппаратного оформления технологической схемы.....	20
2 Технологическая схема установки синтеза смолы.....	23
2.1 Физико-химические закономерности синтеза смолы.....	23
2.2 Описание технологической схемы процесса.....	24
2.3 Контроль и автоматизация параметров процесса.....	26
3 Технологические расчёты реактора синтеза смолы.....	28
3.1 Материальный баланс реактора синтеза смолы.....	28
3.2 Гидродинамический расчет аппарата без внутренних устройств.....	31
3.3 Тепловой баланс реактора синтеза смолы.....	35
3.4 Конструктивный расчёт реактора синтеза смолы.....	40
3.5 Расчёт тепловой изоляции реактора синтеза смолы.....	41
3.6 Выводы по результатам технологических расчётов.....	42
4 Выбор конструкционных материалов.....	43
4.1 Расчёт основных характеристик материала.....	44
4.2 Заключение по выбору конструкционных материалов.....	46
4.3 Определение прибавок к толщине на различные разрушения.....	47
4.4. Выводы по выбору конструкционных материалов.....	47
5 Механический расчёт реактора синтеза смолы.....	49
5.1 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки.....	49
5.2 Расчёт толщины стенки эллиптического днища.....	55
5.3 Расчёт толщины стенки эллиптической крышки.....	60
5.4 Расчёт толщины стенки гладкой теплообменной рубашки.....	64
5.5 Расчёт сопряжения обечайки корпуса и днища.....	69
5.6 Расчёт сопряжения обечайки рубашки и днища.....	76
5.7 Расчёт сопряжения рубашки с корпусом.....	80
5.8 Расчёт фланцевого соединения корпуса с крышкой.....	85
5.9 Расчёт опор аппарата.....	95

5.10	Расчёт вала перемешивающего устройства на виброустойчивость, прочность и жёсткость .....	101
5.11	Расчёт укрепления отверстий в реакторе синтеза смолы .....	112
5.12	Расчёт шпоночного соединения вала с мешалкой.....	120
6	Поверочный расчёт реактора синтеза смолы.....	122
7	Результаты расчётов реактора синтеза карбаминоформальдегидной смолы .....	123
8	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	128
8.1	Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований.....	128
8.1.1	Потенциальные потребители результатов исследования. Сегментация рынка .....	129
8.1.2	Оценка перспективности разработки .....	130
8.1.3	SWOT-анализ разработки.....	133
8.2	Планирование научно-исследовательских работ .....	135
8.2.1	Структура работ в рамках научного исследования .....	135
8.2.2	Определение трудоёмкости выполнения работ .....	137
8.2.3	Разработка графика проведения научного исследования .....	138
8.3	Бюджет научно-технического исследования .....	140
8.3.1	Расчёт материальных затрат НТИ .....	140
8.3.2	Основная заработная плата исполнителей темы.....	141
8.3.3	Дополнительная заработная плата исполнителей темы .....	143
8.3.4	Отчисления во внебюджетные фонды .....	143
8.3.5	Накладные расходы и формирование бюджета .....	144
8.4	Оценка научно-технического эффекта разработки .....	145
9	Социальная ответственность.....	147
9.1	Производственная безопасность .....	147
9.2	Экологическая безопасность .....	150
9.2.1	Защита селитебной зоны .....	151
9.2.2	Защита атмосферы .....	151
9.2.3	Защита гидросферы.....	151
9.2.4	Защита литосферы.....	152
9.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	152
9.4	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	153
9.4.1	Специальные нормы трудового законодательства .....	154
9.4.2	Компоновка оборудования .....	154
	Заключение.....	156

Список публикаций студента .....	157
Список использованных источников.....	160
Приложение А Расчётная модель реактора для синтеза карбамидоформальдегидной смолы для осуществления механического расчёта аппарата .....	167
Приложение Б График выполнения ВКР .....	169

## Введение

Жизнь современного человека немислима без полимеров. Огромное количество самых различных предметов, окружающих его в повседневной жизни – от трубопроводов и зданий до бытовых предметов, мебели и даже одежды – создано из полимерных материалов или же с их добавлением. Неудивительно, что с увеличением спроса на данную продукцию растут темпы и объёмы её производства, появляются новые предприятия и расширяются компании, уже занявшие на рынке определённую нишу. Однако производство полимеров требует проектирования соответствующего оборудования – именно эту потребность мы и попытались удовлетворить в рамках настоящей бакалаврской работы.

Одним из полимеров, широко применяющихся и в промышленности, и в быту, является карбамидоформальдегидная смола. В зависимости от марки это соединение может использоваться в производстве древесных плит, картона, пенопласта. Древесные плиты же, к примеру, широко применяются в мебельном производстве. В свою очередь, хорошая адгезионная способность позволяет использовать отдельные марки смолы в качестве клеев и тампонажных растворов.

Ввиду широкой применимости данного полимера и нужды в оборудовании для его производства было решено осуществить расчётно-конструкторскую разработку химического реактора, предназначенного для синтеза карбамидоформальдегидной смолы марки КФ-Ж. Основными задачами в рамках реализации данного проекта были анализ современного состояния производства карбамидоформальдегидной смолы, изучение механизма синтеза данного полимера, выбор подходящей технологической схемы и расчёт основного аппарата – химического реактора с перемешивающим устройством. При подведении итогов работы были даны оценка экологичности принятых в процессе разработки реактора решений, а также экономического и научного потенциала разработки.

Особенностью данного проекта стала нацеленность на автоматизированное проектирование и активное использование средств персональных электронных вычислительных машин в процессе расчёта аппарата. Основной программой, применявшейся во время разработки реактора, являлась программа MathCAD, позволявшая максимально эффективно производить большие объёмы расчётов, необходимых для правильного проектирования аппарата под заданный процесс с учётом термодинамических и гидравлических факторов, а также наиболее оптимальных конструкционных решений.

Результатом научно-исследовательской разработки стал проект реактора для получения карбаминоформальдегидной смолы марки КФ-Ж, оформленный в виде расчётно-пояснительной записки с приложениями в виде технологической схемы процесса и чертежей.

# 1 Обзор литературы

В настоящем разделе бакалаврской работы дан обзор современного состояния промышленности по производству карбаминоформальдегидных смол, дана оценка распространённости и способов получения как сырья, так и самой смолы, а также представлены данные по мировому рынку в области производства и потребления продукции.

Карбаминоформальдегидная смола – это смола, относящаяся к группе аминопластов и представляющая собой, как понятно из названия, продукт поликонденсации карбамида с формальдегидом. Внешне карбаминоформальдегидная смола представляет собой однородную суспензию белого или светло-жёлтого цвета [2].

В соответствии с тем же стандартом [2] карбаминоформальдегидная смола производится в виде различных марок, немного отличающихся по рецептуре, а соответственно и физико-химическим свойствам, что позволяет применять их в большом количестве различных отраслей. Различают смолу общего назначения, быстроотверждающуюся, повышенной жизнеспособности, а также смолу, сочетающую в себе свойства последних двух марок (обозначаются соответственно литерами О, Б, Ж и БЖ [2]).

Рассмотрим специфику производства карбаминоформальдегидной смолы подробнее.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Студент</i>		<i>Желнорович В.А.</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Беляев В.М.</i>			<i>Д</i>	16	7
<i>Конс.</i>					<i>Обзор литературы</i>		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Руков. ООП</i>		<i>Краснокутская Е.А.</i>					

## 1.1 Исходное сырьё для получения смолы

Основными веществами, участвующими в синтезе карбаминоформальдегидных смол, являются карбамид, или мочеви́на, и формальдегид.

Карбамид представляет собой на вид белые кристаллы, способные растворяться полярных растворителях – таких, как вода, этиловый спирт или жидкий аммиак. Из некоторых физико-химических свойств карбамида можно выделить: температуру плавления – 132,7°C, энтальпию образования – –333,3 кДж/моль, растворимость в воде при 20°C – 51,8% [3]. Особо следует отметить тот факт, что при достижении температуры плавления мочеви́на обретает практически неограниченную растворимость в воде. Для карбамида типичны химические взаимодействия по механизму нуклеофильного замещения; электрофильность проявляется при взаимодействии со спиртами, аминами, гидразином, возможно также комплексообразование [4].

Производство карбамида зачастую совмещено с производством аммиака ввиду распространённости синтеза этого соединения по реакции Базарова при температурном режиме от 130 до 140°C и давлении порядка 20 МПа [5]:



Помимо использования в качестве сырья для синтеза смолы карбамид также применяется в производстве азотных удобрений.

Формальдегид, в свою очередь, является бесцветным, хорошо растворимым в воде и иных полярных растворителях газом, высокотоксичным и канцерогенным. При синтезе смолы он применяется в качестве водного раствора, называемого формалином. Температура кипения формальдегида составляет –118°C, энтальпия образования – –115,9 кДж/моль [3]. Наиболее типичными с точки зрения химических свойств для формальдегида являются реакции окисления – как с образованием муравьиной кислоты, так и с разрушением до углекислого газа и воды при жёстком окислении [4].

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

Наиболее типичным и распространённым методом получения формальдегида является каталитическое окисление метанола или этана. Первый процесс реализуется с использованием серебряного катализатора при температурном режиме в 650°C и атмосферном давлении [6]. Подобный способ называется в литературе наиболее развитым и освоенным, однако в иных источниках предлагается синтезировать формальдегид на железо-молибденовых катализаторах, более устойчивых к каталитическим ядам; кроме того, это позволило бы решить вопрос о необходимости очистки продукта от метанола, поскольку такой катализатор обеспечивает большую степень превращения [7]. Синтез из метана же предполагает использование меньшей температуры в 450°C, но требует создания избыточного давления в диапазоне от 1 до 2 МПа; в качестве катализатора предлагается использовать фосфат алюминия [8].

Рассмотрев свойства и способы получения сырья, перейдём к вопросу синтеза карбамидоформальдегидных смол.

## 1.2 Способы получения карбамидоформальдегидной смолы

Основным способом получения карбамидоформальдегидных смол до сих пор остаётся поликонденсация в среде с переменной кислотностью, описанная, к примеру, в пособии [1]. Первая стадия этого процесса предполагает смешение растворов карбамида и формальдегида с добавкой аммиачной воды и раствора едкого натра для поддержания рН в слабощелочном диапазоне. При данных условиях образуются молекулярные продукты различного строения, которые затем поликонденсируются в кислой среде, упариваются, проходят стадию дополнительной конденсации с добавлением карбамида, а затем отправляются на стандартизацию.

При осуществлении патентного поиска при помощи сайта [9] было отмечено, что кардинальных изменений в технологическую схему, описанную в [1], практически не предлагают, основывая модернизацию синтеза на регулировании времени пребывания реакционной массы в реакторе с той или иной средой, методах контроля рН среды и так далее. Основными целями подобного рода модернизации ставят, с одной стороны, увеличение клеящей способности смолы, а с другой – снижение доли токсичного формальдегида, находящегося в несвязанном состоянии в смоле и способного выделяться в воздух изделием, изготовленным из деревообрабатывающих плит.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		18

В пособии [1] наравне с реакторным способом синтеза карбамидоформальдегидных смол приведён способ получения смолы в абсорбционной колонне, выступающей в роли основного аппарата технологической схемы. В данном варианте организации процесса основные молекулярные продукты получаются при пропускании через раствор карбамида контактных газов, получаемых при каталитическом окислении метанола. Процесс в колонне осуществляется на серебряном катализаторе. Полученный раствор производных карбамида и формальдегида проходит через каскад реакторов, в которых при регулировании pH среды и постепенном понижении температуры осуществляется поликонденсация смолы.

Данный способ, исходя из представленной в источнике [1] информации можно охарактеризовать как чрезвычайно энергоёмкий при обеспечении того же качества целевого продукта, что и при синтезе в реакторах с переменной кислотностью. Подобное сочетание негативно скажется на экономических показателях проекта при его реализации, поэтому предварительно предпочтение в выборе отдаётся реакторной технологической схеме в качестве схемы настоящего проекта.

### 1.3 Масштабы производства и мировой рынок смолы

Масштабы производства исключительно карбамидоформальдегидной смолы в мире в целом оценить достаточно сложно, поскольку подобная статистика представлена весьма слабо. Зачастую говорится о рынке синтетических смол в целом. По данным источника [10] мировое производство синтетических смол составляет 130 млн. тонн. Крупнейшими производителями являются США, Япония и Германия – 31, 15 и более 11 миллионов тонн соответственно [10].

Одним из важнейших производителей продуктов органической и неорганической химии является немецкий концерн BASF, являющийся на данный момент крупнейшим в мире. У данной компании весьма широкий спектр специализации – свою деятельность она осуществляет и в сфере добычи нефти и газа, и в производстве различных конструкций и материалов, и в сельском хозяйстве, и в производстве химикатов. На конец 2016 года общий объём продаж продукции BASF распределился по следующим долям: 26% пришлось на создание функциональных материалов, 22% – на специальную химию, 21% – на химикаты (в число которых входят и смолы), 19% – на нефтегазовую отрасль и, наконец, 8% было отдано сельскому хозяйству [11].

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

Специфика российского рынка карбамидоформальдегидных смол заключается в том, что он в большей или меньшей степени сращён с рынком деревообрабатывающей промышленности – связано это с тем, что заводы-изготовители древесных плит предпочитают варить смолу специально для себя. По данным [12] производство карбамидоформальдегидных смол составляет 500 тысяч тонн в год, а крупнейшими производителями смолы являются Череповецкий фанерно-мебельный комбинат, Мебельная компания «Шатура», Поволжский фанерно-мебельный комбинат, «Югорский леспромхолдинг», а также некоторые российско-финские предприятия.

В целом, в согласии с различными литературными источниками, к примеру [13], на данный момент Россия в достаточной степени обеспечивает потребности своей промышленности в карбамидоформальдегидной смоле и не прибегает к импорту этого продукта из-за границы.

#### **1.4 Сферы применения карбамидоформальдегидной смолы**

Как уже было сказано выше, основной сферой применения карбамидоформальдегидных смол является деревообрабатывающая промышленность. Быстотвердеющая смола используется при изготовлении фанеры, в то время как смола общего назначения чаще всего применяется при склеивании бумаги. Смолу с повышенной жизнеспособностью активно применяют в производстве деталей мебели, равно как и смолу марки КФ-БЖ.

Помимо описанных выше сфер применения карбамидоформальдегидных смол, данные полимеры могут использоваться в качестве пропиточных материалов, а также сырья для производства пенопласта.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		20

## 1.5 Выбор аппаратного оформления технологической схемы

Исходя из информации, приведённой в пункте 1.2 настоящей работы, наиболее оптимальным для производства карбамидоформальдегидной смолы является реакторный способ с контролем кислотности среды. Подробное описание технологической схемы будет дано в следующем разделе настоящей работы. В данный момент необходимо дать перечень тех аппаратов, которые потребуются для реализации выбранной технологической схемы:

- для приготовления растворов формалина с добавкой аммиачной воды и для последующего добавления в раствор карбамида необходимы ёмкости, снабжённые перемешивающими устройствами. Наиболее удобное с точки зрения занимаемого пространства положение ёмкости – вертикальное. Необходимый объём ёмкости и её основные геометрические параметры определяются исходя из стандартов и нормативных документов. Заранее следует дать рекомендацию о предпочтительности торцевого уплотнения на данной ёмкости ввиду токсичности входящих в реакцию массу компонентов;

- поликонденсация смолы будет осуществляться в вертикальном реакторе непрерывного действия, также снабжённом механическим перемешивающим устройством с торцевым уплотнением и устройством для отвода тепла, возникающего в процессе реакции. Таковыми устройствами могут быть теплообменная рубашка, змеевик погружного типа или их комбинация – более точные рекомендации могут быть даны только после реализации теплового расчёта аппарата. Для реализации технологической схемы необходимо три реактора подобного рода;

- выпарной аппарат будет использоваться для нейтрализации суспензии олигомеров гидроксидом натрия;

- реакторы должны быть снабжены обратными холодильниками для охлаждения образующихся во время реакции паров воды с последующим их возвращением в объём реактора; выпарной аппарат необходимо снабдить прямым холодильником;

- прямой холодильник, отводящий пары из выпарного аппарата, необходимо оборудовать сборником для конденсата раствора формальдегида;

- систему холодильников следует включить в схему перед реактором доконденсации смолы в целях соблюдения технологического режима.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		21

Таким образом, в результате рассмотрения имеющихся данных в литературных источниках и оценки современного состояния промышленного синтеза карбамидоформальдегидной было вынесено решение о выборе технологической схемы производства в системе реакторов с переменной кислотностью среды. Перечень необходимого оборудования для реализации технологической схемы дан выше. Основным аппаратом, подлежащим автоматизированному расчёту, принят химический реактор непрерывного действия с устройствами для отвода тепла для поликонденсации в щелочной среде.

В следующем разделе настоящей бакалаврской работы выбранная технологическая схема будет рассмотрена более подробно.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		22

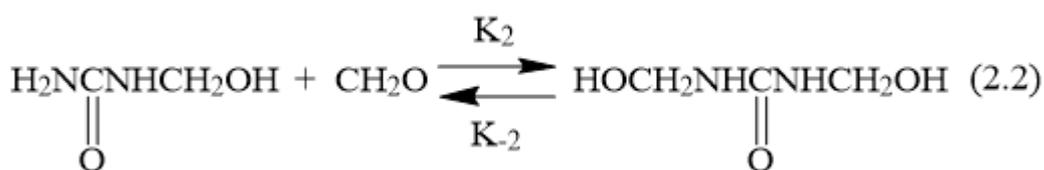
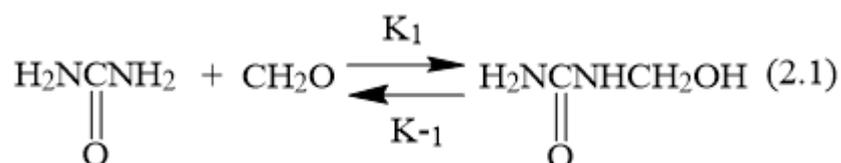
## 2 Технологическая схема установки синтеза смолы

В данном разделе бакалаврской работы освещается и рассматривается выбранная при обзоре литературы технологическая схема производства карбамидоформальдегидной смолы марки КФ-Ж. Для лучшего понимания принимаемых при проектировании производства решений в первую очередь необходимо рассмотреть химизм процесса поликонденсации карбамида с формальдегидом, что и было произведено в первом подпункте данного раздела.

### 2.1 Физико-химические закономерности синтеза смолы

Процесс поликонденсации карбамида с формальдегидом сильно зависит от условий протекания реакции, в результате которой могут получиться как индивидуальные кристаллические вещества, так и олигомеры в жидком состоянии или неплавкие и нерастворимые полимеры.

Теоретически, все четыре атома водорода в карбамиде могут быть замещены на молекулы формальдегида, однако реакциями с наиболее высокими константами равновесия являются получение моногидроксиметилкарбамида и сим-дигидроксиметилкарбамида:

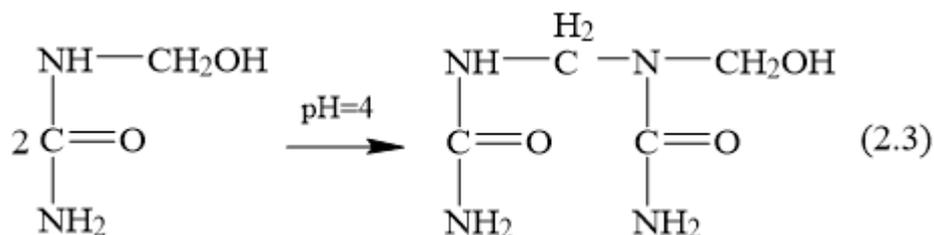


где  $K_1$ ,  $K_{-1}$ ,  $K_2$ ,  $K_{-2}$  – соответственно константы прямых и обратных реакций. Константы  $K_1$  и  $K_2$  равны соответственно  $1 \cdot 10^3$  и  $2,5 \cdot 10^2$  л/моль [1].

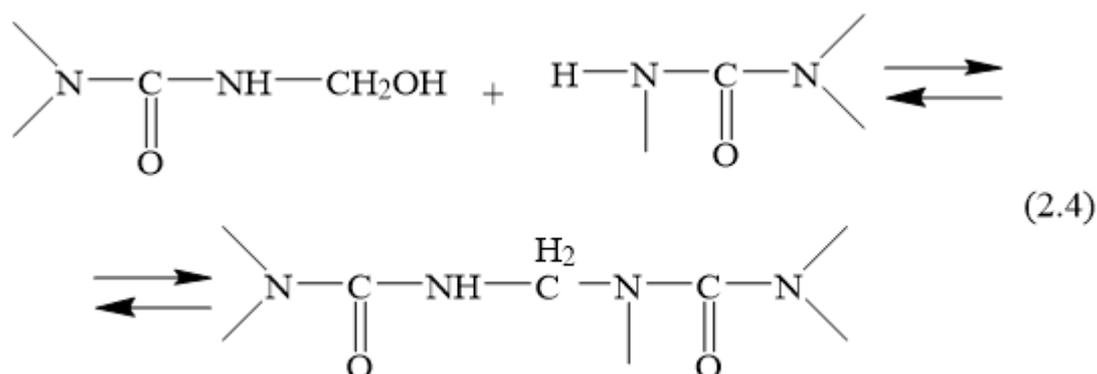
Данная реакция протекает в нейтральной либо слабощелочной среде по механизму нуклеофильного присоединения [1, 14]. Другие продукты получают в сравнительно малом количестве, а потому их наличием можно пренебречь.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Студент</i>		<i>Желнорович В.А.</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Беляев В.М.</i>			<i>Д</i>	23	5
<i>Конс.</i>					<i>Технологическая схема установки синтеза смолы</i>		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Руков. ООП</i>		<i>Краснокутская Е.А.</i>					

Следующей стадией процесса является соединение молекул производных карбамида с выделением воды. Процесс протекает в кислой среде и по различным механизмам, что связано с большей реакционной способностью моногидроксиметилкарбамида в сравнении с дигидроксиметилкарбамидом. Наиболее вероятный путь протекания процесса (константа скорости реакции составляет  $3,3 \cdot 10^{-4}$  моль/(л\*с) [1]) представлен ниже:



Продолжение конденсации в кислой среде приводит к дальнейшему образованию метильных мостиков между олигомерами:



Дальнейшее взаимодействие приводит к образованию линейных олигомерных продуктов, разветвления в которых незначительны.

В данном разделе следует особо отметить опасность образования метиленкарбамида вместо его гидроксиметильных производных. Подобное возможно в кислой среде. Данное соединение нестойко, из него образуются аморфные полимеры, не имеющие практического значения, оседающие твёрдым осадком на стенках аппаратов и засоряющие трубопроводы. Вследствие этого необходимым условием для проведения первой стадии поликонденсации является контроль pH среды и поддержание его в слабощелочном диапазоне.

## 2.2 Описание технологической схемы процесса

Технологическая схема производства карбамидоформальдегидных олигомеров отражена на рисунке 1 [1].

										Лист
										24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

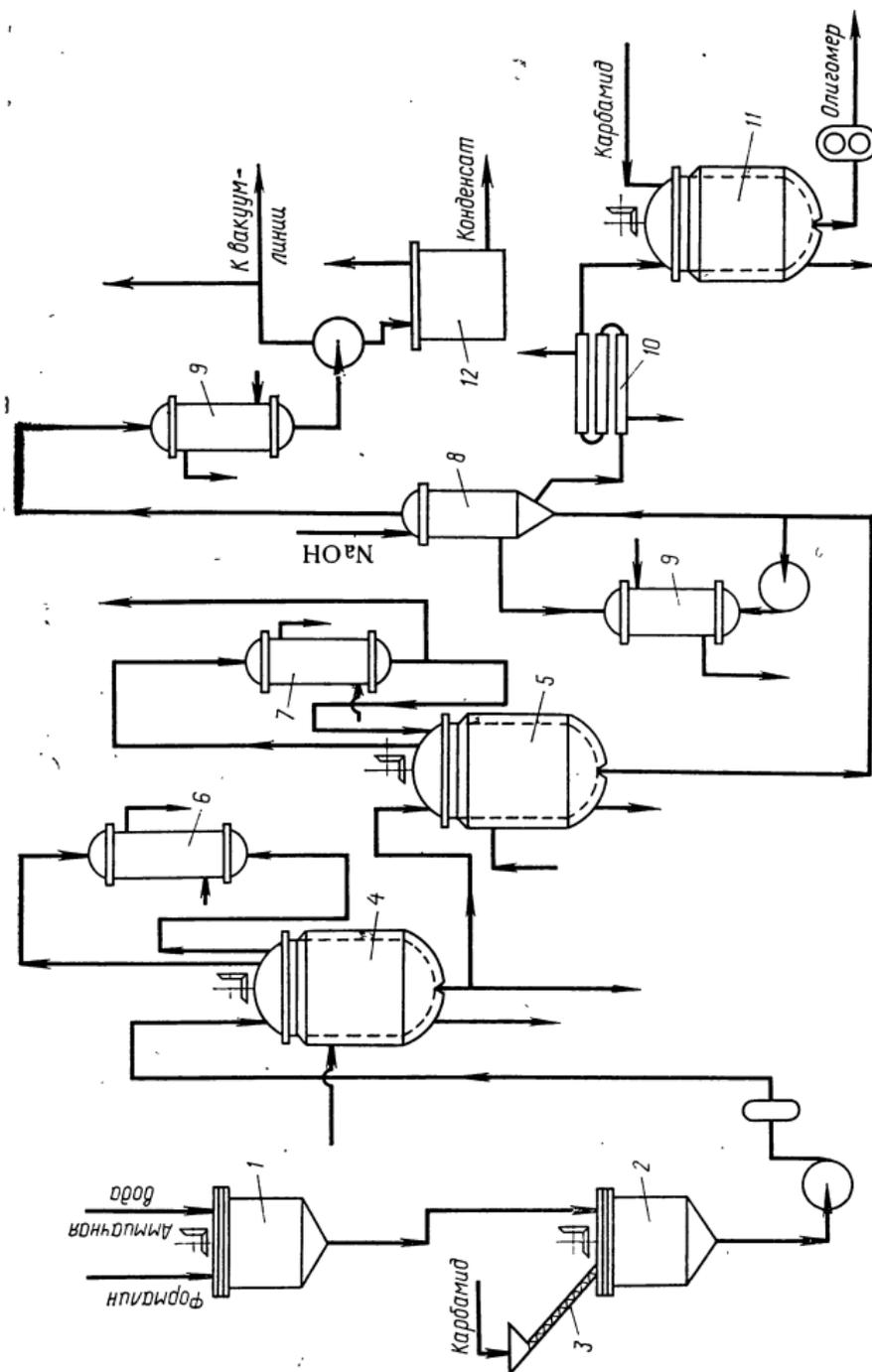


Рисунок 1 – Схема производства карбамидоформальдегидных олигомеров непрерывным способом

где: 1 – нейтрализатор; 2 – смеситель; 3 – шнековый дозатор; 4, 5, 11 – реакторы; 6, 7, 9, 10 – холодильники; 8 – выпарной аппарат; 12 – сборник конденсата [1].

Функционирует данная схема по следующему принципу:

- водный раствор формалина по фильтрам поступает в ёмкость 1, в которой производится корректировка pH среды в сторону слабощелочной; характеристика режима: pH от 7,8 до 8,5 [1];

- раствор из ёмкости 1 подаётся в смеситель 2, куда также посредством шнекового дозатора 3 поставляется карбамид. При этом мольное соотношение карбамида к формальдегиду должно составлять 1:1,9–2,0 [1]; характеристика режима: повышение рН до значений от 9,0 до 9,2 [1] вследствие добавления карбамида;
- смесь карбамида с формальдегидом из смесителя 2 поступает в расположенные последовательно реакторы 6 и 7, в которых протекает процесс поликонденсации; характеристика режима: снижение рН до значений от 5,0 до 5,5 в реакторе 6 и от 4,5 до 4,9 в реакторе 7, температурный диапазон – от 94 до 98°C, рабочее давление в аппарате – 0,065 МПа (слабый вакуум), общее время пребывания реакционной массы в двух аппаратах – от 35 до 40 минут [1];
- раствор поступает в выпарной аппарат 8, снабжённый прямыми холодильниками 9, где производится его нейтрализация 2%-м раствором гидроксида натрия; характеристика режима: рН повышается до значений от 7,5 до 8,5 [1];
- раствор олигомеров пропускается через систему холодильников 10; характеристика режима: производится охлаждение до значений от 60 до 70°C [1];
- раствор поступает в реактор 11 для доконденсации дополнительной порцией карбамида и снижения количества свободного формальдегида в продукте; характеристика режима: доконденсация проводится при температуре от 55 до 65°C, время пребывания реакционной массы в аппарате – 3 минуты [1];
- из реактора 11 олигомер, пройдя дополнительное охлаждение, поступает в стандартизатор, а затем отправляется на склад готовой продукции;
- конденсат из сборника 12 отводится для ректификации, в результате которой из него извлекают метанол и формальдегид.

## 2.3 Контроль и автоматизация параметров процесса

В соответствии с предложенной в работе технологической схемой должен быть осуществлён автоматический контроль следующих точек:

- приёмные ёмкости на позициях 1, 2 и 12 должны быть оборудованы уровнемерами с сигнализацией по нижнему уровню и блокировкой подачи растворов по верхнему уровню. Вследствие этого уровнемеры должны работать в связи с регуляторами расхода, которые следует установить на потоках формалина, аммиачной воды и карбамида;
- реакторы на позициях 4, 5 и 11 должны быть снабжены датчиками температуры, давления и уровня. Датчики давления и температуры должны образовывать

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		26

автоматическую систему, предназначенную для регулирования расхода пара, поступающего в рубашку реактора. Датчик уровня отвечает за регулирование расхода конденсационного раствора на входе в аппарат и должен быть снабжён сигнализацией по нижнему и блокировкой по верхнему пределу;

- холодильники на позициях 6, 7, 9, 10 должны быть оборудованы датчиками, контролирующими температуру на выходе из холодильника и соответственно регулируемыми расход воды для охлаждения;

- испаритель 8 необходимо укомплектовать регулятором уровня, связанным с клапаном подачи греющего пара, поддержание необходимого давления в аппарате должно осуществляться за счёт установки регулятора давления, подсоединённого к клапану на выходе из испарителя для сброса вторичного пара.

Все рекомендации, приведённые в данном подпункте, даны в соответствии с пособиями [15, 16].

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						27
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

### 3 Технологические расчёты реактора синтеза смолы

В данном разделе приведён технологический расчёт основного аппарата схемы, а именно – реактора для синтеза карбамидоформальдегидной смолы. Технологический расчёт состоит из следующих частей:

- материальный баланс реактора;
- гидродинамический расчёт реактора;
- тепловой расчёт реактора;
- конструктивный расчёт реактора;
- расчёт тепловой изоляции

В соответствии с этим целями технологического расчёта являются:

- для материального баланса – определение основных материальных потоков и объёма реактора, выбор соответствующего внутреннего диаметра;
- для гидродинамического расчёта – определение параметров гидродинамического режима аппарата в соответствии с процессом, выбор перемешивающего устройства, стойки, типа привода и мотор-редуктора;
- для теплового расчёта – определение основных тепловых потоков и требуемой поверхности теплообмена, выбор соответствующего теплообменного устройства;
- для конструктивного расчёта – выбор диаметров основных технологических штуцеров для ввода и отвода веществ;
- для расчёта тепловой изоляции – выбор материала для изоляции аппарата и определение толщины тепловой изоляции.

#### 3.1 Материальный баланс реактора синтеза смолы

Произведём расчёт материального баланса реактора.

3.1.1 Производительность аппарата по целевому продукту в час без учёта потерь:

$$P_{BC} = \frac{N}{D} \quad (3.1)$$

					<b>ФЮРА.061526.001 ПЗ</b>				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Технологические расчёты реактора для синтеза смолы</i>				
<i>Студент</i>	<i>Желнорович В.А.</i>			<i>Лит.</i>				<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>	<i>Беляев В.М.</i>			<i>Д</i>				<i>28</i>	<i>15</i>
<i>Конс.</i>									
<i>Н. Контр.</i>									
<i>Руков. ООП</i>	<i>Краснокутская Е.А.</i>								

где N – годовая производительность, т/год; Д – число дней согласно графику планово-предупредительных ремонтов.

В соответствии с техническим заданием имеем:

$$П_{БС} = \frac{56500 \cdot 1000}{333 \cdot 24} = 7069.57 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

3.1.2 Потери продукта в процессе работы примем равными 1,5%. Тогда производительность с учётом потерь составит:

$$П_{ПС} = \frac{П_{БС}}{1 - \frac{a}{100}} = \frac{7069.57}{\left(1 - \frac{1.5}{100}\right)} = 7177.23 \text{ кг/ч (3.2)}$$

где a – процент потерь, %.

На основании полученной производительности  $П_{ПС}$  и рецептуры, предложенной в пособии [1] был составлен материальный баланс для реактора поликонденсации, отраженный в таблице 1.

Таблица 1 – Материальный баланс стадии поликонденсации в щелочной среде

Приход	кг/час	% масс.	Расход	кг/час	% масс.
<b>Конденсационный раствор, в т.ч.:</b>			<b>Реакционная смесь, в т.ч.:</b>		
1.Карбамид	2476,14	34,50	1.Формальдегид	287,09	4,00
2.Формальдегид в т.ч.	2960,61	41,25	3.Вода в т.ч.	2224,94	31,00
- Метанол	195,40	6,60	- Метанол	195,40	8,78
3.Вода	1740,48	24,25	- Едкий натр	0,17	0,01
- Едкий натр	0,17	0,01	- Аммиак	2,44	0,11
- Аммиак	2,44	0,14	4.Смола	4665,20	65,00
Итого:	7177,23	100,00	Итого:	7177,23	100,00

3.1.3 Объем реактора в соответствии с производительностью аппарата в час и временем пребывания реагентов в реакторе [17]:

$$V_p = u \cdot \tau \quad (3.3)$$

где u – объемная скорость, м<sup>3</sup>/ч; τ – время пребывания смеси в реакторе, ч.

3.1.4 Объемная скорость [17]:

$$u = \frac{G}{\rho_{\text{см}} \cdot \varphi} \quad (3.4)$$

где  $G$  – расход по загрузке, кг/ч;  $\rho_{\text{см}}$  – плотность смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  – коэффициент заполнения аппарата.

3.1.5 Плотность смеси определяется по правилу аддитивности [17]:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\left[ \left( \frac{x_1}{\rho_1} \right) + \left( \frac{x_2}{\rho_2} \right) + \dots + \left( \frac{x_n}{\rho_n} \right) \right]} \quad (3.5)$$

где  $x_i$  – массовые доли компонентов в смеси;  $\rho_i$  – плотность компонента смеси, кг/м<sup>3</sup>.

Массовые доли компонентов принимаем согласно материальному балансу процесса.

Плотности веществ принимаем согласно справочнику [3] при температуре 25°C:

$x_1 = 0.39$	$\rho_1 = 815$		СН <sub>2</sub> О - формальдегид
$x_2 = 0.027$	$\rho_2 = 798$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	СН <sub>3</sub> ОН - метанол
$x_3 = 0.243$	$\rho_3 = 1000$		Н <sub>2</sub> О- вода
$x_4 = 0.345$	$\rho_4 = 1032$		СН <sub>4</sub> Н <sub>2</sub> О -карбамид

Тогда плотность смеси:

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1}{\frac{0.39}{815} + \frac{0.027}{798} + \frac{0.243}{1 \times 10^3} + \frac{0.345}{1.032 \times 10^3}} = 917.714 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

3.1.6 Расход по загрузке аппарата принимаем согласно материальному балансу  $G = 7177$  кг/ч, коэффициент заполнения аппарата принимаем равным  $\varphi = 0,75$ . Время пребывания смеси в реакторе согласно [1], составляет  $\tau = 1$  ч. Тогда объем реактора:

$$V_{\text{Р}} = \frac{7.177 \times 10^3}{917.714 \cdot 0.75} = 10.428 \text{ м}^3$$

Согласно пособию [17] рабочий объем реактора принимается на 15 – 20% больше чем расчетный. Из технических соображений выбираем конструкцию аппарата с эллиптической крышкой и днищем. Принимаем ближайший стандартный объем реактора согласно [18] равным 12,5 м<sup>3</sup>. Общая конструкция аппарата отражена на рисунке 2 [18].

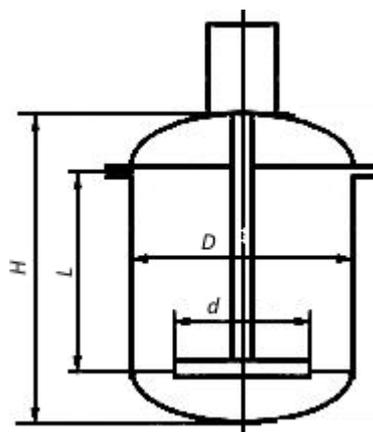


Рисунок 2 – Аппарат с мешалкой и эллиптическими крышкой и дном [18]  
 где  $D$  – внутренний диаметр аппарата, мм;  $H$  – общая высота аппарата, мм;  $L$  – длина обечайки, мм.

В соответствии с данным стандартом принимаем  $D$ ,  $H$  и  $L$  равными соответственно 1800, 5180 и 4200 мм.

### 3.2 Гидродинамический расчет аппарата без внутренних устройств

Целью гидродинамического расчета является определение усредненных характеристик поля скоростей в объеме аппарата, значений осевой и радиальной сил, действующих на мешалку, глубины воронки и мощности перемешивания.

Расчет производим согласно рекомендациям пособия [17].

Согласно пособию [17], при смешении в аппарате жидкостей повышенной вязкости рекомендуется использовать тихоходные мешалки. Примем для аппарата синтеза карбамидоформальдегидной смолы рамную мешалку в качестве перемешивающего устройства. Её конструкция отражена на рисунке 3 [19].

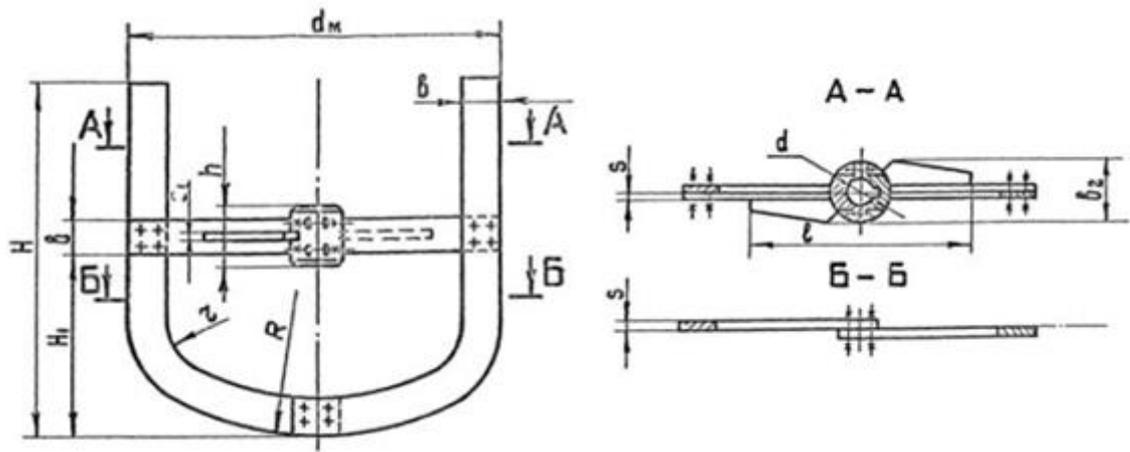


Рисунок 3 – Конструкция рамной мешалки [19]

где  $H$  – общая высота мешалки, мм;  $H_1$  – высота до места крепления ступицы, мм;  $h$  – ширина внутренней лопасти, мм;  $R$  – радиус кривизны, мм;  $b$  – ширина внешней лопасти, мм;  $d_M$  – диаметр мешалки, мм.

3.2.1 Отношение диаметра аппарата к диаметру мешалки [17]:

$$\Gamma_D = \frac{D}{d_M} \quad (3.6)$$

где  $d_M$  – диаметр мешалки, мм.

Примем для проектируемого аппарата диаметр мешалки, равный 1,5 м.

Тогда:

$$\Gamma_D = \frac{1.8}{1.5} = 1.2$$

3.2.2 Центробежный критерий Рейнольдса [17]:

$$Re_{\text{Ц}} = \frac{n \cdot d_M^2}{\nu} \quad (3.7)$$

где  $n$  – частота вращения мешалки,  $1/\text{с}$ ;  $\nu$  – кинематическая вязкость перемешиваемой среды,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $d_M$  – диаметр мешалки, мм.

Поскольку мешалка тихоходная, примем её частоту вращения  $n$  равной 31,5 об/мин или  $0,525 \text{ с}^{-1}$ .

3.2.3 Кинематическая вязкость вычисляется по формуле [17]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_{\text{см}}} \quad (3.8)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость суспензии,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\rho_{\text{см}}$  – плотность смеси,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

По источникам [1, 2] принимаем динамическую вязкость смеси равной 0,03 Па\*с, а плотность – 1153 кг/м<sup>3</sup>.

Тогда:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_{\text{см}}} = \frac{0.03}{1.153 \times 10^3} = 2.602 \times 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Отсюда имеем:

$$\text{Re}_{\text{ц}} = \frac{0.525 \cdot 1.5^2}{2.602 \times 10^{-5}} = 4.54 \times 10^4$$

3.2.4 Параметры высоты заполнения аппарата [17]:

$$\gamma = 1 \cdot \frac{H}{D} + p \quad (3.9)$$

где H - высота заполнения аппарата средой, м;

l = 8 - для аппаратов без внутренних устройств;

p = 1 - для аппаратов со свободной поверхностью жидкости;

С учетом стандартного объема аппарата и степени его заполнения при расчетном объеме имеем:

$$\gamma = 8 \cdot \frac{3.3}{1.8} + 1 = 15.667$$

3.2.5 Зависимость параметров распределения скоростей  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  друг от друга [17]:

$$\psi_2(\psi_1) = \Phi_1 - \Phi_2 \cdot \psi_1 \quad (3.10)$$

где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  – функции критерия  $\Gamma_D$ , рассчитываемые по формулам [17]:

$$\Phi_1 = \frac{7\Gamma_D - 6}{21\Gamma_D - 20} = 0.462 \quad \Phi_2 = \frac{28\Gamma_D - 27}{21\Gamma_D - 20} = 1.269$$

3.2.6 Параметр гидравлического сопротивления [17]:

$$E = \frac{\gamma}{\zeta_M \cdot z_M \cdot \text{Re}_{\text{ц}}^{0.25}} = \frac{15.667}{1.28 \cdot (4.54 \times 10^4)^{0.25}} = 0.839 \quad (3.11)$$

где  $\zeta_M$  – коэффициент сопротивления рамной мешалки, равный 1,28 [17];  $z_M$  – число мешалок на валу (конструктивно принимаем равным одной).

3.2.7 Параметр  $\Psi_1$  определяется по документу [20] и принимается равным –0,6.

Тогда:

$$\psi_2 = 0.462 - 1.269 \cdot (-0.6) = 1.223$$

										Лист
										33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

3.2.8 Параметр глубины воронки [17]:

$$B = -17.2 + \exp(3.33 - 0.2 \cdot \psi_1) = 14.3 \quad (3.12)$$

3.2.9 Глубина воронки [17]:

$$h_B = B \cdot \frac{\omega^2 \cdot d_M^2}{2g} = 14.3 \cdot \frac{0.525^2 \cdot 1.5^2}{2 \cdot 9.81} = 0.452 \text{ м} \quad (3.13)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения мешалки,  $\text{с}^{-1}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

3.2.10 Высота установки мешалки над днищем аппарата [21]:

$$H_M := (D - d_M) \cdot 1.25 = 0.375 \text{ м} \quad (3.14)$$

Как видно из расчёта, глубина воронки не достигает ступицы мешалки, а потому аппарат не нуждается в дополнительных отражательных перегородках.

3.2.11 Коэффициент мощности  $K_1$  [17]:

$$K_1 := (\psi_1 + \psi_2)^2 = (-0.6 + 1.223)^2 = 0.388 \quad (3.15)$$

3.2.12 Коэффициент мощности  $K_N$  [17]:

$$K_N := 3.87 \cdot \zeta_M \cdot K_1 = 3.87 \cdot 1.28 \cdot 0.388 = 1.923 \quad (3.16)$$

3.2.13 Мощность перемешивающего устройства [17]:

$$N := K_N \cdot \rho_{\text{см}} \cdot n^3 \cdot \frac{d_M^5}{1000} = 1.923 \cdot 1.153 \times 10^3 \cdot 0.525^3 \cdot \frac{1.5^5}{1 \times 10^3} = 2.437 \text{ кВт} \quad (3.17)$$

Согласно стандарту [20] для мешалок с  $\Gamma_D < 1,5$ , без внутренних устройств и при числах Рейнольдса больше 500 номинальная мощность привода берется на 100% больше расчетной. Тогда:

$$N = N \cdot 2 = 4.873 \text{ кВт}$$

3.2.14 По результатам расчета из ближайших нормативных значений справочника [21] выбираем привод типа П: вертикальный с одной промежуточной опорой, мотор редуктором типа ВО и электродвигателем серии АО2. Частота вращения вала  $n = 31,5$  об/мин, угловая скорость вращения  $\omega = 3,3 \text{ с}^{-1}$ . Номинальная мощность  $N_{\text{ном}} = 5.5$  кВт. Типоразмер мотор-редуктора – 15.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

### 3.3 Тепловой баланс реактора синтеза смолы

Целью теплового расчета аппарата является определение теплового потока  $Q_T$  через теплообменные устройства аппарата и последующее определение площади поверхности теплообмена  $F$ .

Тепловой расчет производится в соответствии с рекомендациями пособия [17].

3.3.1 Уравнение теплового баланса [17]:

$$\Sigma Q_{\text{пр}} = \Sigma Q_{\text{расх}} + Q_{\text{пот}} \quad (3.18)$$

где  $Q_{\text{пр}}$  – физическое тепло, вносимое в аппарат с материальными потоками (теплота реакции, фазовых переходов и т.д.);  $Q_{\text{расх}}$  – физическое тепло, уносимое из аппарата продуктами реакции;  $Q_{\text{пот}}$  – тепло теряемое в окружающую среду.

Согласно условиям процесса поликонденсации, к реакционной массе необходимо подводить тепло, дабы поддерживать температуру реакционной смеси равной  $95^{\circ}\text{C}$ . Предположим в качестве теплообменного устройства гладкую рубашку; примем в соответствии с технологическим режимом температуру пара в ней равной  $130^{\circ}\text{C}$  и давление  $0,2 \text{ МПа}$  [1]. В таких условиях пар будет конденсироваться при  $120^{\circ}\text{C}$  [3].

3.3.2 Требуемый тепловой поток [17]:

$$Q_i = K_i \cdot F_i \cdot \Delta T_{\text{ср},i} \quad (3.19)$$

где  $K_i$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $F_i$  – площадь поверхности теплообмена,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta T_{\text{ср},i}$  – средняя разность температур между перемешиваемой средой и теплоносителем,  $\text{К}$ .

3.3.3 Условие определение требуемого теплового потока [17]:

$$\Sigma Q_i \geq Q_T, \quad (3.20)$$

$$Q_T = Q_p + N + Q_M - Q_{\text{п}} \quad (3.21)$$

где  $Q_p$  – тепловой поток реакции,  $\text{Вт}$ ;  $Q_M$  – тепло, вводимое в аппарат с материальными потоками,  $\text{Вт}$ ;  $N$  – мощность, вводимая в аппарат перемешивающим устройством,  $\text{Вт}$ ;  $Q_{\text{п}}$  – потери тепла в окружающую среду,  $\text{Вт}$ .

3.3.4 Тепло вводимое в аппарат с материальным потоком,  $\text{Вт}$  [17]:

$$Q_M := Q_1 - Q_2 \quad (3.22)$$

где  $Q_1$  – количество тепла, приходящее с конденсационным раствором,  $\text{Вт}$ ;  $Q_2$  – количество тепла, уходящее с реакционной массой,  $\text{Вт}$ .

3.3.5 Расчет количества тепла  $i$ -го потока [17]:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$Q_i = \frac{G_i \cdot C_{p,i} \cdot T_i}{3.6} \quad (3.23)$$

где  $G_i$  – массовый расход  $i$ -го потока, кг/ч;  $C_{p,i}$  – теплоемкость  $i$ -той смеси, кДж/(кг\*К);  $T_i$  – температура потока, К.

3.3.6 Теплоемкости веществ определяем при помощи справочника [3]. В случае если поток состоит из нескольких веществ, теплоемкость определяется по правилу аддитивности, по следующей формуле:

$$C_{p,i} = x_1 \cdot C_{p,1} + x_2 \cdot C_{p,2} + \dots + x_n \cdot C_{p,n} \quad (3.24)$$

где  $x_{1,2,n}$  – массовая доля вещества в смеси;  $C_{p,1,2,n}$  – теплоемкость вещества при температуре процесса, кДж/(кг\*К).

Произведем расчет тепловых потоков, согласно их массовым расходам в материальном балансе:

- приход тепла с потоком конденсационного раствора (карбамид, формальдегид, метанол, вода) [3]:

$$C_{p,см} = 0.345 \cdot 0.37 + 0.385 \cdot 1.32 + 0.027 \cdot 1.63 + 0.243 \cdot 4.182 = 1.696 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$Q_1 := \frac{G_1 \cdot C_{p,см} \cdot T_1}{3.6} = \frac{7.177 \times 10^3 \cdot 1.696 \cdot 298}{3.6} = 1.008 \times 10^6 \text{ Вт}$$

- уход тепла с потоком реакционной смеси (смола, формальдегид, метанол, вода) [3]:

$$C_{p,рк} = 0.345 \cdot 1.9 + 0.04 \cdot 1.53 + 0.027 \cdot 1.96 + 0.31 \cdot 3.6 = 1.886 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$Q_2 := \frac{G_2 \cdot C_{p,рк} \cdot T_2}{3.6} = \frac{7.177 \times 10^3 \cdot 1.886 \cdot 368}{3.6} = 1.383 \times 10^6 \text{ Вт}$$

Тогда тепло, вводимое в аппарат с материальным потоком:

$$Q_M = 1.008 \times 10^6 - 1.383 \times 10^6 = -3.758 \times 10^5 \text{ Вт}$$

3.3.7 Реакция поликонденсации смолы эндотермическая. Количество поглощаемого тепла [17]:

$$Q_p := \frac{Q_m \cdot n}{3.6} \quad (3.25)$$

где  $Q_m = -25,14$  кДж/моль – теплота реакции поликонденсации смолы [3];  $n$  – количество моль продукта [17]:

									Лист
									36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

$$n = \frac{m}{M} \quad (3.26)$$

где  $m$  – масса продукта, взятая из материального баланса, кг;  $M$  – молекулярная масса наиболее часто образующегося продукта (дигидроксиметилкарбамид), кг/моль [1].

Отсюда:

$$n := \frac{4665.2}{0.12} = 3.888 \times 10^4 \text{ моль,}$$

$$Q_p = \frac{-25.14 \cdot 3.888 \times 10^4}{3.6} = -2.715 \times 10^5 \text{ Вт}$$

3.3.8 Мощность привода мешалки определена в предыдущем разделе и равна  $N = 5.5$  кВт = 5500 Вт. Количество потерь теплоты обычно принимается равным 3-5% от подводимого количества теплоты [17]:

$$Q_{\text{пот}} = 0.03 \cdot Q_1 = 3.023 \times 10^4 \text{ Вт}$$

Тогда значение теплового потока составит:

$$Q_T = -3.758 \times 10^5 + 5.5 \times 10^3 - 2.715 \times 10^5 - 3.203 \times 10^4 = -6.44 \times 10^5 \text{ Вт}$$

3.3.9 Коэффициент теплопередачи [17]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c} + \Sigma \left( \frac{\delta}{\lambda} \right) + \frac{1}{\alpha_T}} \quad (3.27)$$

где  $\alpha_c$  – коэффициент теплоотдачи от стенки теплообменного устройства перемешиваемой среде, Вт/(м<sup>2</sup>\*К);  $\alpha_T$  – коэффициент теплоотдачи от нагревательного агента стенке теплообменного устройства, Вт/(м<sup>2</sup>\*К);  $\Sigma(\delta/\lambda)$  – сумма термических сопротивлений стенки и загрязнений, рассчитываемая по формуле:

$$\Sigma \cdot \left( \frac{\delta}{\lambda} \right) = \frac{s}{\lambda} + \frac{s'}{\lambda'} \quad (3.28)$$

где  $s$  – толщина теплопередающей стенки, принимаемая равной 0,014 м по механическому расчёту;  $s'$  – толщина образовавшегося слоя накипи, принимаемая конструктивно равной 0,002 м [22];  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стали 08Х18Г8Н2Т, равный 21 Вт/(м\*К) [23];  $\lambda'$  – коэффициент теплопроводности накипи, принимаемый равным 2 Вт/(м\*К) [22].

3.3.10 Коэффициент теплоотдачи от стенки реакционной массе в аппарате при использовании тихоходных мешалок [17]:

										Лист
										37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

$$\alpha_c = 0.8 \cdot \left( \frac{K_N}{\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0.14} \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (3.29)$$

где  $Pe$  – критерий Пекле;  $\mu$  – вязкость реакционной массы, принимаемая по [2] равной 0,03 Па\*с;  $\mu_{ст}$  – вязкость реакционной массы при температуре стенки, принимаемая по [2] 0,0276 Па\*с;  $\lambda$  – теплопроводность смеси, 0,16 Вт/(м\*К) [3];  $D$  – внутренний диаметр аппарата, м.

Все параметры приняты в согласии со справочными данными [2, 3] с учётом температуры в реакторе.

3.3.11 Критерий Пекле [17]:

$$Pe = C \cdot \rho \cdot \omega \cdot \frac{D}{\lambda} \quad (3.30)$$

где  $C = 1900$  Дж/(кг\*К) – теплоемкость реакционной смеси [2];  $\rho = 1153$  кг/м<sup>3</sup> – плотность реакционной смеси [2];  $\omega = 0,525$  с<sup>-1</sup> – частота вращения мешалки.

Тогда:

$$Pe = 1.9 \times 10^3 \cdot 1.153 \times 10^3 \cdot 0.525 \cdot \frac{1.8}{0.16} = 1.294 \times 10^7$$

Отсюда:

$$\alpha_c = 0.8 \cdot \left( \frac{1.923}{\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot (1.294 \times 10^7)^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{0.03}{0.028} \right)^{0.14} \cdot \frac{0.16}{1.8} = 162.46 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

3.3.12 Средняя температура стенки [17]:

$$T_{ст} := 0.5 \cdot (T + T_K) = 0.5 \cdot (403 + 393) = 398 \text{ К}$$

где  $T = 403$  К – температура пара на входе в рубашку (принята конструктивно выше);  $T_K = 393$  К – температура конденсации пара (принята по [2] в соответствии с выбранным конструктивно давлением в рубашке).

3.3.13 Средняя температура конденсата [17]:

$$T_{к.ср} := 0.5 \cdot (T_{ст} + T_K) = 395.5 \text{ К}$$

3.3.14 Коэффициент теплоотдачи от пара в теплообменном устройстве к стенке аппарата [17]:

$$\alpha_T = \left[ \frac{1.15 \cdot \lambda_T^3 + \rho_T \cdot (\rho_T - \rho'_T) \cdot q \cdot \tau_T}{\mu_T \cdot (T_{ст} - T_K) \cdot H_p} \right]^{0.25} \quad (3.31)$$

										Лист
										38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

где  $\lambda_T = 0,686 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  – теплоемкость конденсата [22];  $\mu_T = 2.354 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – вязкость конденсата [22];  $\rho_T = 940 \text{ кг/м}^3$  – плотность конденсата [22];  $r_T = 2.2 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$  – теплота парообразования насыщенного пара [3];  $\rho'_T = 1,208 \text{ кг/м}^3$  – плотность насыщенного пара [3];  $H_p = 4.05 \text{ м}$  – высота цилиндрической части рубашки [18].

Все параметры определены по справочным данным [3, 18, 22] при средней температуре конденсата  $T_{к.ср}$ . Таким образом:

$$\alpha_T = \left[ \frac{1.15 \cdot 0.686^3 + 940 \cdot (940 - 1.208) \cdot 2.769 \times 10^4 \cdot 2.2 \times 10^6}{2.354 \times 10^{-4} \cdot (398 - 393) \cdot 4.05} \right]^{0.25} = 5.795 \times 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

3.3.15 Сумма термических сопротивлений стенки и загрязнений:

$$\Sigma \left( \frac{\delta}{\lambda} \right) := \frac{s}{\lambda} + 2 \left( \frac{s'}{\lambda'} \right) = \frac{0.014}{21} + 2 \cdot \frac{2 \times 10^{-3}}{2} = 2.667 \times 10^{-3} \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}$$

3.3.16 Коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{162.46} + \frac{1}{5.795 \times 10^4} + 2.667 \times 10^{-3}} = 113.131 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

3.3.17 Средний температурный напор [17]:

$$\Delta T_{ср} := T_K - T_{ср} = 393 - 368 = 25 \text{ К} \quad (3.32)$$

3.3.18 Площадь поверхности теплообмена:

$$F_{\text{тв}} := \frac{Q_T}{K \cdot \Delta T_{ср}} = \frac{6.44 \times 10^5}{113.131 \cdot 25} = 22.77 \text{ м}^2$$

3.3.19 В соответствии с конструкцией аппарата по стандарту [18] примем в качестве теплообменного устройства гладкую теплообменную рубашку конструкции: внутренний диаметр  $D_{руб} = 1950 \text{ мм}$ , толщина стенки  $s_{руб} = 8 \text{ мм}$  (из механического расчёта); высота цилиндрической части  $H_{руб} = 3770 \text{ мм}$ .

Поверхность теплообмена рубашки [17]:

$$F_{руб} = \pi \cdot (D_{руб} + 2 \cdot s_{руб}) \cdot H_{руб} \quad (3.33)$$

То есть:

$$F_{руб} = \frac{\pi \cdot (1950 + 2 \cdot 8) \cdot 3770}{10^6} = 23.285 \text{ м}^2$$

											Лист
											39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>						

Таким образом, поскольку поверхность теплообмена у рубашки больше, чем расчётная, позволительно в данном проекте использовать её в качестве теплообменного устройства.

3.3.20 Расход пара в рубашку для нагрева аппарата [17]:

$$G_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{T}} \cdot 3.6}{r_{\text{T}}} = \frac{6.44 \times 10^5 \cdot 3.6}{2.102 \times 10^3} = 1.103 \times 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \quad (3.34)$$

### 3.4 Конструктивный расчёт реактора синтеза смолы

Расчётный диаметр технологического штуцера [24]:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \omega \cdot \rho}} \quad (3.35)$$

где  $G$  – массовый расход потока, кг/с;  $\omega$  – скорость потока, м/с;  $\rho$  – плотность поступающего вещества, кг/м<sup>3</sup>.

Массовые расходы веществ определены в рамках материального баланса аппарата. Скорости потоков в соответствии с рекомендациями [24] принимаются в интервале от 0,5 и до 2 м/с для жидкостей и от 10 до 30 м/с для газообразных веществ. Плотности веществ в потоках принимаются по данным справочника [3]. Размеры стандартных штуцеров примем в соответствии с документом [25].

Для удобства систематизируем данные в таблице 2.

Таблица 2 – Расчёт диаметров технологических штуцеров

Обозначение	Назначение	$G$ , кг/с	$w$ , м/с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$d$ , м	$D_y$ , мм [25]	$s$ , мм [25]	$l$ , мм [25]
А	Ввод исходной смеси в реактор	1,994	0,5	917,7	74	80	4	215
Б	Отвод паров воды из реактора	0,486	20	0,5	249	250	8	220
В	Отвод продукта из реактора	1,994	0,5	1153	66	80	4	215
Г	Ввод пара в рубашку	0,306	15	1,5	132	150	6	215
Д	Отвод конденсата из рубашки	0,306	0,5	943,1	29	32	4	215
Е	Установка датчика давления	—	—	—	—	25	4	215

Продолжение таблицы 2

Обозначение	Назначение	G, кг/с	w, м/с	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	d, м	D <sub>y</sub> , мм [25]	s, мм [25]	l, мм [25]
Ж	Установка датчика температуры	—	—	—	—	25	4	215
Л	Люк-лаз	—	—	—	—	500	12	270

где D<sub>y</sub> – условный проход штуцера, мм; s – толщина стенки штуцера, мм; l – длина штуцера, мм. Все три величины приняты в соответствии с документом [25].

Таким образом, для реактора синтеза карбамидоформальдегидной смолы были выбраны необходимые технологические штуцера. Дополнительные рекомендации по необходимости и методам укрепления отверстий для этих штуцеров будут даны в рамках механического расчёта.

### 3.5 Расчёт тепловой изоляции реактора синтеза смолы

В соответствии с пособием [24] толщину тепловой изоляции находят по равенству удельных тепловых потоков через слой изоляции от поверхности изоляции в окружающую среду:

$$\alpha_{\text{в}} \cdot (t_{\text{ст2}} - t_{\text{в}}) = \frac{\lambda_{\text{и}}}{\delta_{\text{и}}} \cdot (t_{\text{ст1}} - t_{\text{ст2}}) \quad (3.36)$$

где  $\alpha_{\text{в}}$  – коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности изоляционного материала в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>\*К) [24]:

$$\alpha_{\text{в}} = 9.3 + 0.058 \cdot t_{\text{ст2}} \quad (3.37)$$

$t_{\text{ст2}}$  – температура изоляции со стороны окружающей среды (воздуха), принимаемая для аппаратов, расположенных в закрытом помещении в интервале от 35 до 45°С;  $t_{\text{ст1}}$  – температура изоляции со стороны аппарата, принимаемая равной средней температуре среды в аппарате, °С;  $t_{\text{в}}$  – температура окружающей среды (воздуха), °С;  $\lambda_{\text{и}}$  – коэффициент теплопроводности материала изоляции, Вт/(м\*К).

3.5.1 Выберем в качестве материала для теплоизоляции совелит (85% магнезии + 15% асбеста), имеющий коэффициент теплопроводности 0,098 Вт/(м\*К). Тогда, приняв  $t_{\text{ст2}}$  равной 40,  $t_{\text{ст1}}$  – 95, а  $t_{\text{в}}$  – 30 °С, получим:

$$\alpha_{\text{в}} = 9.3 + 0.058 \cdot 40 = 11.62 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\delta_{\text{и}} = \frac{0.098 \cdot (95 - 40)}{[11.62 \cdot (40 - 30)]} = 0.046 \text{ м}$$

3.5.2 Таким образом, принимаем толщину совелитовой изоляции равной 46 мм.

### 3.6 Выводы по результатам технологических расчётов

В рамках технологического расчёта были приняты следующие конструктивные решения:

- по материальному балансу – выбран реактор объёмом 12,5 м<sup>3</sup>, внутренним диаметром 1800 мм, высотой 5180 мм и длиной цилиндрической обечайки 4200 мм;
- по гидравлическому расчёту – была выбрана тихоходная рамная мешалка с диаметром 1500 мм, частотой вращения 31,5 об/мин. Для этой мешалки был подобран вертикальный привод типа П с промежуточной опорой, мотор-редуктор типа ВО и электродвигатель серии АО2. Номинальная мощность привода равна 5,5 кВт;
- по тепловому расчёту – выбрана гладкая теплообменная рубашка с внутренним диаметром 1950 мм, толщиной стенки 8 мм, высотой цилиндрической части 3770 мм и поверхностью теплообмена 23,285 м<sup>2</sup>;
- по конструктивному расчёту – выбраны стандартные технологические штуцера для всех потоков, входящих в аппарат и выходящих из него, датчиков давления и температуры, а также определён штуцер под люк-лаз;
- по расчёту тепловой изоляции – принято решение установить реактор в помещении ввиду его малых габаритов; для реактора принята совелитовая изоляция слоем толщиной 46 мм.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 4 Выбор конструкционных материалов

Основными требованиями, которым должны отвечать химические аппараты, являются механическая надежность, долговечность, конструктивное совершенство, простота изготовления, удобство транспортирования, монтажа и эксплуатации. Поэтому к конструкционным материалам проектируемой аппаратуры, согласно с [26], предъявляют следующие требования:

- высокая коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах при рабочих параметрах процесса;
- высокая механическая прочность при заданных рабочих давлениях, температуре и дополнительных нагрузках, возникающих при прочностных испытаниях и эксплуатации аппаратов;
- хорошая свариваемость материалов, обеспечение высокой механической прочности сварных соединений;
- низкая стоимость и доступность материалов.

Кроме того, при выборе конструкционных материалов необходимо учитывать физические свойства материалов (теплопроводность, линейное расширение и т. д.).

Для проведения конструктивно-механического расчёта аппарата необходимо определить материал следующих его частей:

- детали, подверженные коррозионному воздействию реакционной среды находящейся в аппарате (корпус, днище, фланец, крышка, соответствующие штуцеры, мешалка, вал и его уплотнение);
- детали, подверженные коррозионному воздействию пара (рубашка, отдельные части корпуса и днища, соответствующие штуцеры);
- крепёжные элементы, не контактирующие с реакционной средой или греющим паром (болты, гайки, шайбы);
- прокладки (в частности, прокладка во фланце).

В результате анализа различных литературных источников, рекомендаций и стандартов можно прийти к следующим выводам:

- для элементов, контактирующих с реакционной массой принять в соответствии

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Студент</i>		<i>Желнорович В.А.</i>			<i>Выбор конструкционных материалов</i>			
<i>Руковод.</i>		<i>Беляев В.М.</i>						
<i>Конс.</i>								
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Руков. ООП</i>		<i>Краснокутская Е.А.</i>						
					<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>	
					<i>Д</i>		<i>43</i>	<i>6</i>

с рекомендациями [26, 27] назначить сталь 08X18Г8Н2Т в качестве конструкционного материала. Данная сталь является достаточно надёжной для работы в агрессивных средах с высокой коррозионной активностью, является заменителем стали 12Х18Н10Т и способна работать при температуре до 300°С, что вполне соответствует технологическим условиям процесса;

- для теплообменной рубашки, контактирующей только с паром, по рекомендации [26] позволительно использовать сталь 12ХМ, поскольку температурный диапазон её применимости соответствует условиям протекания технологического процесса;
- для крепёжных деталей (болтов, гаек, шайб) в соответствии с пособием [26] позволительно использовать сталь 20, поскольку она рекомендована для данных изделий, а температурный диапазон её применимости также соответствует технологическому режиму. Крепёжные элементы не контактируют с коррозионными и агрессивными средами, что также является аргументом в пользу использования данной стали;
- для изготовления прокладок по рекомендации [21] предлагается использовать фторопласт-4 как материал, устойчивый в средах средней и высокой агрессивности, а также соответствующий температурному режиму протекания процесса в реакторе.

Для дальнейшего расчёта аппарата необходимо определить основные показатели его конструкционных материалов. Схема расчёта продемонстрирована на примере стали 08X18Г8Н2Т, показатели по остальным материалам будут приведены в конце раздела.

#### 4.1 Расчёт основных характеристик материала

Средами, воздействующими на стенку цилиндрической обечайки корпуса аппарата, являются пар и реакционная масса с температурами 130 и 95°С соответственно. Расчётная температура определяется из условия [28]:

$$t_p := \max(t_n, 20) \quad (4.1)$$

где  $t_p$  – расчётная температура, °С;  $t_n$  – рабочая температура, °С [28].

В соответствии с данным условием примем значение рабочей температуры стенки цилиндрической обечайки равным 130°С.

4.1.1 Допускаемое напряжение для сталей аустенитного и аустенито-ферритного класса [28]:

$$\sigma_d = \eta \cdot \min \left( \frac{R_{p.02.t}}{n_T}, \frac{R_{m.t}}{n_B} \right) \quad (4.2)$$

									Лист
									44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

где  $\sigma_d$  – допускаемое напряжение, МПа;  $\eta$  – поправочный коэффициент к допускаемым напряжениям;  $R_{p0,2/t}$  – минимальное значение условного предела текучести при остаточном удлинении 0,2% при расчётной температуре, МПа;  $R_{m/t}$  – минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при расчетной температуре, МПа;  $n_T$  – коэффициент запаса прочности по пределу текучести;  $n_b$  – коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению [28].

Поправочный коэффициент  $\eta$  принимается равным 1, поскольку обечайка изготавливается из листового проката, а не из отливки. Коэффициенты запаса прочности по пределу текучести и временному сопротивлению  $n_T$  и  $n_b$  в соответствии с [28] принимаются равными 1,5 и 3 (хромоникелевая сталь). Предел текучести и временное сопротивление  $R_{p0,2/t}$  и  $R_{m/t}$  принимаются по таблицам Б.5 и Б.6 методом линейной интерполяции:

$$R_{p.02.t} = \text{Floor}\left(\text{linterp}(t, R_{p.02.t}, t_p), 0.5\right) \quad (4.3)$$

где  $t$  – температурный диапазон, °С; Floor и linterp – функции округления и линейной интерполяции.

Таким образом:

$$R_{p.02.130} = \text{Floor}\left[\text{linterp}\left[\left(\begin{matrix} 100 \\ 150 \end{matrix}\right), \left(\begin{matrix} 328 \\ 314 \end{matrix}\right), 130\right], 0.5\right] = 319.5 \text{ МПа,}$$

$$R_{m.130} = \text{Floor}\left[\text{linterp}\left[\left(\begin{matrix} 100 \\ 150 \end{matrix}\right), \left(\begin{matrix} 535 \\ 495 \end{matrix}\right), 130\right], 0.5\right] = 511 \text{ МПа}$$

Тогда по формуле (4.2):

$$\sigma_d = 1 \cdot \min\left(\frac{319.5}{1.5}, \frac{511}{3}\right) = 170 \text{ МПа}$$

Для условий гидравлических испытаний коэффициент запаса прочности  $n_T$  принимается равным 1,1. Значение предела текучести берётся из той же таблицы Б.6, но, в соответствии со стандартом [28], при 20°С, так как именно при такой температуре проводятся испытания.

Допускаемое напряжение при гидравлическом испытании [28]:

$$\sigma_{d.20} = \eta \cdot \frac{R_{p.02.20}}{n_T} \quad (4.4)$$

Тогда:

$$\sigma_{d.20} = 1 \cdot \left(\frac{350}{1.1}\right) = 318 \text{ МПа}$$

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4.1.2 Модуль продольной упругости определяется по таблице В.1 стандарта [28] по формуле линейной интерполяции, сходной с (4.2). Значения модуля на границах температурного диапазона берутся из таблицы. Таким образом, для рабочих условий:

$$E = \text{Floor} \left[ \text{linterp} \left[ \left( \begin{matrix} 100 \\ 150 \end{matrix} \right), \left( \begin{matrix} 2,00 \cdot 10^5 \\ 1,99 \cdot 10^5 \end{matrix} \right), 130 \right], 0,5 \right] = 1,99 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Модуль продольной упругости для условий гидравлических испытаний принимается по таблице равным  $2 \cdot 10^5$  МПа.

4.1.3 Коэффициент линейного расширения  $\alpha$  определяется по таблице Г.1 стандарта [28] и принимается для выбранной стали равным  $13,1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Так как данный коэффициент указывается для температурного диапазона от 20 до  $200^\circ\text{C}$ , позволительно использовать его как для рабочих условий, так и для условий гидравлических испытаний.

## 4.2 Заключение по выбору конструкционных материалов

Основные характеристики конструкционных материалов приведены в сводной таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики выбранных конструкционных материалов

Марка стали	t, °C	$\sigma_d$ , МПа	E, МПа	$\alpha$ , °C <sup>-1</sup>
08X18Г8Н2Т	20	318	$2 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
	91,2	208,5	$1,99 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
	95	207,5	$1,99 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
	130	170	$1,99 \cdot 10^5$	$16,6 \cdot 10^{-6}$
15ХМ	20	147	$2,10^5$	$12,6 \cdot 10^{-6}$
	130	146	$2,03 \cdot 10^5$	$12,6 \cdot 10^{-6}$
20	20	147	$1,99 \cdot 10^5$	$11,6 \cdot 10^{-6}$
	80,75	143	$1,91 \cdot 10^5$	$11,6 \cdot 10^{-6}$

Отдельно зафиксируем следующие данные по фторопласту-4 в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики выбранных неметаллических конструкционных материалов

Материал	$\sigma_{ср}$ , МПа	$E_{ср}$ , МПа	$\alpha$ , °C <sup>-1</sup>	
фторопласт-4	11,8	686	$15 \cdot 10^{-5}$	$25 \cdot 10^{-5}$

где  $\sigma_{ср}$  – разрушающее напряжение, МПа,  $E_{ср}$  – модуль упругости на сжатие, МПа.

Характеристики сталей даны по стандарту [28], фторопласта – по стандарту [29].

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 4.3 Определение прибавок к толщине на различные разрушения

В соответствии с пособием [21] прибавка к толщине обечайки, крышки днища и т.д. рассчитывается как сумма прибавок на различные виды разрушений. Выделим в формуле три основных слагаемых:

$$c = c_k + c_э + c_d \quad (4.5)$$

где  $c_k$  – прибавка к толщине стенки на коррозию, мм;  $c_э$  – прибавка к толщине стенки на эрозию, мм;  $c_d$  – прибавка к толщине стенки на другие виды разрушений, мм [21].

Прибавка к толщине стенки на коррозию рассчитывается по формуле:

$$c_k = П \cdot T_э \quad (4.6)$$

где П – глубинный показатель коррозии стали, мм/год;  $T_э$  – срок эксплуатации аппарата, год.

Значительным коррозионным разрушениям подвержены детали, изготовленные из сталей 08X18Г8Н2Т и 12ХМ ввиду контакта с реакционной массой и паром. Показатели глубинной коррозии этих сталей П равными 0,1 мм/год [21]. По пособию [21] принимаем срок эксплуатации  $T_э$  равным 20 годам. Таким образом, для сталей:

$$c_k = 0.1 \cdot 20 = 2 \text{ мм}$$

По рекомендации пособия [21] пренебрежём прибавками к толщине на эрозию и дополнительные виды разрушений и примем общие прибавки для рубашки и обечайки равными 2 мм.

### 4.4. Выводы по выбору конструкционных материалов

В соответствии с рекомендациями литературных источников в рамках данного раздела были произведены следующие решения:

- принять сталь 08X18Г8Н2Т в качестве материала для изготовления корпуса, концевых элементов, фланцевого соединения, штуцеров и перемешивающего устройства аппарата;
- принять сталь 12ХМ в качестве материала для изготовления теплообменной рубашки;
- принять сталь 20 в качестве материала для изготовления крепёжных элементов фланцевых соединений;
- принять фторопласт-4 в качестве материала для прокладки во фланцевом соединении;

									Лист
									47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

- принять единую для сталей прибавку на различные виды разрушений, равную 2 мм.

Характеристики материалов, необходимые для проведения механического расчёта, приведены в таблицах 3 и 4, к которым можно будет обращаться впоследствии.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		48

## 5 Механический расчёт реактора синтеза смолы

Целью механического расчёта химического реактора является определение конструктивных размеров различных элементов аппарата и их проверка их надёжности как в рабочих условиях, так и в условиях испытаний. Данные критерии разнятся от элемента к элементу, а потому будут предварительно оговариваться в каждом подпункте настоящего раздела.

Расчётная модель реактора для синтеза карбаминоформальдегидной смолы для удобства вынесена в виде Приложения А.

### 5.1 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки

Название элемента – цилиндрическая обечайка. Номер позиции на расчётной модели – 6:

Расчётные схемы цилиндрической обечайки представлены на рисунках 4 и 5.

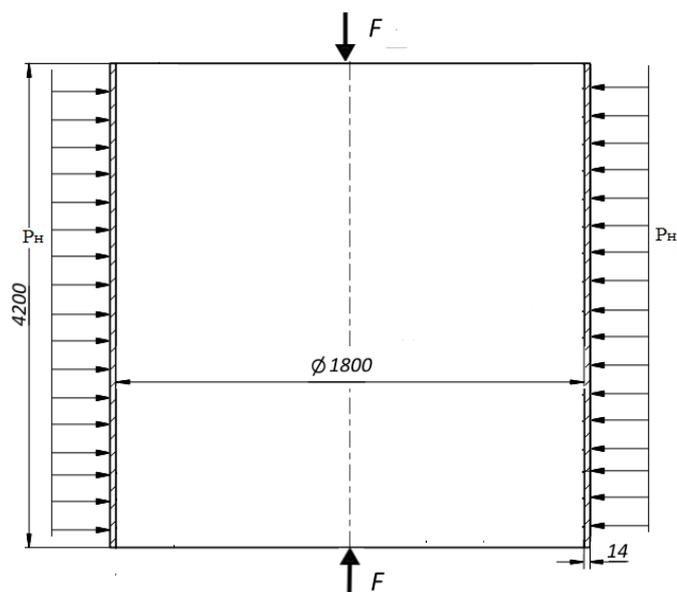


Рисунок 4 – Расчётная схема цилиндрической обечайки при рабочих условиях где  $p_n$  – наружное расчётное давление, МПа;  $F$  – осевая сжимающая сила, Н.

					<b>ФЮРА.061526.001 ПЗ</b>		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Студент		Желнорович В.А.			Механический расчёт реактора синтеза смолы		
Руковод.		Беляев В.М.					
Конс.		Беляев В.М.					
Н. Контр.							
Руков. ООП		Краснокутская Е.А.					
					Лит.	Лист	Листов
					Д		49 / 73

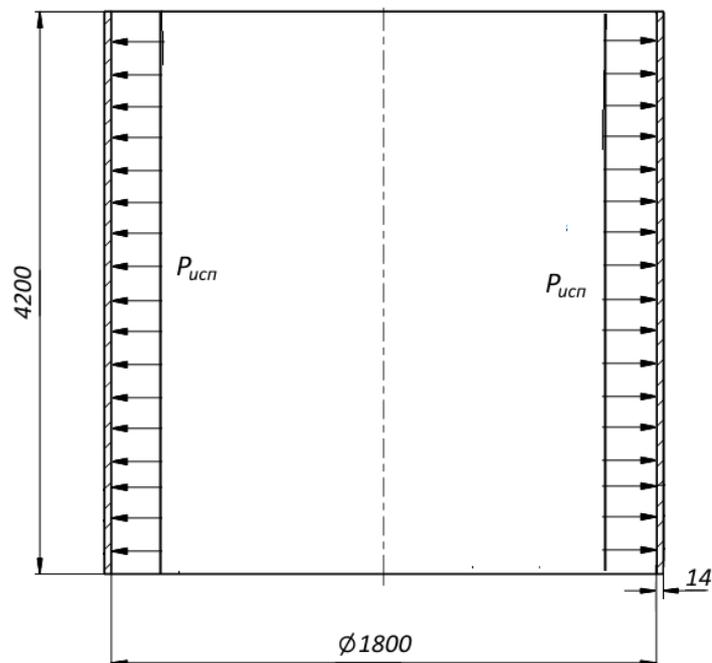


Рисунок 5 – Расчётная схема цилиндрической обечайки при гидравлических испытаниях

где  $p_{исп}$  – пробное давление гидравлических испытаний, МПа.

*Исходные данные для расчёта:*

- внутренний диаметр обечайки, мм,  $D = 1800$ ;
- длина корпуса, нагруженная наружным давлением, мм,  $l = 4050$ ;
- высота отбортованной части днища, мм,  $h_0 = 40$ ;
- внутренняя высота выпуклой части днища, мм,  $H = 450$ ;
- наружное расчётное давление, МПа,  $p = 0,14$ ;
- внутреннее давление гидравлического испытания, МПа,  $p_{и} = 0,2$  (для аппаратов под разрежением в соответствии с рекомендацией [30]);
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 170$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т для условий гидравлических испытаний, МПа,  $\sigma_{д,20} = 318$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- модуль продольной упругости стали 08X18Г8Н2Т для рабочих условий, МПа,  $E = 1,99 \cdot 10^5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- модуль продольной упругости стали 08X18Г8Н2Т для условий гидравлических испытаний, МПа,  $E_{и} = 2 \cdot 10^5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]).

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки цилиндрической обечайки, чтобы была обеспечена прочность и устойчивость данной конструкции. Проверкой устойчивости для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$\frac{p}{p_d} + \frac{F}{F_d} \leq 1.0 \quad (5.1)$$

где  $p$  и  $F$  – расчётные значения наружного давления и осевого сжимающего усилия при рабочих условиях, МПа и Н соответственно;  $p_d$  и  $F_d$  – допускаемые значения наружного давления и осевого сжимающего усилия при рабочих условиях, МПа и Н соответственно [31].

Проверкой прочности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{и} \leq p_{д.и} \quad (5.2)$$

где  $p_{и}$  – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа;  $p_{д.и}$  – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [31].

5.1.1 Расчётная толщина цилиндрической обечайки, нагруженной наружным давлением при рабочих условиях:

$$s_p = \max \left[ 1.06 \cdot \left[ \frac{(10^{-2} \cdot D)}{B} \right] \cdot \left[ \left( \frac{p}{10^{-5} \cdot E} \right) \cdot \left( \frac{l_p}{D} \right)^{0.4} \right], \frac{(1.2 \cdot p \cdot D)}{2 \cdot \sigma_d - p} \right] \quad (5.3)$$

где  $D$  – внутренний диаметр обечайки, мм;  $p$  – расчётное давление, МПа;  $E$  – модуль продольной упругости, МПа;  $l_p$  – расчётная длина гладкой обечайки, мм;  $\sigma_d$  – допускаемое напряжение материала обечайки, МПа [31],  $B$  – безразмерный коэффициент [31]:

$$B = \max \left[ 1, 0.47 \cdot \left( \frac{p}{10^{-5} \cdot E} \right)^{0.067}, \left( \frac{l_p}{D} \right)^{0.4} \right] \quad (5.4)$$

Расчётная длина гладкой обечайки с выпуклым днищем:

$$l_p = l + h_0 + \frac{H}{3} \quad (5.5)$$

где  $l$  – длина обечайки, находящаяся под действием наружного давления, мм;  $h_0$  – высота отбортованной части днища, мм;  $H$  – внутренняя высота выпуклой части днища, мм [32].

Тогда:

$$l_p = 4050 + 40 + \frac{450}{3} = 4240 \text{ мм,}$$

										Лист
										51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

$$B = \max \left[ 1, 0.47 \cdot \left[ \frac{0.14}{10^{-5} \cdot (1.99 \cdot 10^5)} \right]^{0.067}, \left( \frac{4240}{1800} \right)^{0.4} \right] = 1.409 ,$$

$$s_p = \max \left[ 1.06 \cdot \left( \frac{10^{-2} \cdot 1800}{1.411} \right), \left[ \frac{0.14}{10^{-5} \cdot (1.99 \cdot 10^5)} \right] \cdot \left( \frac{4240}{1800} \right)^{0.4}, \frac{1.2 \cdot 0.14 \cdot 1800}{(2 \cdot 170 - 0.14)} \right] = 6.589 \text{ мм}$$

5.1.2 Расчётная толщина стенки цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним давлением при гидравлическом испытании:

$$s_{p.и} = \frac{p_{и} \cdot D}{2 \cdot \sigma_{д.20} \cdot \phi - p_{и}} \quad (5.6)$$

где  $p_{и}$  – внутреннее избыточное давление при гидравлических испытаниях, МПа;  $\sigma_{д.20}$  – допускаемое напряжение материала обечайки при гидравлических испытаниях, МПа;  $\phi$  – коэффициент прочности сварного шва [31].

Коэффициент прочности сварного шва по таблице Д.1 стандарта [28] принимаем равным 1. Продольная сварка обечайки должна осуществляться автоматической сваркой с двухсторонним сплошным проваром, а длина контролируемых швов должна составить 100%.

Тогда:

$$s_{p.и} = \frac{0.2 \cdot 1800}{(2 \cdot 318 \cdot 1 - 0.2)} = 0.566 \text{ мм}$$

5.1.3 Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки:

$$s \geq s_p + c \quad (5.7)$$

где  $c$  – прибавка на различные виды разрушений, мм [31].

Тогда:

$$s \geq 6.589 + 2 = 8.589 \text{ мм}$$

Для соблюдения условий устойчивости и обеспечения надёжности конструкции примем исполнительную толщину стенки цилиндрической обечайки равной 14 мм.

5.1.4 Допускаемое наружное давление для рабочих условий:

$$p_{д} = \frac{p_{д.п}}{\sqrt{1 + \left( \frac{p_{д.п}}{p_{д.е}} \right)^2}} \quad (5.8)$$

где  $p_{д.п}$  – допускаемое наружное давление из условия прочности, МПа;  $p_{д.е}$  – допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, МПа [31].

Допускаемое давление из условия прочности [31]:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

$$P_{д.п} = \frac{[2 \cdot \sigma_{д} \cdot (s - c)]}{D + (s - c)} \quad (5.9)$$

Тогда:

$$P_{д.п} = \frac{2 \cdot 170 \cdot (14 - 2)}{[1800 + (14 - 2)]} = 2.815 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости [31]:

$$P_{д.Е} = \left[ \frac{(2.08 \cdot 10^{-5} \cdot E)}{n_y \cdot B_1} \right] \cdot \left( \frac{D}{l_p} \right) \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s - c)}{D} \right]^{2.5} \quad (5.10)$$

где  $n_y$  – коэффициент запаса устойчивости, принимаемый по [28] равным 2,4 для рабочих условий;  $B_1$  – безразмерный коэффициент [31]:

$$B_1 = \min \left[ 1.0, 9.45 \cdot \left( \frac{D}{l_p} \right) \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (s - c)}} \right] \quad (5.11)$$

Тогда:

$$B_1 = \min \left[ 1.0, 9.45 \cdot \left( \frac{1800}{4240} \right) \cdot \sqrt{\frac{1800}{[100 \cdot (14 - 2)]}} \right] = 1 ,$$

$$P_{д.Е} = \frac{2.08 \cdot 10^{-5} \cdot (1.99 \cdot 10^5)}{(2.4 \cdot 1)} \cdot \left( \frac{1800}{4240} \right) \cdot \left[ \frac{100 \cdot (14 - 2)}{1800} \right]^{2.5} = 0.266 \text{ МПа},$$

$$P_{д} = \frac{2.815}{\sqrt{1 + \left( \frac{2.815}{0.266} \right)^2}} = 0.265 \text{ МПа}$$

5.1.5 Допускаемое давление для условий испытания [31]:

$$P_{д.и} = \frac{[2 \cdot \sigma_{д} \cdot 20 \cdot \phi \cdot (s - c)]}{D + (s - c)} \quad (5.12)$$

Тогда:

$$P_{д.и} = \frac{2 \cdot 318 \cdot 1 \cdot (14 - 2)}{[1800 + (14 - 2)]} = 4.212 \text{ МПа}$$

5.1.6 Осевое сжимающее усилие при рабочих условиях [32]:

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (D + 2 \cdot s)^2 \cdot p \quad (5.13)$$

Тогда:

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot (1800 + 2 \cdot 14)^2 \cdot 0.14 = 3.674 \times 10^5 \text{ Н}$$

										Лист
										53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

5.1.7 Допускаемое осевое сжимающее усилие:

$$F_{\text{д}} = \frac{F_{\text{п}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{Е}}}\right)^2}} \quad (5.14)$$

где  $F_{\text{п}}$  – допускаемое осевое сжимающее усилие исходя из условия прочности, Н;  $F_{\text{Е}}$  – допускаемое осевое сжимающее усилие исходя из условия устойчивости в пределах упругости, Н [31].

Допускаемое осевое сжимающее усилие исходя из условия прочности [31]:

$$F_{\text{п}} = \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot \sigma_{\text{д}} \quad (5.15)$$

Тогда:

$$F_{\text{п}} = \pi \cdot (1800 + 14 - 2) \cdot (14 - 2) \cdot 170 = 1.452 \times 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие, исходя из условия устойчивости в пределах упругости [31]:

$$F_{\text{Е}} = \min(F_{\text{Е1}}, F_{\text{Е2}}) \quad (5.16)$$

где  $F_{\text{Е1}}$  – допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости, рассчитываемое по формуле [31]:

$$F_{\text{Е1}} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot E \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (s - c)}{D}\right]^{2.5}}{n_y} \quad (5.17)$$

То есть:

$$F_{\text{Е1}} = \frac{31.0 \cdot 10^{-5} \cdot (1.99 \cdot 10^5)}{2.4} \cdot 1800^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (14 - 2)}{1800}\right]^{2.5} = 3.022 \times 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия общей устойчивости [31]:

$$F_{\text{Е2}} = \frac{\pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 \quad (5.18)$$

где  $\lambda$  – параметр, вычисляемый по формуле [31]:

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot l_{\text{пр}}}{D + s - c} \quad (5.19)$$

где  $l_{\text{пр}}$  – приведённая расчётная длина, принимаемая по таблице 1 стандарта [31] и равная для рассчитываемого аппарата  $2l_p$ .

Имеем:

										Лист
										54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

$$\lambda = \frac{2.83 \cdot 8100}{(1800 + 14 - 2)} = 12.651$$

Отсюда:

$$F_{E2} = \frac{\pi \cdot (1800 + 14 - 2) \cdot [(14 - 2) \cdot (1.99 \cdot 10^5)]}{2.4} \cdot \left(\frac{\pi}{12.651}\right)^2 = 3.493 \times 10^8 \text{ Н}$$

Минимальным из двух, как видно, является  $F_{E1}$ . Поэтому:

$$F_D = \frac{1.452 \cdot 10^7}{\sqrt{1 + \left[\frac{1.452 \cdot 10^7}{(3.022 \cdot 10^7)}\right]^2}} = 1.309 \times 10^7 \text{ Н}$$

5.1.8 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$\frac{p}{p_D} + \frac{F}{F_D} = \frac{0.14}{0.265} + \frac{3.674 \cdot 10^5}{1.309 \cdot 10^7} = 0.528 + 0.028 = 0.556 < 1$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие устойчивости выполняется, и надёжность цилиндрической обечайки для рабочих условий обеспечена.

5.1.9 Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$p_{И} = 0.2 < 4.212 = p_{Д,И}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие устойчивости выполняется, и надёжность цилиндрической обечайки для условий испытаний обеспечена.

5.1.10 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [31]:

$$\frac{s - c}{D} = \frac{14 - 2}{1800} = 0.01 < 0.1 \text{ (5.20)}$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины днища выполняются.

Исходя из произведённых расчётов, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина обечайки, равная 14 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

## 5.2 Расчёт толщины стенки эллиптического днища

Название элемента – эллиптическое днище. Номер позиции на модели – 8.

Расчётные схемы эллиптического днища представлена на рисунках 6 и 7.

											Лист
											55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ						

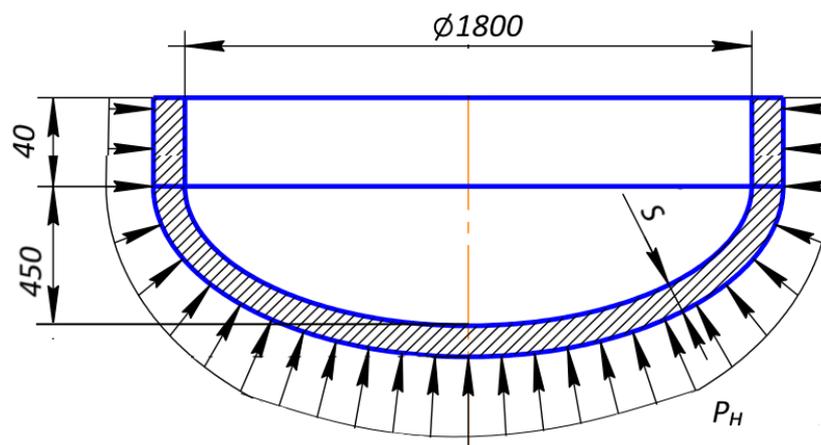


Рисунок 6 – Расчётная схема эллиптического днища при рабочих условиях  
 где  $p_n$  – наружное расчётное давление, МПа;  $s$  – исполнительная толщина стенки днища, мм.

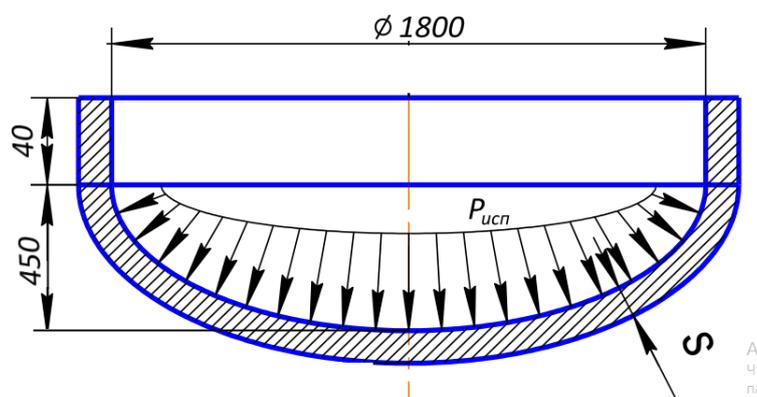


Рисунок 7 – Расчётная схема эллиптического днища при условиях гидравлического испытания

где  $p_{исп}$  – пробное давление гидравлического испытания, МПа,  $s$  – исполнительная толщина стенки днища, мм.

*Исходные данные для расчёта:*

- внутренний радиус днища, мм,  $R = 1800$ ;
- высота отбортованной части днища, мм,  $h_0 = 40$ ;
- внутренняя высота выпуклой части днища, мм,  $H = 450$ ;
- наружное расчётное давление, МПа,  $p = 0,14$ ;
- внутреннее давление гидравлического испытания, МПа,  $p_{и} = 0,2$  (для аппаратов под разрежением в соответствии с рекомендацией [30]) ;
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 170$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);

- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т для условий гидравлических испытаний, МПа,  $\sigma_{д.20} = 318$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- модуль продольной упругости стали 08X18Г8Н2Т для рабочих условий, МПа,  $E = 1,99 \cdot 10^5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- модуль продольной упругости стали 08X18Г8Н2Т для условий гидравлических испытаний, МПа,  $E_{и} = 2 \cdot 10^5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]).

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки эллиптического днища, чтобы была обеспечена прочность и устойчивость данной конструкции. Проверкой прочности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p \leq p_{д1} \quad (5.21)$$

где  $p$  – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа;  $p_{д1}$  – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [31].

Проверкой прочности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{и} \leq p_{д1.и} \quad (5.22)$$

где  $p_{и}$  – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа;  $p_{д1.и}$  – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [31].

5.2.1 Расчётная толщина эллиптического днища, нагруженного наружным давлением при рабочих условиях:

$$s_{1p} = \max \left( \frac{K_э \cdot R}{161} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot p}{10^{-5} \cdot E}}, \frac{1,2 \cdot p \cdot R}{2 \cdot \sigma_{д}} \right) \quad (5.23)$$

где  $R$  – внутренний радиус днища, мм;  $p$  – расчётное давление, МПа;  $E$  – модуль продольной упругости, МПа;  $\sigma_{д}$  – допускаемое напряжение материала обечайки, МПа;  $K_э$  – коэффициент для эллиптического днища, предварительно принимаемый равным 0,9 [31].

Тогда:

$$s_{1p} = \max \left( \frac{0,9 \cdot 1800}{161} \cdot \sqrt{\frac{2,4 \cdot 0,14}{10^{-5} \cdot 1,99 \cdot 10^5}}, \frac{1,2 \cdot 0,14 \cdot 1800}{2 \cdot 170} \right) = 4,135 \text{ мм}$$

5.2.2 Расчётная толщина стенки эллиптического днища, нагруженного внутренним давлением при гидравлическом испытании:

$$s_{1p.и} = \frac{p_{и} \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20} - 0,5 \cdot p_{и}} \quad (5.24)$$

						Лист
					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где  $p_{и}$  – внутреннее избыточное давление при гидравлических испытаниях, МПа;  $\sigma_{д.20}$  – допускаемое напряжение материала обечайки при гидравлических испытаниях, МПа;  $\varphi$  – коэффициент прочности сварного шва [31].

Коэффициент прочности сварного шва по таблице Д.1 стандарта [28] принимаем равным 1, поскольку эллиптические днища изготавливаются штамповкой, а не сваркой из листа.

Тогда:

$$s_{1p.и} = \frac{0.2 \cdot 1800}{2 \cdot 318 - 0.5 \cdot 0.2} = 0.566 \text{ мм}$$

5.2.3 Исполнительная толщина стенки эллиптического днища:

$$s_1 \geq s_{1p} + c \quad (5.25)$$

где  $c$  – прибавка на различные виды разрушений, мм [31].

Тогда:

$$s_1 \geq 4.135 + 2 = 6.135 \text{ мм}$$

Для того чтобы избежать необходимости создания сопряжения оболочек ввиду их различия в диаметрах, примем исполнительную толщину стенки эллиптического днища равной исполнительной толщине цилиндрической обечайки корпуса, а именно 14 мм.

5.2.4 Допускаемое наружное давление для рабочих условий:

$$p_{д1} = \frac{p_{д.п1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{p_{д.п1}}{p_{Е1}}\right)^2}} \quad (5.26)$$

где  $p_{д.п1}$  – допускаемое наружное давление из условия прочности, МПа;  $p_{д.Е1}$  – допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости, МПа [31].

Допускаемое давление из условия прочности [31]:

$$p_{д.п1} = \frac{2 \cdot \sigma_{д} \cdot (s_1 - c)}{R + 0.5 \cdot (s_1 - c)} \quad (5.27)$$

Тогда:

$$p_{д.п1} = \frac{2 \cdot 170 \cdot (14 - 2)}{1800 + 0.5 \cdot (14 - 2)} = 2.824$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости [31]:

$$p_{Е1} = \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_1 - c)}{K_{э1} \cdot R} \right] \quad (5.28)$$

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						58
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где  $p_y$  – коэффициент запаса устойчивости, принимаемый по [28] равным 2,4 для рабочих условий;  $K_{\text{э}1}$  – точное значение безразмерного коэффициента, высчитанное по формуле [31]:

$$K_{\text{э}1} = \frac{1 + (2.4 + 8 \cdot x) \cdot x}{1 + (3.0 + 10 \cdot x) \cdot x} \quad (5.29)$$

где  $x$  – параметр, зависящий от конструкции днища и вычисляемый по формуле [31]:

$$x = 10 \cdot \frac{s_1 - c}{D} \cdot \left( \frac{D}{2 \cdot H} - \frac{2 \cdot H}{D} \right) \quad (5.30)$$

Тогда:

$$x = 10 \cdot \frac{14 - 2}{1800} \cdot \left( \frac{1800}{2 \cdot 450} - \frac{2 \cdot 450}{1800} \right) = 0.1 \quad ,$$

$$K_{\text{э}1} = \frac{1 + (2.4 + 8 \cdot 0.1) \cdot 0.1}{1 + (3.0 + 10 \cdot 0.1) \cdot 0.1} = 0.943 \quad ,$$

$$p_{E1} = \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5}{2.4} \cdot \frac{100 \cdot (14 - 2)}{0.943 \cdot 1800} = 1.524 \text{ МПа},$$

$$p_{d1} = \frac{2.824}{\sqrt{1 + \left( \frac{2.824}{1.524} \right)^2}} = 1.341 \text{ МПа}$$

5.2.5 Допускаемое давление для условий испытания [31]:

$$p_{d.1.и} = \frac{2 \cdot (s_1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{d.20}}{R + 0.5 \cdot (s_1 - c)} \quad (5.31)$$

Тогда:

$$p_{d.1.и} = \frac{2 \cdot (14 - 2) \cdot 318}{1800 + 0.5 \cdot (14 - 2)} = 4.226 \text{ МПа}$$

5.2.6 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$p = 0.14 < 1.341 = p_{d1}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, и надёжность эллиптического днища для рабочих условий обеспечена.

5.2.7 Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$p_{и} = 0.2 < 4.226 = p_{d.1.и}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, и надёжность эллиптического днища для условий испытаний обеспечена.

5.2.8 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [31]:

										Лист
										59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>					

$$0.002 < \frac{s_1 - c}{D} = \frac{14 - 2}{1800} = 0.007 < 0.1, (5.32)$$

$$0.2 < \frac{H}{D} = \frac{450}{1800} = 0.25 < 0.5, (5.33)$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины обечайки выполняются.

Исходя из произведённых расчётов, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина эллиптического днища, равная 14 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

### 5.3 Расчёт толщины стенки эллиптической крышки

Название элемента – эллиптическая крышка. Номер позиции на расчётной модели – 7.

Расчётные схемы эллиптической крышки представлены на рисунках 8 и 9.

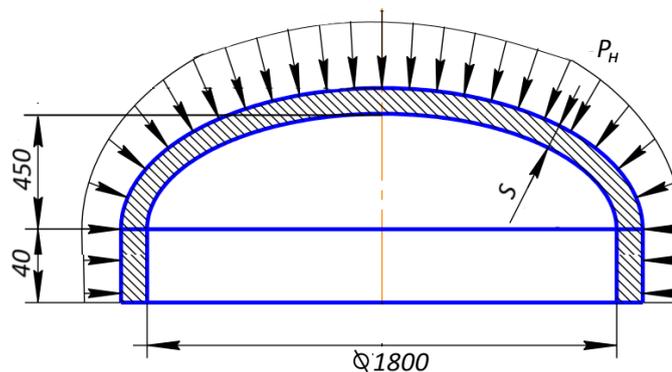


Рисунок 8 – Расчётная схема эллиптической крышки при рабочих условиях где  $p_n$  – наружное давление при рабочих условиях, МПа,  $s$  – исполнительная толщина эллиптической крышки, мм.

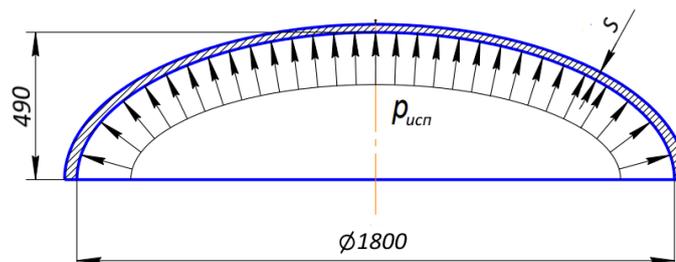


Рисунок 9 – Расчётная схема эллиптической крышки при условиях гидравлического испытания

									Лист
									60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

где  $p_{исп}$  – пробное давление при гидравлическом испытании,  $s$  – исполнительная толщина стенки крышки, мм.

*Исходные данные для расчёта:*

- внутренний радиус крышки, мм,  $R = 1800$ ;
- высота отбортованной части крышки, мм,  $h_0 = 40$ ;
- внутренняя высота выпуклой части днища, мм,  $H = 450$ ;
- наружное расчётное давление, МПа,  $p_n = 0,04$ ;
- внутреннее давление гидравлического испытания, МПа,  $p_{и} = 0,2$  (для аппаратов под разрежением в соответствии с рекомендацией [30]);
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 170$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т для условий гидравлических испытаний, МПа,  $\sigma_{д.20} = 318$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- модуль продольной упругости стали 08X18Г8Н2Т для рабочих условий, МПа,  $E = 1,99 \cdot 10^5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- модуль продольной упругости стали 08X18Г8Н2Т для условий гидравлических испытаний, МПа,  $E_{и} = 2 \cdot 10^5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]).

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки эллиптической крышки, чтобы была обеспечена прочность данной конструкции. Условием прочности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p_n \leq p_{д2} \quad (5.34)$$

где  $p_n$  – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа;  $p_{д2}$  – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [31].

Условием прочности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{и} \leq p_{д1.и} \quad (5.35)$$

где  $p_{и}$  – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа;  $p_{д1.и}$  – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [31].

5.3.1 Расчётная толщина эллиптической крышки, нагруженной наружным давлением при рабочих условиях:

$$s_{2p} = \max \left( \frac{K_3 \cdot R}{161} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot p_n}{10^{-5} \cdot E}}, \frac{1,2 \cdot p_n \cdot R}{2 \cdot \sigma_d} \right) \quad (5.36)$$

					<i>Лист</i>
					61
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>

где  $R$  – внутренний радиус крышки, мм;  $p_n$  – расчётное давление, МПа;  $E$  – модуль продольной упругости, МПа;  $\sigma_d$  – допускаемое напряжение материала обечайки, МПа;  $K_0$  – коэффициент для эллиптической крышки, предварительно принимаемый равным 0,9 [31].

Тогда:

$$s_{2p} = \max \left( \frac{0.9 \cdot 1800}{161} \cdot \sqrt{\frac{2.4 \cdot 0.04}{10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5}}, \frac{1.2 \cdot 0.04 \cdot 1800}{2 \cdot 170} \right) = 2.21 \text{ мм}$$

5.3.2 Расчётная толщина стенки эллиптической крышки, нагруженной внутренним давлением при гидравлическом испытании:

$$s_{2p.и} = \frac{p_{и} \cdot R}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20} - 0.5 \cdot p_{и}} \quad (5.37)$$

где  $p_{и}$  – внутреннее избыточное давление при гидравлических испытаниях, МПа;  $\sigma_{д.20}$  – допускаемое напряжение материала обечайки при гидравлических испытаниях, МПа;  $\phi$  – коэффициент прочности сварного шва [31].

Коэффициент прочности сварного шва по таблице Д.1 стандарта [28] принимаем равным 1, поскольку эллиптические крышки изготавливаются штамповкой, а не сваркой из листа.

Тогда:

$$s_{2p.и} = \frac{0.2 \cdot 1800}{2 \cdot 318 - 0.5 \cdot 0.2} = 0.566 \text{ мм}$$

5.3.3 Исполнительная толщина стенки эллиптической крышки:

$$s_2 \geq s_{2p} + c \quad (5.38)$$

где  $c$  – прибавка на различные виды разрушений, мм [31].

Тогда:

$$s_2 \geq 2.21 + 2 = 4 \text{ мм}$$

Для того чтобы избежать необходимости создания сопряжения оболочек ввиду их различия в диаметрах, примем исполнительную толщину стенки эллиптической крышки равной исполнительной толщине цилиндрической обечайки корпуса, а именно 14 мм.

5.3.4 Допускаемое наружное давление для рабочих условий:

$$p_{д2} = \frac{p_{д.п2}}{\sqrt{1 + \left( \frac{p_{д.п2}}{p_{E2}} \right)^2}} \quad (5.39)$$

где  $p_{д.п2}$  – допускаемое наружное давление из условия прочности, МПа;  $p_{д.Е2}$  – допускаемое

									Лист
									62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>				

давление из условия устойчивости в пределах упругости, МПа [31].

Допускаемое давление из условия прочности [31]:

$$P_{д.п2} = \frac{2 \cdot \sigma_{д} \cdot (s_2 - c)}{R + 0.5 \cdot (s_2 - c)} \quad (5.40)$$

Тогда:

$$P_{д.п2} = \frac{2 \cdot 170 \cdot (14 - 2)}{1800 + 0.5 \cdot (14 - 2)} = 2.824 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление из условия устойчивости в пределах упругости [31]:

$$P_{E2} = \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (s_2 - c)}{K_{э2} \cdot R} \right] \quad (5.41)$$

где  $n_y$  – коэффициент запаса устойчивости, принимаемый по [28] равным 2,4 для рабочих условий;  $K_{э2}$  – точное значение безразмерного коэффициента, высчитанное по формуле [31]:

$$K_{э2} = \frac{1 + (2.4 + 8 \cdot x_2) \cdot x_2}{1 + (3.0 + 10 \cdot x_2) \cdot x_2} \quad (5.42)$$

где  $x_2$  – параметр, зависящий от конструкции крышки и вычисляемый по формуле [31]:

$$x_2 = 10 \cdot \frac{s_2 - c}{D} \cdot \left( \frac{D}{2 \cdot H} - \frac{2 \cdot H}{D} \right) \quad (5.43)$$

Тогда:

$$x_2 = 10 \cdot \frac{14 - 2}{1800} \cdot \left( \frac{1800}{2 \cdot 450} - \frac{2 \cdot 450}{1800} \right) = 0.1 ,$$

$$K_{э2} = \frac{1 + (2.4 + 8 \cdot 0.1) \cdot 0.1}{1 + (3.0 + 10 \cdot 0.1) \cdot 0.1} = 0.943 ,$$

$$P_{E2} = \frac{2.6 \cdot 10^{-5} \cdot 1.99 \cdot 10^5}{2.4} \cdot \frac{100 \cdot (14 - 2)}{0.943 \cdot 1800} = 1.524 \text{ МПа},$$

$$P_{д2} = \frac{2.824}{\sqrt{1 + \left( \frac{2.824}{1.524} \right)^2}} = 1.341 \text{ МПа}$$

5.3.5 Допускаемое давление для условий испытания [31]:

$$P_{д.2.и} = \frac{2 \cdot (s_1 - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20}}{R + 0.5 \cdot (s_1 - c)} \quad (5.44)$$

Тогда:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

$$P_{д.2.и} = \frac{2 \cdot (14 - 2) \cdot 318}{1800 + 0.5 \cdot (14 - 2)} = 4.226 \text{ МПа}$$

5.3.6 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$p_H = 0.04 < 1.341 = P_{д2}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, и надёжность эллиптической крышки для рабочих условий обеспечена.

5.3.7 Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$P_{и} = 0.2 < 4.226 = P_{д2.и}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, и надёжность эллиптической крышки для условий испытаний обеспечена.

5.3.8 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [31]:

$$0.002 < \frac{s_2 - c}{D} = \frac{14 - 2}{1800} = 0.007 < 0.1,$$

$$0.2 < \frac{H}{D} = \frac{450}{1800} = 0.25 < 0.5$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины крышки выполняются.

Исходя из произведённых расчётов, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина эллиптической крышки, равная 14 мм, обеспечивает надёжность конструкции

## 5.4 Расчёт толщины стенки гладкой теплообменной рубашки

Названия элементов – обечайка и днище гладкой теплообменной рубашки. Номера позиции на расчётной модели – 9 и 10.

Расчётные схемы обечайки и днища рубашки представлены на рисунках 10 и 11.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

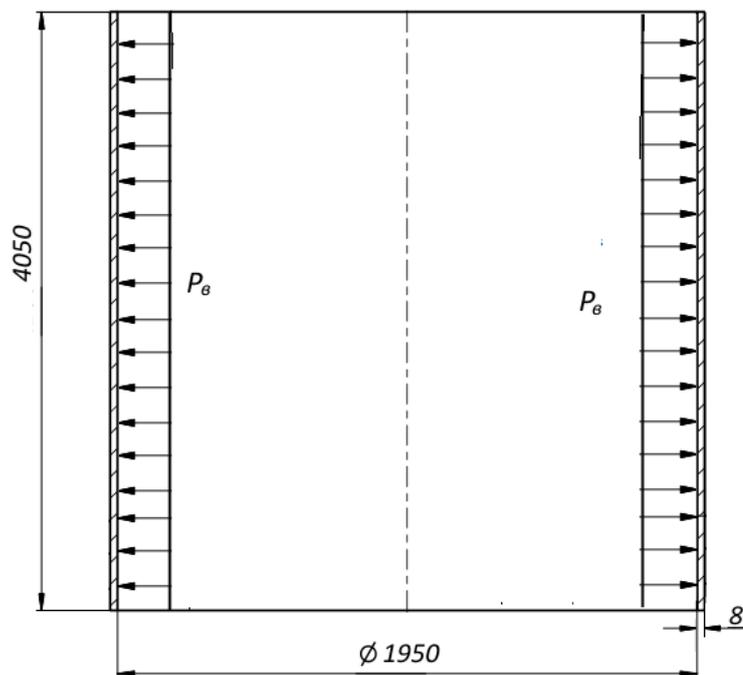


Рисунок 10 – Расчётная схема обечайки теплообменной рубашки

где  $p_v$  – расчётное давление пара в рубашке при рабочих условиях либо пробное давление воды при гидравлических испытаниях, МПа.

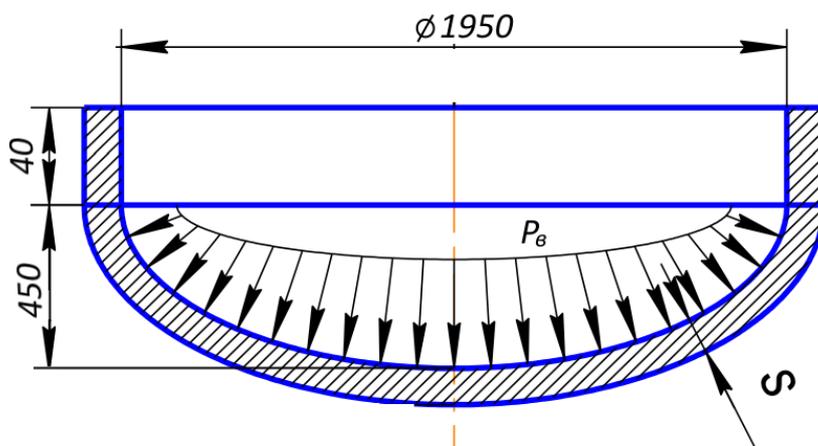


Рисунок 11 – Расчётная схема днища теплообменной рубашки

где  $p_v$  – расчётное давление пара в рубашке при рабочих условиях либо пробное давление воды при гидравлических испытаниях, МПа;  $s$  – исполнительная толщина стенки днища теплообменной рубашки, мм.

*Исходные данные для расчёта:*

- внутренний диаметр рубашки, мм,  $D_p = 1950$ ;
- внутренний радиус эллиптического элемента рубашки, мм,  $R_p = 1950$ ;
- высота отбортованной части эллиптического элемента рубашки, мм,  $h_{op} = 40$ ;

										Лист
										65
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>					

- внутренняя высота выпуклой части эллиптического элемента рубашки, мм,  $H_p = 487,5$ ;
- внутреннее рабочее давление, МПа,  $p_p = 0,2$ ;
- допускаемое напряжение стали 12ХМ для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 146$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- допускаемое напряжение стали 12ХМ для условий гидравлических испытаний, МПа,  $\sigma_{д.20} = 147$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]).

Целью выполнения расчёта является подбор такой толщины стенки рубашки, чтобы была обеспечена прочность данной конструкции. Условием прочности для рабочих условий является выполнение следующего условия:

$$p_p \leq p_{д.р} \quad (5.45)$$

где  $p_p$  – расчётное значение наружного давления при рабочих условиях, МПа;  $p_{д.р}$  – допускаемое значение наружного давления при рабочих условиях, МПа [31].

Условием прочности для условий испытания является выполнение условия:

$$p_{р.и} \leq p_{д.р.и} \quad (5.46)$$

где  $p_{р.и}$  – расчётное значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа;  $p_{д.р.и}$  – допускаемое значение внутреннего давления при гидравлических испытаниях, МПа [31].

5.4.1 Пробное давление для гидравлических испытаний рубашки:

$$p_{р.и} = 1.25 \cdot p_p \cdot \frac{\sigma_{д.р.20}}{\sigma_{д.р}} \quad (5.47)$$

где  $p_p$  – расчетное давление при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{д.р}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{д.р.20}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания, МПа [28].

Тогда:

$$p_{р.и} = 1.25 \cdot 0.2 \cdot \frac{147}{146} = 0.252 \text{ МПа}$$

5.4.2 Расчётная толщина цилиндрической обечайки рубашки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [31]:

$$s_{р.р} = \max \left( \frac{p_p \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi - p_p}, \frac{p_{р.и} \cdot D_p}{2 \cdot \sigma_{д.р.20} \cdot \phi - p_{р.и}} \right) \quad (5.48)$$

										Лист
										66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>					

где  $D_p$  – внутренний диаметр рубашки, мм;  $p_p$  – расчётное давление, МПа;  $p_{p.и}$  – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа;  $\sigma_{д.р}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{д.р.и}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания,  $\phi$  – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для цилиндрической обечайки рубашки равным 1 [28, 31].

Тогда:

$$s_{p.p} = \max\left(\frac{0.2 \cdot 1950}{2 \cdot 146 - 0.2}, \frac{0.252 \cdot 1950}{2 \cdot 147 - 0.252}\right) = 1.673 \text{ мм}$$

5.4.3 Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки рубашки:

$$s_p \geq s_{p.p} + c \quad (5.49)$$

где  $c$  – прибавка на различные виды разрушений, мм [31].

Тогда:

$$s_p \geq 1.673 + 2 = 3.673 \text{ мм}$$

В соответствии со стандартом на эллиптические отбортованные днища [33], примем ближайшую исполнительную толщину для данного диаметра, а именно 8 мм.

5.4.4 Допускаемое давление для рабочих условий [31]:

$$p_{д.р} = \frac{[2 \cdot \sigma_{д.р} \cdot \phi \cdot (s_p - c)]}{D_p + (s_p - c)} \quad (5.49)$$

Тогда:

$$p_{д.р} = \frac{2 \cdot 146 \cdot (8 - 2)}{1950 + (8 - 2)} = 0.896 \text{ МПа}$$

5.4.5 Допускаемое давление для условий испытания [31]:

$$p_{д.р.и} = \frac{[2 \cdot \sigma_{д.р.и} \cdot \phi \cdot (s_p - c)]}{D_p + (s_p - c)} \quad (5.50)$$

Тогда:

$$p_{д.р.и} = \frac{2 \cdot 147 \cdot (8 - 2)}{1950 + (8 - 2)} = 0.902 \text{ МПа}$$

5.4.6 Расчётная толщина эллиптического элемента рубашки, нагруженной внутренним давлением, рассчитывается для рабочих условий и условий гидравлического испытания, после чего выбирается максимальное значение [31]:

$$s_{1.p.p} = \max\left(\frac{p_p \cdot R_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р} - 0.5 \cdot p_p}, \frac{p_{p.и} \cdot R_p}{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р.и} - 0.5 \cdot p_{p.и}}\right) \quad (5.51)$$

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где  $R_p$  – внутренний радиус эллиптического элемента рубашки, мм;  $p_p$  – расчётное давление, МПа;  $p_{р.и}$  – пробное давление при гидравлическом испытании, МПа;  $\sigma_{д.р}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при рабочих условиях, МПа;  $\sigma_{д.р.и}$  – допускаемое напряжение материала рубашки при условиях гидравлического испытания,  $\phi$  – коэффициент прочности сварного шва, принимаемый для эллиптического элемента рубашки равным 1 [28, 31].

Тогда:

$$s_{1.p.p} = \max\left(\frac{0.2 \cdot 1950}{2 \cdot 146 - 0.5 \cdot 0.2}, \frac{0.252 \cdot 1950}{2 \cdot 147 - 0.5 \cdot 0.252}\right) = 1.672 \text{ мм}$$

5.4.7 Исполнительная толщина стенки эллиптического элемента рубашки:

$$s_{1p} \geq s_{1p.p} + c \quad (5.52)$$

где  $c$  – прибавка на различные виды разрушений, мм [31].

Тогда:

$$s_{1p} \geq 1.672 + 2 = 3.672 \text{ мм}$$

В соответствии со стандартом на эллиптические отбортованные днища [33], примем ближайшую исполнительную толщину для данного диаметра, а именно 8 мм.

5.4.8 Допускаемое давление для рабочих условий [31]:

$$p_{д.1p} = \frac{2(s_{1p} - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р}}{R_p + 0.5(s_{1p} - c)} \quad (5.53)$$

Тогда:

$$p_{д.1p} = \frac{2 \cdot (8 - 2) \cdot 146}{1950 + 0.5 \cdot (8 - 2)} = 0.897 \text{ МПа}$$

5.4.9 Допускаемое давление для условий испытания [31]:

$$p_{д.1p.и} = \frac{2(s_{1p} - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.р.20}}{R_p + 0.5(s_{1p} - c)} \quad (5.54)$$

Тогда:

$$p_{д.1p.и} = \frac{2 \cdot (8 - 2) \cdot 147}{1950 + 0.5 \cdot (8 - 2)} = 0.903 \text{ МПа}$$

5.4.10 Проверим надёжность конструкции для рабочих условий:

$$p_p = 0.2 < 0.896 = p_{д.р},$$

$$p_p = 0.2 < 0.897 = p_{д.1p}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, и надёжность рубашки для рабочих условий обеспечена.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.4.11 Проверим надёжность конструкции для условий гидравлического испытания:

$$p_{p.и} = 0.252 < 0.902 = p_{д.р.и},$$

$$p_{p.и} = 0.252 < 0.903 = p_{д.1р.и}$$

Таким образом, можно сделать вывод, что условие прочности выполняется, и надёжность рубашки для условий испытаний обеспечена.

5.4.12 Проверка условия применимости расчётных формул стандарта [31]:

$$0.002 < \frac{s_p^{-c}}{D} = \frac{8-2}{1950} = 0.003 < 0.1,$$

$$0.002 < \frac{s_{1p}^{-c}}{D} = \frac{8-2}{1950} = 0.003 < 0.1$$

$$0.2 < \frac{H}{D} = \frac{487.5}{1950} = 0.25 < 0.5$$

Условия применимости формул для данной исполнительной толщины рубашки выполняются.

Исходя из произведённых расчётов, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина стенки и днища рубашки, равная 8 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

## 5.5 Расчёт сопряжения обечайки корпуса и днища

Названия элементов – цилиндрическая обечайка корпуса, эллиптическое днище корпуса. Номера позиций на расчётной модели – 6 и 8.

Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с эллиптическим днищем представлена на рисунке 12.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		69

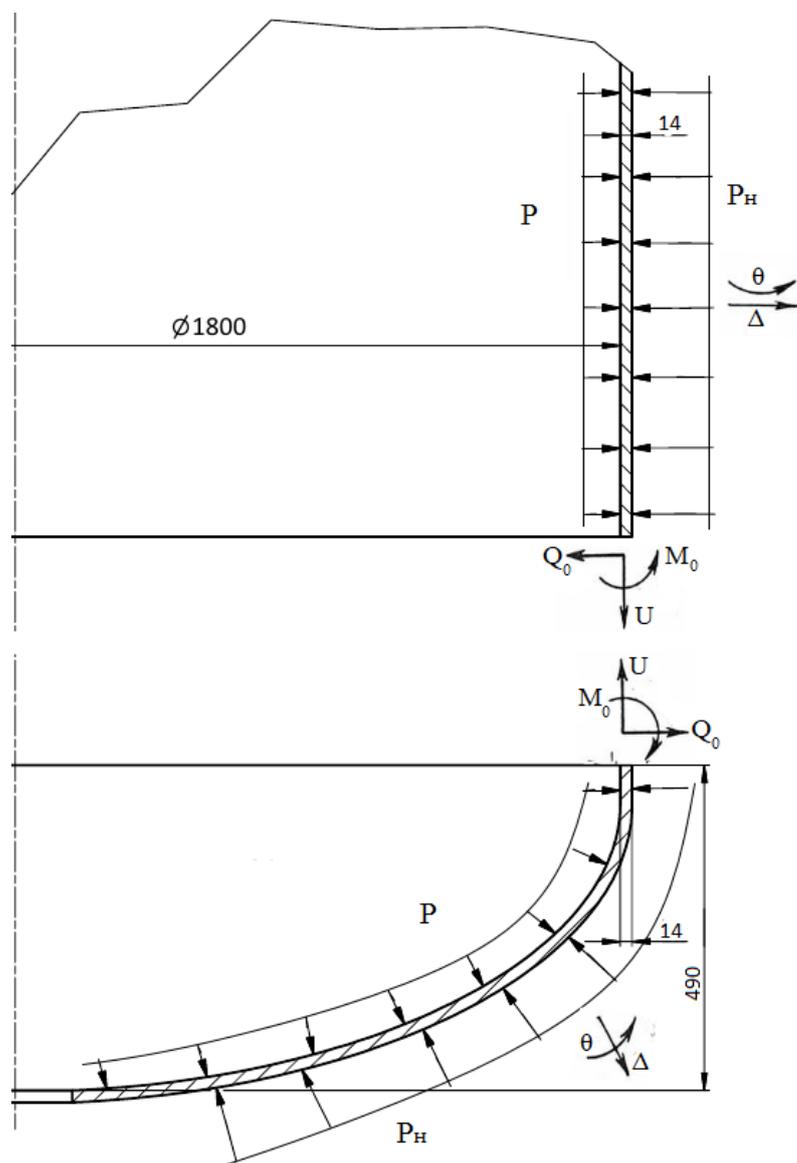


Рисунок 12 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с эллиптическим днищем

где  $P$  – внутреннее давление, действующее на обечайки со стороны среды в аппарате, Па;  $P_H$  – внешнее давление, действующее на обечайки со стороны теплоносителя в рубашке, Па;  $Q_0$  – краевая сила, действующая на соединённые обечайки, Н/м;  $M_0$  – краевой момент, действующий на соединённые обечайки, Н\*м;  $U$  – радиальное усилие на краю обечайки, Н;  $\Delta$  – краевые радиальные деформации обечайки от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, м;  $\theta$  – краевые угловые деформации обечайки от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, °.

*Исходные данные для расчёта:*

- внутренний диаметр аппарата, м,  $D = 1,8$ ;
- радиус аппарата, м,  $R = 0,9$ ;

										Лист
										70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

- первый радиус эллипса крышки, м,  $a = 0,9$ ;
- второй радиус эллипса крышки, м,  $b = 0,45$ ;
- высота аппарата, м,  $H = 4,2$ ;
- толщина стенки обечайки аппарата, м,  $s = 0,014$  (пункт 5.1);
- толщина стенки днища, м,  $s_3 = 0,014$  (пункт 5.2);
- остаточное давление в корпусе аппарата, Па,  $P = 60000$ ;
- рабочее давление в рубашке, Па,  $P_p = 200000$ ;
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 170 \cdot 10^6$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- рабочая температура среды, воздействующая на сопряжение, °С,  $t_c = 130$ ;
- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный,  $\varphi = 1$  [28];
- сумма прибавок к расчётной толщине стенок, м,  $c = 0,002$  (пункт 4.3);
- коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий, безразмерный,  $n_p = 2,4$  [28];
- коэффициент запаса устойчивости для условий испытания, безразмерный,  $n_n = 1,8$  [28];
- модуль упругости стали 08X18Г8Н2Т при рабочей температуре среды, Па,  $E = 1,99 \cdot 10^{11}$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- коэффициент Пуассона для стали, безразмерный,  $\mu = 0,3$  [32].

Целью выполнения расчёта является прочностная проверка того, выдержит ли соединение цилиндрической обечайки с днищем возникающих при сопряжении краевых напряжений. Условием прочности соединения является выполнение следующего условия:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{кр.д}} \quad (5.55)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение, возникающее на краю оболочки, Па;  $\sigma_{\text{кр.д}}$  – допускаемое краевое напряжение, Па [32].

Для определения  $Q_0$  и  $M_0$  составляются уравнения совместности радиальных и угловых деформаций. Сущность этих уравнений в том, что для нормальной работы аппарата в узле сопряжения не должно быть никаких относительных перемещений сопрягаемых деталей.

Уравнения совместности деформаций для места стыка обечайки с эллиптическим днищем при воздействии внутреннего и внешнего давления:

$$\begin{cases} -\Delta_p^{\text{II}} + \Delta_{Q_0}^{\text{II}} - \Delta_{M_0}^{\text{II}} = -\Delta_p^{\text{З}} - \Delta_{Q_0}^{\text{З}} - \Delta_{M_0}^{\text{З}} \\ -\theta_p^{\text{II}} + \theta_{Q_0}^{\text{II}} - \theta_{M_0}^{\text{II}} = \theta_p^{\text{З}} + \theta_{Q_0}^{\text{З}} + \theta_{M_0}^{\text{З}} \end{cases} \quad (5.56)$$

где  $\Delta_r^u, \Delta_{Q_0}^u, \Delta_{M_0}^u, \theta_r^u, \theta_{Q_0}^u, \theta_{M_0}^u$  – соответственно радиальные и угловые деформации края цилиндрической обечайки под действием нагрузок  $p, Q_0$  и  $M_0$  соответственно; где  $\Delta_r^u, \Delta_{Q_0}^u, \Delta_{M_0}^u, \theta_r^u, \theta_{Q_0}^u, \theta_{M_0}^u$  – соответственно радиальные и угловые деформации края цилиндрической обечайки под действием нагрузок  $p, Q_0$  и  $M_0$  соответственно [32].

Формулы для определения радиальных и угловых деформаций берутся в соответствии с таблицей из пособия [32].

5.5.1 Коэффициент затухания [32]:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[R \cdot (s - c)]^2}} \quad (5.57)$$

Тогда для цилиндрической обечайки и эллиптического днища имеем:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[R \cdot (s - c)]^2}} = 12.369 \text{ 1/м,}$$

$$\beta_{\text{э}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \mu^2)}{[a \cdot (s_{\text{э}} - c)]^2}} = 12.369 \text{ 1/м}$$

5.5.2 Угловые и линейные деформации для цилиндрической обечайки [32]:

$$\Delta_{\text{ц}P} = \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P = 5.766 \times 10^{-5}, \quad (5.58)$$

$$\Delta_{\text{ц}P} = \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P = 1.73 \times 10^{-5}, \quad (5.59)$$

$$\Delta_{\text{ц}Q_0} = 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 8.391 \times 10^{-9}, \quad (5.60)$$

$$\Delta_{\text{ц}M_0} = 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 1.038 \times 10^{-7}, \quad (5.61)$$

$$\theta_{\text{ц}P} = 0,$$

$$\theta_{\text{ц}P} = 0,$$

$$\theta_{\text{ц}Q_0} = 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 1.038 \times 10^{-7}, \quad (5.62)$$

$$\theta_{\text{ц}M_0} = 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 2.567 \times 10^{-6} \quad (5.63)$$

										Лист
										72
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

5.5.3 Угловые и линейные деформации эллиптической крышки [32]:

$$\Delta_{\text{эРр}} = P_p \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\text{э}} - c)]} \cdot \left( 2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -7.802 \times 10^{-5}, \quad (5.64)$$

$$\Delta_{\text{эР}} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\text{э}} - c)]} \cdot \left( 2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -2.34 \times 10^{-5}, \quad (5.65)$$

$$\Delta_{\text{эQ0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}} \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 8.391 \times 10^{-9}, \quad (5.66)$$

$$\Delta_{\text{эM0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 1.038 \times 10^{-7}, \quad (5.67)$$

$$\theta_{\text{эРр}} = 0,$$

$$\theta_{\text{эР}} = 0,$$

$$\theta_{\text{эQ0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 1.038 \times 10^{-7}, \quad (5.68)$$

$$\theta_{\text{эM0}} = 4 \cdot \beta_{\text{э}}^3 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 2.567 \times 10^{-6} \quad (5.69)$$

5.5.4 Подставив значения угловых и линейных деформаций в систему уравнений (5.56) и решив её при помощи ПЭВМ, получим следующие значения нагрузок:

$$Q_0 = -5,659 \cdot 10^3 \text{ Н/м},$$

$$M_0 = 0$$

5.5.5 Суммарное меридиональное напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{\text{мэ}} = -\sigma_{\text{Ррмэ}} + \sigma_{\text{Рмэ}} + \sigma_{\text{Q0мэ}} + \sigma_{\text{M0мэ}} \quad (5.70)$$

где  $\sigma_{\text{Ррмэ}}$ ,  $\sigma_{\text{Рмэ}}$ ,  $\sigma_{\text{Q0мэ}}$ ,  $\sigma_{\text{M0мэ}}$  – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками  $Q_0$  и  $M_0$ . [32].

Тогда:

$$\sigma_{\text{мэ1}} = -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\text{э}} - c)^2} = -5.25 \times 10^6 \text{ Па},$$

$$\sigma_{\text{мэ2}} = -P_p \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_{\text{э}} - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_{\text{э}} - c)^2} = -5.25 \times 10^6 \text{ Па},$$

$$\sigma_{\text{мэ}} = \max(|\sigma_{\text{мэ1}}|, |\sigma_{\text{мэ2}}|) = 5.25 \times 10^6 \text{ Па}$$

									Лист
									73
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

### 5.5.6 Суммарное кольцевое напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{t\theta} = -\sigma_{Ppt\theta} + \sigma_{Pt\theta} + \sigma_{Q0t\theta} + \sigma_{M0t\theta} \quad (5.71)$$

где  $\sigma_{Ppt\theta}$ ,  $\sigma_{Pt\theta}$ ,  $\sigma_{Q0t\theta}$ ,  $\sigma_{M0t\theta}$  – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками  $Q_0$  и  $M_0$ . [32].

Тогда:

$$\begin{aligned} \sigma_{t\theta 1} = & -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{\left[2 \cdot (s_\theta - c)\right]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{\left[2 \cdot (s_\theta - c)\right]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_\theta \cdot \frac{a}{(s_\theta - c)} + \\ & + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_\theta^2 \cdot \frac{a}{(s_\theta - c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_\theta - c)^2} = -2.122 \times 10^{-6} \text{ Па} , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{t\theta 2} = & -P_p \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{\left[2 \cdot (s_\theta - c)\right]} + P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{\left[2 \cdot (s_\theta - c)\right]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_\theta \cdot \frac{a}{(s_\theta - c)} + \\ & + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_\theta^2 \cdot \frac{a}{(s_\theta - c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_\theta - c)^2} = -2.122 \times 10^{-6} \text{ Па} , \end{aligned}$$

$$\sigma_{t\theta} = \max\left(|\sigma_{t\theta 1}|, |\sigma_{t\theta 2}|\right) = 2.122 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

### 5.5.7 Суммарное меридиональное напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{m\theta} = -\sigma_{Ppm\theta} + \sigma_{Pm\theta} - \sigma_{Q0m\theta} + \sigma_{M0m\theta} \quad (5.72)$$

где  $\sigma_{Ppm\theta}$ ,  $\sigma_{Pm\theta}$ ,  $\sigma_{Q0m\theta}$ ,  $\sigma_{M0m\theta}$  – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками  $Q_0$  и  $M_0$ . [32].

Тогда:

$$\sigma_{m\theta 1} = -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = -5.25 \times 10^6 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{m\theta 2} = -P_p \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} + P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = -5.25 \times 10^6 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{m\theta} = \max\left(|\sigma_{m\theta 1}|, |\sigma_{m\theta 2}|\right) = 5.25 \times 10^6 \text{ Па}$$

### 5.5.8 Суммарное кольцевое напряжение на краю цилиндрической обечайки [32]:

$$\sigma_{t\theta} = -\sigma_{Ppto} + \sigma_{Pto} - \sigma_{Q0to} + \sigma_{M0to} \quad (5.73)$$

									Лист
									74
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

где  $\sigma_{P_{to}}$ ,  $\sigma_{P_{to}}$ ,  $\sigma_{Q_0to}$ ,  $\sigma_{M_0to}$  – краевые напряжения, обеспечиваемые давлением в рубашке и в корпусе, а также краевыми нагрузками  $Q_0$  и  $M_0$ . [32].

Тогда:

$$\sigma_{to1} = -P \cdot \frac{R}{(s-c)} + P \cdot \frac{R}{(s-c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s-c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s-c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s-c)^2} = 2.122 \times 10^{-6} \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{to2} = -P \cdot \frac{R}{(s-c)} + P \cdot \frac{R}{(s-c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s-c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s-c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s-c)^2} = 2.122 \times 10^{-6} \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{to} = \max(|\sigma_{to1}|, |\sigma_{to2}|) = 2.122 \times 10^{-6} \text{ Па}$$

5.5.9 Допускаемое напряжение на краю элемента [32]:

$$\sigma_{кр.д} = 1.3 \cdot \sigma_d = 2.763 \times 10^8 \text{ Па} \quad (5.74)$$

Максимальное напряжение на краю эллиптического днища:

$$\sigma_{maxэ} = \max(\sigma_{мэ}, \sigma_{тэ}) = 5.25 \times 10^6 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю цилиндрической обечайки:

$$\sigma_{maxо} = \max(\sigma_{мо}, \sigma_{то}) = 5.25 \times 10^6 \text{ Па}$$

5.5.10 Проверка условия прочности для эллиптического днища и цилиндрической обечайки.

$$\sigma_{maxэ} = 5.25 \cdot 10^6 < 2.763 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д} ,$$

$$\sigma_{maxо} = 5.25 \cdot 10^6 < 2.763 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д}$$

Условие прочности соединения выполняется. Делаем вывод, что принятая в пунктах 5.1 и 5.2 исполнительная толщина цилиндрической обечайки и эллиптического днища корпуса, равная 14 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

## 5.6 Расчёт сопряжения обечайки рубашки и днища

Названия элементов – цилиндрическая обечайка рубашки, эллиптическое днище рубашки. Номера позиций на расчётной модели – 9 и 10.

Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки рубашки с её эллиптическим днищем представлена на рисунке 13.

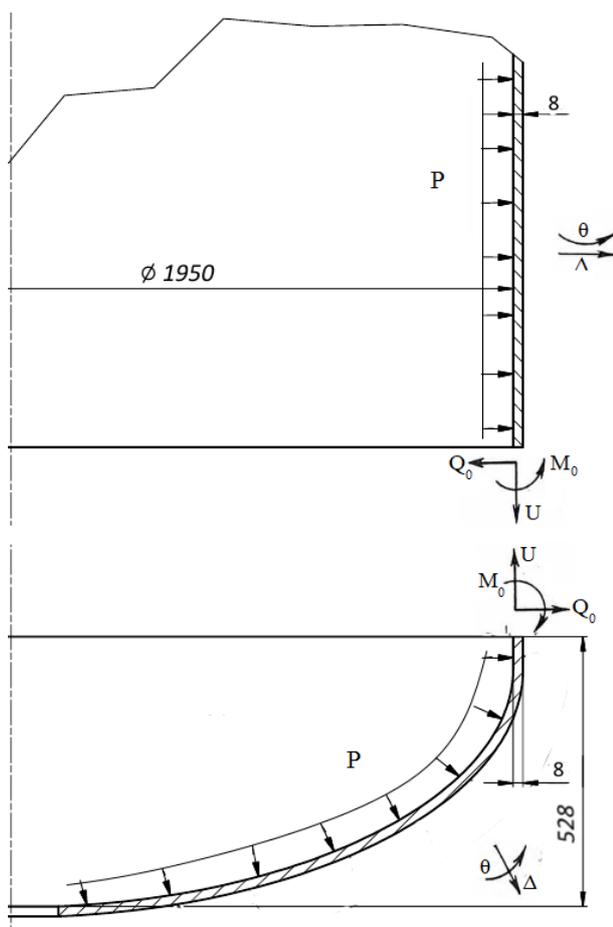


Рисунок 13 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки рубашки с её эллиптическим днищем

где  $P$  – внутреннее давление, действующее на обечайки со стороны теплоносителя в рубашке, Па;  $Q_0$  – краевая сила, действующая на соединённые обечайки, Н/м;  $M_0$  – краевой момент, действующий на соединённые обечайки, Н\*м;  $U$  – радиальное усилие на краю обечайки, Н;  $\Delta$  – краевые радиальные деформации обечайки от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, м;  $\theta$  – краевые угловые деформации обечайки от действия краевых нагрузок, усилий и моментов, °.

						Лист
					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	76
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Исходные данные для расчёта:

- внутренний диаметр аппарата, м,  $D = 1,95$ ;
- радиус аппарата, м,  $R = 0,975$ ;
- первый радиус эллипса крышки, м,  $a = 0,975$ ;
- второй радиус эллипса крышки, м,  $b = 0,488$ ;
- толщина стенки обечайки рубашки, м,  $s = 0,008$  (пункт 5.4);
- толщина стенки днища, м,  $s_3 = 0,008$  (пункт 5.4);
- рабочее давление в рубашке, Па,  $P = 200000$ ;
- допускаемое напряжение стали 12ХМ для рабочих условий, Па,  $\sigma_d = 146 \cdot 10^6$

(таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);

- рабочая температура среды, воздействующая на сопряжение, °С,  $t_c = 130$ ;
- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный,  $\varphi = 1$  [28];
- сумма прибавок к расчётной толщине стенок, м,  $c = 0,002$  (пункт 4.3);
- коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий, безразмерный,  $n_p = 2,4$  [28];
- коэффициент запаса устойчивости для условий испытания, безразмерный,  $n_n = 1,8$  [28];
- модуль упругости стали 12ХМ при рабочей температуре среды, Па,  $E = 2,03 \cdot 10^{11}$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- коэффициент Пуассона для стали, безразмерный,  $\mu = 0,3$  [32].

Целью выполнения расчёта является прочностная проверка того, выдержит ли соединение цилиндрической обечайки с днищем возникающих при сопряжении краевых напряжений. Условием прочности соединения является выполнение следующего условия:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{кр.д}} \quad (5.75)$$

где  $\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение, возникающее на краю оболочки, Па;  $\sigma_{\text{кр.д}}$  – допускаемое краевое напряжение, Па [32].

Реализуемый принцип расчёта – тот же, что и в предыдущем пункте.

5.6.1 Коэффициент затухания [32]:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{[3 \cdot (1 - \mu^2)]}{[R \cdot (s - c)]^2}} = 16.806 \text{ 1/м,}$$
$$\beta_3 = \sqrt[4]{\frac{[3 \cdot (1 - \mu^2)]}{[a \cdot (s_3 - c)]^2}} = 16.806 \text{ 1/м}$$

									Лист
									77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

5.6.2 Угловые и линейные деформации для цилиндрической обечайки [32]:

$$\Delta_{\text{цР}} = \frac{(2 - \mu) \cdot R^2}{2 \cdot E(s - c)} \cdot P = 1.327 \times 10^{-4} ,$$

$$\Delta_{\text{цQ0}} = 2 \cdot \beta \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 2.623 \times 10^{-8} ,$$

$$\Delta_{\text{цM0}} = 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 4.409 \times 10^{-7} ,$$

$$\theta_{\text{цР}} = 0 ,$$

$$\theta_{\text{цQ0}} := 2 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 4.409 \times 10^{-7} ,$$

$$\theta_{\text{цM0}} := 4 \cdot \beta^3 \cdot \frac{R^2}{(s - c) \cdot E} = 1.482 \times 10^{-5}$$

5.6.3 Угловые и линейные деформации эллиптической крышки [32]:

$$\Delta_{\text{эР}} := P \cdot \frac{a^2}{[2 \cdot E \cdot (s_{\text{э}} - c)]} \cdot \left( 2 - \mu - \frac{a^2}{b^2} \right) = -1.795 \times 10^{-4} ,$$

$$\Delta_{\text{эQ0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}} \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 2.623 \times 10^{-8} ,$$

$$\Delta_{\text{эM0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 4.409 \times 10^{-7} ,$$

$$\theta_{\text{эР}} = 0 ,$$

$$\theta_{\text{эQ0}} = 2 \cdot \beta_{\text{э}}^2 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 4.409 \times 10^{-7} ,$$

$$\theta_{\text{эM0}} = 4 \cdot \beta_{\text{э}}^3 \cdot \frac{a^2}{(s_{\text{э}} - c) \cdot E} = 1.482 \times 10^{-5}$$

5.6.4 Подставив значения угловых и линейных деформаций в систему уравнений (5.56) и решив её при помощи ПЭВМ, получим следующие значения нагрузок:

$$Q_0 = 5,95 \cdot 10^3 \text{ Н/м},$$

$$M_0 = 0$$

5.6.5 Суммарное меридиональное напряжение на краю эллиптического днища [32]:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\sigma_{mэ1} = P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_э - c)]} + 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s_э - c)^2} = 1.625 \times 10^7 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{mэ2} = P \cdot \frac{a}{[2 \cdot (s_э - c)]} + 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s_э - c)^2} = 1.625 \times 10^7 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{mэ} = \max(|\sigma_{mэ1}|, |\sigma_{mэ2}|) = 1.625 \times 10^7 \text{ Па}$$

5.6.6 Суммарное кольцевое напряжение на краю эллиптического днища [32]:

$$\sigma_{тэ1} = P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_э - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_э \cdot \frac{a}{(s_э - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_э^2 \cdot \frac{a}{(s_э - c)} +$$

$$+ 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_э - c)^2} = -1.627 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

$$\sigma_{тэ2} = P \cdot a \cdot \frac{\left(2 - \frac{a^2}{b^2}\right)}{[2 \cdot (s_э - c)]} + 2 \cdot Q_0 \cdot \beta_э \cdot \frac{a}{(s_э - c)} + 2 \cdot M_0 \cdot \beta_э^2 \cdot \frac{a}{(s_э - c)} -$$

$$- 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s_э - c)^2} = -1.627 \times 10^{-5} \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{тэ} = \max(|\sigma_{тэ1}|, |\sigma_{тэ2}|) = 1.627 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

5.6.7 Суммарное меридиональное напряжение на краю цилиндрической обечайки [32]:

$$\sigma_{mo1} = P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 + 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 1.625 \times 10^7 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{mo2} = P \cdot \frac{R}{[2 \cdot (s - c)]} - 0 - 6 \cdot \frac{M_0}{(s - c)^2} = 1.625 \times 10^7 \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{mo} = \max(|\sigma_{mo1}|, |\sigma_{mo2}|) = 1.625 \times 10^7 \text{ Па}$$

5.6.8 Суммарное кольцевое напряжение на краю цилиндрической обечайки [32]:

$$\sigma_{то1} = -P \cdot \frac{R}{(s - c)} + P \cdot \frac{R}{(s - c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s - c)} +$$

$$+ 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s-c)} + 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s-c)^2} = 1.627 \times 10^{-5} \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{to2} = -P_p \cdot \frac{R}{(s-c)} + P \cdot \frac{R}{(s-c)} - 2 \cdot Q_0 \cdot \beta \cdot \frac{R}{(s-c)} +$$

$$+ 2 \cdot M_0 \cdot \beta^2 \cdot \frac{R}{(s-c)} - 6 \cdot \mu \cdot \frac{M_0}{(s-c)^2} = 1.627 \times 10^{-5} \text{ Па} ,$$

$$\sigma_{to} = \max(|\sigma_{to1}|, |\sigma_{to2}|) = 1.627 \times 10^{-5} \text{ Па}$$

5.6.9 Допускаемое напряжение на краю элемента [32]:

$$\sigma_{кр.д} = 1.3 \cdot \sigma_d = 1.898 \times 10^8 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю эллиптического днища [32]:

$$\sigma_{maxэ} = \max(\sigma_{мэ}, \sigma_{тэ}) = 1.625 \times 10^7 \text{ Па}$$

Максимальное напряжение на краю цилиндрической обечайки [32]:

$$\sigma_{maxо} = \max(\sigma_{мо}, \sigma_{то}) = 1.625 \times 10^7 \text{ Па}$$

5.6.10 Проверка условия прочности для эллиптического днища и цилиндрической обечайки.

$$\sigma_{maxэ} = 1.625 \cdot 10^7 < 1.898 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д}$$

$$\sigma_{maxо} = 1.625 \cdot 10^7 < 1.898 \cdot 10^8 = \sigma_{кр.д}$$

Условие прочности выполняется. Делаем вывод, что принятая в пункте 5.4 исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки и эллиптического днища рубашки, равная 8 мм, обеспечивает надёжность конструкции.

## 5.7 Расчёт сопряжения рубашки с корпусом

Названия элементов – цилиндрическая обечайка корпуса, цилиндрическая обечайка теплообменной рубашки. Номера позиций на расчётной модели – 6 и 9.

Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с теплообменной рубашкой представлена на рисунке 14:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		80

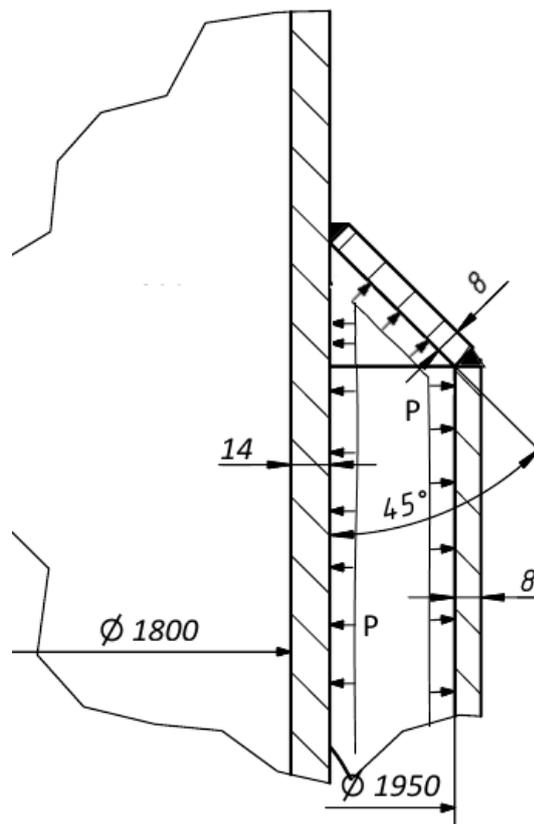


Рисунок 14 – Расчётная схема сопряжения цилиндрической обечайки с гладкой теплообменной рубашкой

где  $p$  – внутреннее давление теплоносителя в рубашке, МПа.

*Исходные данные для расчёта:*

- внутренний диаметр аппарата, мм,  $D_1 = 1800$ ;
- внутренний диаметр рубашки, мм,  $D_2 = 1950$ ;
- диаметр сопряжения рубашки с корпусом у днища, мм,  $d_1 = 280$  [34];
- толщина стенки обечайки аппарата, мм,  $s_1 = 14$  (пункт 5.1);
- толщина стенки обечайки рубашки, мм,  $s_2 = 8$  (пункт 5.4);
- прибавка к толщине стенки, мм,  $c = 2$  (пункт 4.3);
- угол сопряжения, °,  $\alpha = 45$  [34];
- расстояние от середины стенки рубашки до наружной стенки аппарата, мм,  $e_0 = 65$  [34];
- остаточное давление в аппарате, МПа,  $p = 0,06$ ;
- рабочее давление в рубашке, МПа,  $p_{руб} = 0,2$ ;
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т для рабочих условий, МПа,  $\sigma_{д.кор} = 170$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);

- допускаемое напряжение стали 12ХМ для рабочих условий, МПа,  $\sigma_d = 146$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- коэффициент прочности сварных швов, безразмерный,  $\varphi_{т1} = 1$  [28].

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции сопряжения теплообменной рубашки с корпусом аппарата. Условием прочности является выполнение следующего условия:

$$P_{руб} \leq P_{д.руб} \quad (5.76)$$

где  $P_{руб}$  – расчётное давление в рубашке при рабочих условиях, МПа;  $P_{д.руб}$  – допускаемое давление в рубашке при рабочих условиях, МПа [34].

В соответствии с рекомендациями стандарта [34] был выбран тип сопряжения рубашки с корпусом при помощи конуса. Исполнительная толщина стенки сопряжения рассчитывается методом итераций в соответствии с методикой стандарта 345].

5.7.1 В первом приближении принимаем толщину сопряжения равной толщине стенки теплообменной рубашки. Вычислим по формулам стандарта [34] вспомогательные параметры.

5.7.2 Коэффициент осевого усилия [34]:

$$A = \frac{(D_1 \cdot D_2 - d_1^2)}{D_2^2} = 0.902 \text{ мм} \quad (5.77)$$

5.7.3 Коэффициент, учитывающий расстояние между корпусом сосуда и рубашкой [34]:

$$\epsilon = \frac{e_0}{\sqrt{D_2 \cdot (s_2 - c)}} = 0.601 \quad (5.78)$$

5.7.4 Коэффициент радиуса конической отбортовки  $\rho$  принимаем равным нулю в соответствии с приложением А стандарта [34].

5.7.5 Коэффициент длины сопряжения при угле сопряжения  $45^\circ$  [34]:

$$\lambda = \epsilon \cdot \sqrt{2} + 0.45 \cdot \rho = 0.85 \quad (5.79)$$

5.7.6 Коэффициент отношения прочности корпуса сосуда и рубашки:

$$\chi = 1.25 \left[ \frac{[\sigma_{д.кор} \cdot (s_1 - c) \cdot \sqrt{D_1 \cdot (s_1 - c)}]}{\sigma_{д.руб} \cdot (s_2 - c) \cdot \sqrt{D_2 \cdot (s_2 - c)}} \right] \left[ \sqrt{1 - \frac{(P_{кор} \cdot D_1)}{2 \cdot \sigma_{д.кор} \cdot (s_1 - c)}} + \right]$$

$$+ \sqrt{1 - \frac{[(P_{\text{кор}} - P_{\text{руб}}) \cdot D_1]}{2 \cdot \sigma_{\text{д.кор}} \cdot (s_1 - c)}}] = 10.06 \quad (5.80)$$

где  $P_{\text{кор}}$  – расчётное давление в корпусе, принимаемое ввиду разрежения равным нулю, МПа [34].

5.7.7 Расчётные коэффициенты прочности сварного шва [34]:

$$\varphi_{p1} = \varphi_{T1} \cdot \frac{\min(\sigma_{\text{д.кор}}, \sigma_{\text{д.руб}})}{\sigma_{\text{д.руб}}} = 1 \quad (5.81)$$

$$\varphi_{p2} = 1$$

5.7.8 Коэффициент  $\varphi_{p2}$  принимается равным единице, поскольку исполнительная длина укрепления стенки рубашки в месте сопряжения с помощью конуса равна [34]:

$$l_R \geq 0.5 \cdot \sqrt{D_2 \cdot (s_2 - c)} = 54.083 \quad (5.82)$$

Примем величину  $l_R$  равной 86 мм.

5.7.9 Относительная эффективная несущая длина конуса [34]:

$$\mu = \min \left[ \frac{\varepsilon}{\sin(\alpha)}, \sqrt{\frac{(\varphi_{p1} + \varphi_{p2})}{4 \cdot \cos(\alpha)}} \right] = 0.841 \quad (5.83)$$

5.7.10 Коэффициент сопряжения с помощью конуса:

$$B = 2 \cdot \sqrt{\frac{(s_2 - c)}{D_2}} \cdot \min(X_1, X_2, X_3) \quad (5.84)$$

где  $X_1, X_2, X_3$  – вспомогательные величины, определяемые относительно коэффициентов  $f_1, f_2, f_3, f_4$  [34].

5.7.11 Первый коэффициент при выполнении условия [34]:

$$\lambda = 0.85 \leq \frac{|\chi - 1|}{2} = 4.53 \quad (5.85)$$

рассчитывается по следующей формуле [34]:

$$f_1 = \lambda + \min(1, \chi) = 1.85 \quad (5.86)$$

5.7.12 Формула второго коэффициента выбирается исходя из угла сопряжения.

Предварительно рассчитываются следующие вспомогательные величины [34]:

$$\varepsilon_0 = 0.60 \cdot \sqrt{1 + 0.83 \cdot \rho + 0.37 \cdot \rho^2} = 0.6 \quad (5.87)$$

Поскольку  $\varepsilon$  больше, чем  $\varepsilon_0$ , следующий вспомогательный параметр рассчитывается по формуле [34]:

									Лист
									83
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

$$z = 2 \cdot \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right) = 1.997 \quad (5.88)$$

Таким образом [34]:

$$f_2 = 0.71 + 0.52 \cdot \rho + \varepsilon \cdot z = 1.91 \quad (5.89)$$

5.7.13 Третий вспомогательный коэффициент [34]:

$$f_3 = 1 + \left[ \frac{\left[ 12 \cdot \rho^3 \cdot \left( \frac{0.2}{\varepsilon} \right)^4 \right]}{12 \cdot \varepsilon + \rho^2 \cdot \max \left[ 0, \left( \frac{0.5}{\varepsilon} \right)^3 - 1 \right]} \right] = 1 \quad (5.90)$$

5.7.14 Формула для четвертого вспомогательного коэффициента также берётся исходя из того, что угол сопряжения равен  $45^\circ$  [34].

$$f_4 = \max \left[ 1, \min \left[ 1, 0.8 + \left( \frac{6.0}{100 \cdot \varepsilon} \right) + \left( \frac{\rho}{2} \right) \cdot \min \left[ 1, \frac{\left( \frac{4}{3} \right)}{1 + \varepsilon \cdot [1 + \varepsilon \cdot (1 + 5.5 \cdot \varepsilon)]} \right] \right] \right] = 1 \quad (5.91)$$

5.7.15 Вспомогательные коэффициенты  $X_1, X_2, X_3$  [34]:

$$X_1 = \left( \frac{\cos(\alpha)}{\varepsilon} \right) \cdot \left[ \left[ \frac{(\varphi_{p1} + \varphi_{p2})}{4 \cdot \cos(\alpha)} \right] + \lambda \cdot f_1 \right] = 2.682, \quad (5.92)$$

$$X_2 = f_2 \cdot \sqrt{1 + \varphi_{p2}} = 2.701, \quad (5.93)$$

$$X_3 = \chi \cdot f_3 + \left[ \left( \frac{\varphi_{p1} + \varphi_{p2}}{4 \cdot \mu \cdot \cos(\alpha)} \right) + \mu \right] \cdot f_4 = 11.741 \quad (5.94)$$

Тогда:

$$B = 2 \cdot \sqrt{\frac{(s_2 - c)}{D_2}} \cdot \min(X_1, X_2, X_3) = 0.298$$

5.7.16 Допускаемое давление в рубашке:

$$P_{д.руб} = \frac{2 \cdot \sigma_{д.руб} \cdot (s_2 - c) \cdot \varphi_{п2}}{D_2 + (s_2 - c)} \cdot \frac{B}{A} = 0.295 \text{ МПа} \quad (5.95)$$

где  $\varphi_{п2}$  – коэффициент прочности сварного шва рубашки, принимаемый равным единице [34].

5.7.17 Осуществим проверку критерия прочности:

$$P_{руб} = 0.2 < 0.295 = P_{д.руб}$$

										Лист
										84
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

Условие прочности по допускаемому избыточному давлению выполняется.

Таким образом, можно сделать вывод, что принятая исполнительная толщина сопряжения, равная 8 мм, обеспечивает необходимую надёжность конструкции.

## 5.8 Расчёт фланцевого соединения корпуса с крышкой

Названия элементов – цилиндрическая обечайка корпуса, крышка корпуса, фланцевое соединение. Номера позиций на расчётной модели – 6, 7 и 11.

Расчётные схемы фланцевого соединения представлены на рисунках 15 и 16.

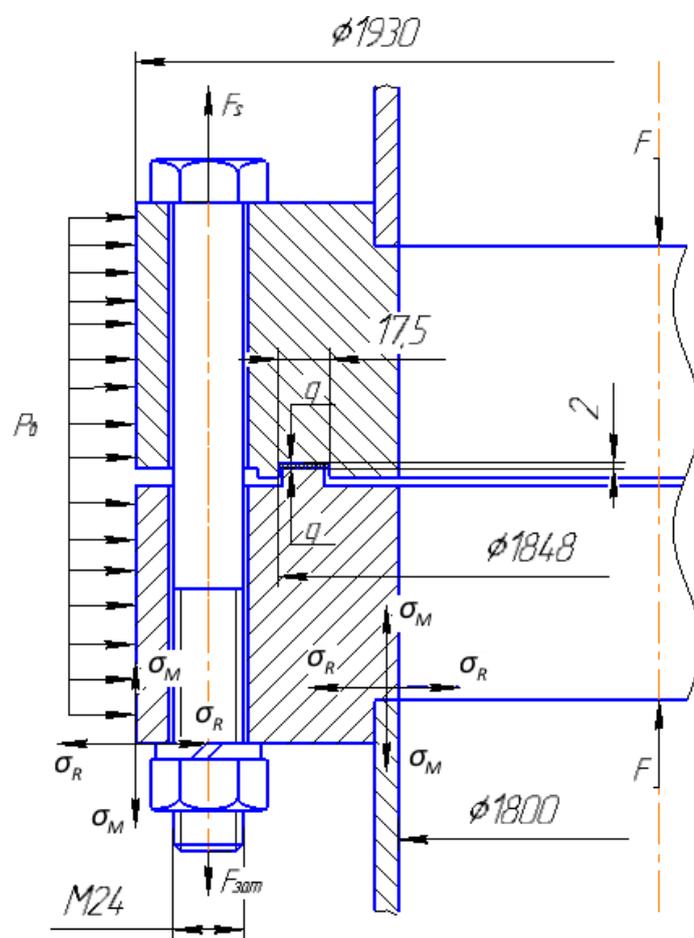


Рисунок 15 – Расчётная схема фланцевого соединения крышки с корпусом

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА.061526.001 ПЗ

Лист

85

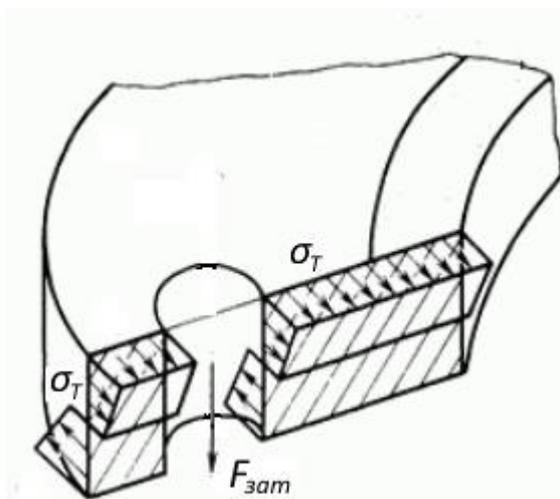


Рисунок 16 – Уточняющая расчётная схема фланцевого соединения крышки с корпусом

где  $P_0$  – внешнее давление атмосферы на аппарат, МПа;  $F_s$  – усилие, действующее на болты со стороны среды аппарата, Н;  $F_{зат}$  – усилие, действующее на болты при затяжке, Н;  $q$  – удельное давление обжатия прокладки, МПа;  $\sigma_R$ ,  $\sigma_M$ ,  $\sigma_T$  – соответственно радиальные, меридиональные и кольцевые напряжения в тарелке или обечайке фланца, МПа.

*Исходные данные для расчёта [35, 36]:*

- внутренний диаметр аппарата, мм,  $D_1 = 1800$ ;
- наружный диаметр фланца, мм,  $D_n = 1930$ ;
- диаметр болтовой окружности, мм,  $D_6 = 1890$ ;
- диаметр середины прокладки, мм,  $D_{сп} = 1830,5$ ;
- ширина прокладки, мм,  $b_n = 17,5$ ;
- высота фланца, мм,  $h = 40$ ;
- высота прокладки, мм,  $h_n = 2$ ;
- толщина обечайки и крышки, мм,  $s_0 = 14$  (пункты 5.1 и 5.3);
- диаметр болтов, мм,  $d = 20$ ;
- число болтов, шт,  $n = 64$ ;
- площадь поперечного сечения болта, мм<sup>2</sup>,  $f_6 = 225$ ;
- расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта, мм,  $L_{60} = 92$ ;
- наружное давление на крышку, МПа,  $P = 0,04$ ;
- внешняя осевая сжимающая сила, Н,  $F = 1,05 \cdot 10^5$ ;
- прибавка к толщине стенки, мм,  $c_0 = 2$  (пункт 4.3);

- температура среды в аппарате, °C,  $t = 95$ ;
- рабочая температура фланца, °C,  $t_f = 91,2$ ;
- рабочая температура болтов, °C,  $t = 80,75$ ;
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т при рабочих условиях, МПа,  $\sigma_{д.ф} = 208,5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т при условиях испытаний, МПа,  $\sigma_{20} = 318$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- допускаемое напряжение стали 20 при рабочих условиях, МПа,  $\sigma_{д.б} = 143$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- допускаемое напряжение стали 20 при условиях испытаний, МПа,  $\sigma_{д.б} = 147$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- модуль продольной упругости стали 08X18Г8Н2Т при рабочих условиях, МПа,  $E = 1,99 \cdot 10^5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- модуль продольной упругости стали 08X18Г8Н2Т при условиях испытаний, МПа,  $E = 2,0 \cdot 10^5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- модуль продольной упругости стали 20 при рабочих условиях, МПа,  $E_б = 1,91 \cdot 10^5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- модуль продольной упругости стали 20 при условиях испытаний, МПа,  $E_{20б} = 1,99 \cdot 10^5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- коэффициент линейного расширения стали 08X18Г8Н2Т, °C<sup>-1</sup>,  $\alpha_f = 16,6 \cdot 10^{-6}$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- коэффициент линейного расширения стали 20, °C<sup>-1</sup>,  $\alpha_б = 11,6 \cdot 10^{-6}$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);
- прокладочный коэффициент, безразмерный,  $m = 2,5$  [38];
- удельное давление обжатия прокладки, МПа,  $q_{обж} = 10$  [38];
- допускаемое удельное давление на прокладку, МПа,  $q_d = 40$  [38];
- коэффициент обжатия, безразмерный,  $K_{обж} = 1$  [38];
- условный модуль сжатия прокладки, МПа,  $E_{п} = 0,02 \cdot 10^5$  [38].

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции фланцевого соединения. Показателями механической надёжности являются прочность болтов при затяжке и в рабочих условиях, прочность прокладки, статическая прочность соединения при затяжке и в рабочих условиях, а также соответствие угла поворота фланца допускаемому значению. Данные условия прочности описываются следующими условиями:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						87
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\sigma_{61} \leq \sigma_{206} \quad (5.96)$$

где  $\sigma_{61}$  – напряжение, возникающее в болтах при затяжке, МПа [36].

$$\sigma_{62} \leq \sigma_{д.6} \quad (5.97)$$

где  $\sigma_{62}$  – напряжение, возникающее в болтах при рабочих условиях, МПа [36].

$$q \leq q_d \quad (5.98)$$

где  $q$  – удельное давление на прокладку, МПа;  $q_d$  – допускаемое удельное давление на прокладку, МПа [36].

$$\sigma_{3\max} < K_T \cdot \sigma_{20} \quad (5.99)$$

$$\sigma_{P\max} < K_T \cdot \sigma_{д.ф} \quad (5.100)$$

где  $\sigma_{3\max}$  – максимальное напряжение, возникающее в болтах при затяжке, МПа;  $\sigma_{P\max}$  – максимальное напряжение, возникающее в болтах при рабочих условиях, МПа;  $K_T$  – коэффициент, учитывающий температурные деформации, принимаемый равным 1,3 [36].

$$\Theta \leq 1.3 \cdot \Theta_d \quad (5.101)$$

где  $\Theta$  – величина угла поворота фланца, °;  $\Theta_d$  – допускаемая величина угла поворота фланца, ° [36].

В соответствии с рекомендациями [32] по привалочной поверхности выбран тип фланца шип-паз, поскольку именно такой тип обеспечивает достаточную герметичность аппарата, содержащего агрессивные и токсичные среды. По стандарту [35] выбрана пара фланцев типа шип-паз и исполнения 2 и 3 в соответствии с диаметром аппарата, равным 1800 мм.

Весь дальнейший расчёт производится в соответствии со стандартом [36].

5.8.1 Эффективная ширина плоской прокладки для случая, когда реальная её ширина больше 15 мм:

$$b_0 = \text{Ceil}(3.8 \sqrt{b_{п}}, 1) = 16 \text{ мм} \quad (5.101)$$

где  $\text{ceil}$  – функция округления в большую сторону [36].

5.8.2 Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке [36]:

$$P_{\text{обж}} = 0.5 \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |P| = 4.601 \times 10^3 \text{ МПа} \quad (5.102)$$

5.8.3 Усилие на прокладке в рабочих условиях  $R_{п}$ , необходимое для герметичности фланцевого соединения, для расчёта на наружное давление принимается равным нулю [36].

5.8.4 Суммарная площадь сечения болтов по внутреннему диаметру резьбы [36]:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		88

$$A_6 = n \cdot f_6 = 1.44 \times 10^4 \text{ мм}^2 \quad (5.103)$$

5.8.5 Равнодействующая нагрузка от давления [36]:

$$Q_d = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{сп})^2 \cdot P \quad Q_d = -1.053 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.104)$$

5.8.6 Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента [36]:

$$Q_{FM} = \max \left( \left| F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{сп}} \right|, \left| F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{сп}} \right| \right) = 1.05 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.105)$$

5.8.7 Податливость прокладки [36]:

$$y_{\Pi} = \frac{h_{\Pi} \cdot K_{обж}}{E_{\Pi} \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_{\Pi}} = 9.937 \times 10^{-9} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} \quad (5.106)$$

5.8.8 Эффективная длина болта при определении податливости [36]:

$$L_6 = L_{60} + 0.28 \cdot d = 97.6 \text{ мм} \quad (5.107)$$

5.8.9 Податливость болтов [36]:

$$y_6 = \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_6} = 3.406 \times 10^{-8} \frac{\text{мм}}{\text{Н}} \quad (5.108)$$

5.8.10 Расчётные параметры фланцев [36]:

- параметр длины обечайки:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot S_0} = 158.745 \text{ мм} \quad (5.109)$$

- отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру [7]:

$$K = \frac{D_H}{D} = 1.072 \quad (5.110)$$

- коэффициенты, зависящие от размеров тарелки фланца [36]:

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.885, \quad (5.111)$$

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 30.432, \quad (5.112)$$

$$\beta_Y = \frac{1}{(K - 1)} \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 27.979, \quad (5.113)$$

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 14.364 \quad (5.114)$$

										Лист
										89
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					



давлением или внешней осевой силой для плоских фланцев с плоскими прокладками [36]:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\Pi} - 2 \cdot e \cdot y_{\Phi} \cdot b}{y_{\Pi} + y_{\text{б}} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\Phi}} = 1.189 \quad (5.122)$$

5.8.20 Коэффициент жёсткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом [36]:

$$\alpha_M = \frac{y_{\text{б}} + 2 \cdot y_{\Phi_{\text{н}}} \cdot b \cdot \left( b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_{\text{б}} + y_{\Pi} \cdot \left( \frac{D_{\text{б}}}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\Phi_{\text{н}}} \cdot b^2} = 1.068 \quad (5.123)$$

5.8.21 Нагрузка, вызванная стеснённостью температурных деформаций в соединениях с плоскими фланцами [36]:

$$Q_t = \gamma \cdot \left[ 2\alpha_{\Phi} \cdot h \cdot (t_{\Phi} - 20) - 2\alpha_{\text{б}} \cdot h \cdot (t_{\text{б}} - 20) \right] = 5.431 \times 10^4 \text{ Н} \quad (5.124)$$

5.8.22 Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения [36] (поскольку на фланцевое соединение не действуют внешние изгибающие моменты, принимаем М равным нулю):

$$P_{\text{б1}} = \max \left[ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \\ \alpha \cdot (Q_{\text{д}} + F) + R_{\Pi} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_t \end{array} \right] = -2.5 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.125)$$

5.8.23 Расчетная нагрузка на болты при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов [36]:

$$P_{\text{б2}} = \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_{\text{б}} \cdot \sigma_{206}) = 8.467 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.126)$$

5.8.24 Расчетная нагрузка на болты фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения [36]:

$$P_{\text{бм}} = \max(P_{\text{б1}}, P_{\text{б2}}) = 8.467 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.127)$$

5.8.25 Расчетная нагрузка на болты фланцевых соединений в рабочих условиях [36]:

$$P_{\text{бр}} = P_{\text{бм}} + (1 - \alpha) \cdot (Q_{\text{д}} + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} = 9.408 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.128)$$

										Лист
										91
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

5.8.26 Расчётное напряжение в болтах [36]:

- при затяжке:

$$\sigma_{61} = \frac{P_{6M}}{A_6} = 58.8 \text{ МПа} \quad (5.129)$$

- при рабочих условиях:

$$\sigma_{62} = \frac{P_{6P}}{A_6} = 65.331 \text{ МПа} \quad (5.130)$$

5.8.27 Проверка условия прочности болтов при затяжке (5.96) и в рабочих условиях (5.97):

$$\begin{aligned} \sigma_{61} &= 58.8 < 147 = \sigma_{206} , \\ \sigma_{62} &= 65.331 < 143 = \sigma_{206} \end{aligned}$$

Поскольку условия (5.96) и (5.97) выполняются, можно сделать вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают надёжность конструкции.

5.8.28 Удельное давление на прокладку [36]:

$$q = \frac{\max(P_{6M}, P_{6P})}{\pi \cdot D_{сп} \cdot b_{П}} = 9.348 \text{ МПа} \quad (5.131)$$

5.8.29 Для мягкой прокладки из фторопласта-4 произведём проверку условия прочности (5.98):

$$q = 9.348 < 40 = q_d$$

Условие (5.98) выполняется, в связи с чем можно сделать вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают надёжность конструкции.

5.8.30 Расчётный изгибающий момент, действующий на плоский фланец при затяжке [36]:

$$M_M = C_F \cdot P_{6M} \cdot b = 2.519 \times 10^7 \text{ Н·мм} \quad (5.132)$$

5.8.31 Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях [36]:

$$M_P = C_F \cdot \max[P_{6P} \cdot b + (Q_d + Q_{FM}) \cdot e, |Q_d + Q_{FM}| \cdot e] = 2.799 \times 10^7 \text{ Н·мм} \quad (5.133)$$

5.8.32 Расчётные напряжения во фланце при затяжке [36]:

- меридиональное изгибное напряжение в обечайке плоского фланца:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		92

$$\sigma_{0M} = \frac{M_M}{\lambda \cdot (S_0 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} = 140.979 \text{ МПа} \quad (5.134)$$

- радиальное напряжение в тарелке плоского фланца в условиях затяжки:

$$\sigma_{RM} = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M = 16.558 \text{ МПа} \quad (5.135)$$

- окружное напряжение в тарелке плоского фланца в условиях затяжки:

$$\sigma_{TM} = \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{RM} = 6.893 \text{ МПа} \quad (5.136)$$

5.8.33 Расчётные напряжения во фланцах в рабочих условиях [36]:

- меридиональное изгибное напряжение для плоских фланцев:

$$\sigma_{0p} = \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_0 - c_0)^2 \cdot D_{пр}} = 156.625 \text{ МПа} \quad (5.137)$$

- максимальное меридиональное мембранное напряжение в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{0mp} = \max \left[ \frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_0)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_0)} \right] = -3.075 \text{ МПа} \quad (5.138)$$

5.8.34 Напряжения в тарелке плоского фланца в рабочих условиях [36]:

- радиальное напряжение:

$$\sigma_{Rp} = \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p = 18.395 \text{ МПа} \quad (5.139)$$

- окружное напряжение:

$$\sigma_{Tp} = \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} = 7.658 \text{ МПа} \quad (5.140)$$

5.8.35 Осуществим проверку условия статической прочности фланцев при затяжке (5.99) и рабочих условиях (5.100).

Максимальное напряжение во фланце при рабочих условиях [36]:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						93
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\sigma_{Pmax} = \max \left( \left( \begin{array}{c} |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}| \end{array} \right) \right) = 178.095 \text{ МПа} \quad (5.141)$$

Максимальное напряжение во фланце при условиях затяжки [36]:

$$\sigma_{3max} = \max(|\sigma_{0m} + \sigma_{Rm}|, |\sigma_{0m} + \sigma_{Tm}|) = 157.536 \text{ МПа} \quad (5.142)$$

Осуществляем непосредственную проверку условий:

$$\sigma_{3max} = 157.536 < 1.3 \cdot 230 = 299 = \sigma_{20},$$

$$\sigma_{Pmax} = 178.095 < 1.3 \cdot 208.5 = 271.05 = \sigma_{д.ф}$$

Поскольку условия (5.99) и (5.100) выполняются, можно сделать вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают надёжность конструкции.

5.8.36 Угол поворота плоского фланца [36]:

$$\Theta = M_p \cdot y_{ф} \cdot \frac{E_{20}}{E} = 3.265 \times 10^{-3} \text{ } ^{\circ} \quad (5.143)$$

5.8.37 Осуществим проверку условия прочности по углу поворота фланца. Учтём при этом, что допускаемый угол поворота фланца по стандарту [36] равен 0.013 градусов.

$$\Theta = 3.265 \cdot 10^{-3} < 0.013 \cdot 1.3 = 0.017 = \Theta_{д}$$

Поскольку неравенство выполняется, делаем вывод, что принятые исполнения фланцев обеспечивают прочность конструкции.

5.8.38 Рассмотрим результаты:

- условие прочности соединения по болтам в условиях затяжки и рабочих условиях – выполняется (пункт 5.8.27);
- условие прочности соединения по прокладке – выполняется (пункт 5.8.29);
- условие статической прочности соединения в условиях затяжки и рабочих условиях – выполняется (пункт 5.8.35);
- условие прочности соединения по углу поворота фланца – выполняется (пункт 5.8.37).

Исходя из сказанного выше, можно сделать вывод, что при принятых исполнениях фланцев надёжность конструкции соединения обеспечена.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						94
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 5.9 Расчёт опор аппарата

Названия элементов – опорные лапы аппарата. Номер позиции на расчётной модели – 12.

Расчётная схема крепления опорных лап представлена на рисунке 17.

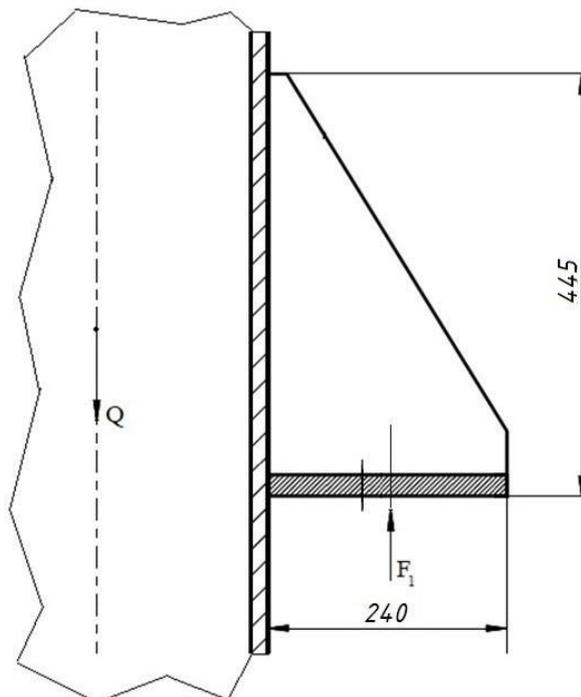


Рисунок 17 – Расчётная схема крепления опорных лап

где  $Q$  – нагрузка на опоры со стороны аппарата, кН;  $F_1$  – вертикальное усилие на опорную стойку, кН.

*Исходные данные для расчёта:*

- масса эллиптической крышки, кг,  $m_{э,к} = 418,5$  [33];
- масса днища рубашки, кг,  $m_{д,р} = 276,3$  [33];
- длина развёртки цилиндрической обечайки, м,  $l_{ц} = 5,729$ ;
- высота цилиндрической обечайки, м,  $H_{ц} = 4,2$  [18];
- толщина стенки цилиндрической обечайки, м,  $s_{ц} = 0,014$  (пункт 5.1);
- объём аппарата, м<sup>3</sup>,  $V_{кор} = 12,5$  [18];
- плотность материала корпуса, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{ст} = 7700$  [37];
- диаметр рубашки, мм,  $D_p = 1950$ ;
- длина развёртки обечайки рубашки, м,  $l_{цр} = 6,126$ ;
- высота обечайки рубашки, м,  $H_{цр} = 4,05$  [18];

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		95

- толщина стенки рубашки, м,  $s_{цр} = 0,008$  (пункт 5.4);
- плотность материала рубашки,  $\text{кг/м}^3$ ,  $\rho_{ст.р} = 7850$  [37];
- давление гидроиспытания в рубашке, МПа,  $p = 0,252$  (пункт 5.4);
- допускаемое напряжение стали 12ХМ, МПа,  $\sigma_{д.руб} = 147$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]);

- масса фланцевого соединения, кг,  $m_{ф} = 203,9$  [35];
- масса привода, кг,  $m_{п} = 640$  [21];
- масса мешалки, кг,  $m_{м} = 73$  [21].

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции опор. Условием прочности является следующее условие:

$$F_1 \leq F_{1.д} \quad (5.144)$$

где  $F_1$  – сила, с которой опора действует на подкладной лист и обечайку рубашки аппарата, Н;  $F_{1.д}$  – допускаемая сила, с которой на обечайку может действовать опора, Н.

Все необходимые для проверки данного условия расчёты осуществляются в соответствии с источниками [21, 38].

5.9.1 Предварительно необходимо рассчитать максимальный вес аппарата, соответствующий условиям гидроиспытаний, когда аппарат и рубашка целиком заполнены водой.

Вес крышки:

$$G_{э.к.1} = g \cdot m_{э.к.1} = 4.105 \times 10^3 \text{ Н} \quad (5.145)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Поскольку крышка идентична днищу, удваиваем данный вес:

$$G_{э} = G_{э.к.1} \cdot 2 = 8.211 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.9.2 Объём материала цилиндрической обечайки:

$$V_{ц} = l_{ц} \cdot H_{ц} \cdot s_{ц} = 0.337 \text{ м}^3 \quad (5.146)$$

5.9.3 Масса обечайки:

$$m_{ц} = V_{ц} \cdot \rho_{ст} = 2.594 \times 10^3 \text{ кг} \quad (5.147)$$

5.9.4 Вес обечайки:

$$G_{ц} = m_{ц} \cdot g = 2.545 \times 10^4 \text{ Н} \quad (5.148)$$

5.9.5 Объём обечайки рубашки по аналогии с формулой (5.146):

$$V_{цр} = l_{цр} \cdot H_{цр} \cdot s_{цр} = 0.198 \text{ м}^3$$

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		96

5.9.6 Масса обечайки рубашки по аналогии с формулой (5.147):

$$m_{\text{цр}} = V_{\text{цр}} \cdot \rho_{\text{ст.р}} = 1.558 \times 10^3 \text{ кг}$$

5.9.7 Вес обечайки рубашки по аналогии с формулой (5.148):

$$G_{\text{цр}} = m_{\text{цр}} \cdot g = 1.528 \times 10^4 \text{ Н}$$

5.9.8 Вес днища рубашки по аналогии с формулой (5.145):

$$G_{\text{др}} = g \cdot m_{\text{др}} = 2.711 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.9.9 Вес фланцевого соединения по аналогии с формулой (5.145):

$$G_{\text{ф}} = m_{\text{ф}} \cdot g = 2 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.9.10 Вес привода и мешалки по аналогии с формулой (5.145):

$$G_{\text{п}} = (m_{\text{п}} + m_{\text{м}}) \cdot g = 6.995 \times 10^3 \text{ Н}$$

5.9.11 Вес штуцеров и других вспомогательных устройств принимаем по [24] равным 10% от веса аппарата без учёта веса привода:

$$G_{\text{пр}} = 0.1 \cdot [G_{\text{ф}} + G_{\text{др}} + G_{\text{цр}} + G_{\text{ц}} + (G_{\text{э}})] = 5.365 \times 10^3 \text{ Н} \quad (5.149)$$

5.9.12 Общий вес пустого аппарата:

$$G_{\text{ап}} = G_{\text{пр}} + G_{\text{ф}} + G_{\text{др}} + G_{\text{цр}} + G_{\text{ц}} + G_{\text{э}} + G_{\text{п}} = 6.601 \times 10^4 \text{ Н} \quad (5.150)$$

5.9.13 Объём воды в рубашке:

$$V_{\text{руб}} = (V_1 - V_2) + (V_3 - V_4) \quad (5.151)$$

где  $V_1$  – объём цилиндрической обечайки рубашки,  $\text{м}^3$ ;  $V_2$  – объём цилиндрической обечайки корпуса,  $\text{м}^3$ ;  $V_3$  – объём эллиптического днища рубашки,  $\text{м}^3$ ;  $V_4$  – объём эллиптического днища корпуса,  $\text{м}^3$ .

Объёмы цилиндрических сегментов, согласно [18], равны 12,095 и 10,629  $\text{м}^3$  соответственно. Объёмы эллиптических сегментов, согласно [33], равны 1,07 и 0,862  $\text{м}^3$  соответственно. Тогда:

$$V_{\text{руб}} = (12.095 - 10.629) + (1.07 - 0.862) = 1.674 \text{ м}^3$$

5.9.14 Объём воды в аппарате при гидравлическом испытании:

$$V_{\text{воды}} = V_{\text{руб}} + V_{\text{кор}} = 14.174 \text{ м}^3 \quad (5.152)$$

5.9.15 Вес воды в аппарате по аналогии с формулой (5.145):

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		97

$$G_{\text{ВОДЫ}} = V_{\text{ВОДЫ}} \cdot \rho_{\text{В}} \cdot g = 1.39 \times 10^5 \text{ Н}$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды, принимаемая для расчёта равной  $1000 \text{ кг/м}^3$ .

5.9.16 Вес аппарат при гидравлическом испытании:

$$G_{\text{п.ап}} = G_{\text{ап}} + G_{\text{ВОДЫ}} = 2.051 \times 10^5 \text{ Н} \quad (5.153)$$

5.9.17 Расположим аппарат в помещении подвешенным между этажами. Для этого в качестве опор можно использовать лапы. Примем количество лап равным четырём. Тогда на одну лапу придётся веса:

$$F_1 = \frac{G_{\text{п.ап}}}{4} = 5.1275 \times 10^4 \text{ Н} \quad (5.154)$$

В соответствии со стандартом [39] принимаем в качестве опорных устройств штампованные опорные лапы с допускаемой нагрузкой на одну лапу, равной  $63000 \text{ Н}$ . Параметры опоры следующие [39]:

- расстояние между средними линиями рёбер опоры, мм,  $g = 215$ ;
- высота опорной лапы, мм,  $h_1 = 445$ ;
- ширина основной плиты опорной лапы, мм,  $b_4 = 225$ ;
- длина подкладного листа, мм,  $b_3 = 600$ ;
- ширина подкладного листа, мм,  $b_2 = 360$ ;
- толщина подкладного листа, мм,  $s_2 = 8$ ;
- длина опорной лапы, мм,  $l_1 = 240$ .

5.9.18 Осуществим проверку применимости расчётных формул [38]:

$$\frac{(s_{\text{цп}} - c)}{D_p} = 3.077 \times 10^{-3} \leq 0.05, \quad (5.155)$$

$$g = 215 \text{ мм} \geq 0.2 \cdot h_1 = 89 \text{ мм}, \quad (5.156)$$

$$0.04 \leq \frac{h_1}{D_p} = 0.228 \leq 0.5, \quad (5.157)$$

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						98
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$0.04 \leq \frac{b_4}{D_p} = 0.115 \leq 0.5, \quad (5.158)$$

$$0.04 \leq \frac{b_3}{D_p} = 0.308 \leq 0.8, \quad (5.159)$$

$$b_2 = 360 \geq 0.6 \cdot b_3 = 360, \quad (5.160)$$

$$b_3 = 600 \leq 1.5 \cdot h_1 = 667.5, \quad (5.170)$$

$$s_2 = 8 \geq s_{\text{цр}} = 8 \quad (5.171)$$

Поскольку все условия выполняются, формулы стандарта применимы для необходимого нам расчёта.

5.9.19 Расстояние между точкой приложения усилия и подкладным листом [38]:

$$e_1 := \frac{5}{6} \cdot l_1 = \frac{5}{6} \cdot 240 = 200 \text{ мм} \quad (5.172)$$

5.9.20 Допускаемое усилие, с которым опора воздействует на обечайку:

$$F_1 \leq F_{1.д} = \frac{\sigma_{i.д} \cdot b_3 \cdot (s_{\text{цр}} - c)^2}{K_8 \cdot (e_1 + s_2)} \quad (5.173)$$

где  $\sigma_{i.д}$  – предельное напряжение изгиба, МПа;  $K_8$  – коэффициент, учитывающий конструкцию опор [38].

5.9.21 Предельное напряжение изгиба:

$$\sigma_{i.д} = K_1 \cdot K_2 \cdot \sigma_{д.руб} \quad (5.174)$$

где  $K_1$  и  $K_2$  – вспомогательные коэффициенты [38].

$K_2$  для условий гидроиспытания принимаем равным 1,05.  $K_1$  рассчитывается по формуле:

$$K_1 = \frac{1 - \nu_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \nu_1 \cdot \nu_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \nu_1 \cdot \nu_2\right)^2 + (1 - \nu_2^2) \cdot \nu_1^2}} \quad (5.175)$$

где  $\nu_1$  – коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба;  $\nu_2$  – коэффициент, учитывающий степень нагрузки общими мембранными напряжениями [38].

5.9.22 Для определения упомянутых в предыдущем пункте коэффициентов произведём расчёт следующих вспомогательных параметров [38]:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						99
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- общие мембранные напряжения:

$$\sigma'_m := \frac{p \cdot D_p}{2 \cdot (s_{\text{цр}} - c)} = \frac{0.252 \cdot 1950}{2 \cdot (8 - 2)} = 40.95 \text{ МПа} \quad (5.176)$$

- расстояние между опорным узлом и ближайшим сварным швом более:

$$\sqrt{D_p \cdot s_{\text{цр}}} = 124.9 \text{ мм} \quad (5.177)$$

а потому позволительно принять коэффициент прочности сварных швов  $\varphi$ , расположенных в области опорного узла, равным 1.

5.9.23 По рекомендации стандарта [38] принимаем  $\nu_1$  равным 0,4. В то же время коэффициент  $\nu_2$  [38]:

$$\nu_2 = \frac{\sigma'_m}{K_2 \cdot \sigma_{\text{д.руб}} \cdot \varphi} = 0.265 \quad (5.178)$$

Таким образом,  $K_1$  по формуле (5.175):

$$K_1 = \frac{1 - \nu_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \nu_1 \cdot \nu_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \nu_1 \cdot \nu_2\right)^2 + (1 - \nu_2^2) \cdot \nu_1^2}} = 0.908$$

Отсюда, по формуле (5.174):

$$\sigma_{\text{ид}} = 0.908 \cdot 1.05 \cdot 147 = 140.15 \text{ МПа}$$

5.9.24 Для определения коэффициента  $K_8$  предварительно определяются следующие вспомогательные параметры [38]:

$$x = \ln \left[ \frac{D_p}{2 \cdot (s_{\text{цр}} - c)} \right] = 5.091, \quad (5.179)$$

$$y = \ln \left( \frac{h_1}{D_p} \right) = -1.478, \quad (5.180)$$

$$y_1 = \ln \left( \frac{b_3}{D_p} \right) = -1.179 \quad (5.190)$$

5.9.25 Коэффициент  $K_8$  [38]:

$$K_g = \min \left\{ \begin{array}{l} \exp[(-49,919-39,119x-107,01y_1-1,693x^2-11,920xy_1 - 39,276y_1^2 + \\ + 0,237x^3 + 1,608x^2y_1 + 2,761xy_1^2 - 3,854y_1^3)10^{-2}] \\ \exp[(-5,964-11,395x-18,984y-2,413x^2-7,286xy - 2,042y^2 + \\ + 0,1322x^3 + 0,4833x^2y + 0,8469xy^2 + 1,428y^3)10^{-2}], \end{array} \right\} = 0.242$$

5.9.26 Тогда по формуле (5.173):

$$F_{1,д} = \frac{0.908 \cdot 1.05 \cdot 147 \cdot 600 \cdot (8 - 2)^2}{0.242 \cdot (200 + 8)} = 6.014 \times 10^4 \text{ Н}$$

5.9.27 Проверим выполнение условия прочности обечайки от воздействия опорных нагрузок (5.144):

$$F_1 = 5.42 \times 10^4 \text{ Н} \leq F_{1,д} = 6.014 \times 10^4 \text{ Н}$$

Условие выполняется. Можно сделать вывод, что при принятых опорных лапах надёжность конструкции обеспечена.

## 5.10 Расчёт вала перемешивающего устройства на виброустойчивость, прочность и жёсткость

Название элемента – гладкий консольный вал аппарата. Номер позиции на расчётной модели – 13.

Схема для расчёта вала представлена на рисунке 18:

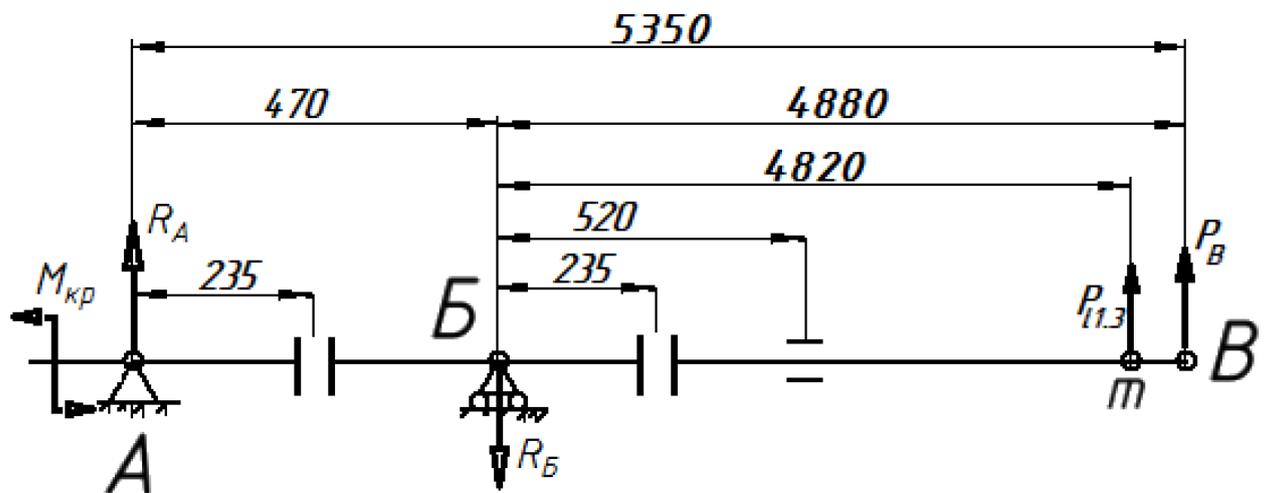


Рисунок 18 – Расчётная схема гладкого консольного вала

Исходные данные для расчёта (в соответствии с пособием [21]):

- длина вала, мм,  $L_2 = 5350$ ;
- длина пролёта, мм,  $L = 470$ ;
- длина консоли, мм,  $L_1 = 4880$ ;
- координата центра тяжести первой муфты, мм,  $l_1 = 235$ ;
- координата центра тяжести второй муфты, мм,  $l_{1.1} = 235$ ;
- координата центра тяжести уплотнения, мм,  $l_{1.2} = 520$ ;
- координата центра тяжести мешалки, мм,  $l_{1.3} = 4820$ ;
- масса муфт, кг,  $m_1$  и  $m_{1.1} = 36$  [40];
- масса уплотнения, кг,  $m_{1.2} = 58$  [40];
- масса мешалки, кг,  $m_{1.3} = 73$  [21];
- модуль предельной упругости материала вала, Па,  $E_B = 2 \cdot 10^{11}$  [37];
- плотность материала вала, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_B = 7700$  [37];
- диаметр аппарата, мм,  $D = 1800$ ;
- диаметр мешалки, мм,  $d_M = 1500$  (пункт 3.2);
- число мешалок на валу, шт,  $n_M = 1$  (пункт 3.2);
- мощность привода, кВт,  $N_{пр} = 5.5$  (пункт 3.2).

Целью выполнения расчёта является проверка надёжности конструкции вала по критериям виброустойчивости, жёсткости и прочности. Неравенства, выражающие эти критерии, имеют следующий вид:

$$\frac{\omega}{\omega_{0к}} \leq 0.7 \quad (5.191)$$

где  $\omega$  – угловая скорость, с<sup>-1</sup>;  $\omega_{0к}$  – критическая угловая скорость, с<sup>-1</sup> [41, 42].

$$A_{zj} \leq A_{zj.д} \quad (5.192)$$

где  $A_{zj}$  – динамическое смещение оси вращения вала вследствие зазоров опор в опасном по жёсткости сечении, м;  $A_{zj.д}$  – допускаемое смещение оси вращения вала в опасном по жёсткости сечении, м [17, 41].

$$\sigma_{экр} \leq \sigma_д \quad (5.193)$$

где  $\sigma_{экр}$  – эквивалентное напряжение в опасном по прочности сечении, МПа;  $\sigma_д$  – допускаемое напряжение в опасном по прочности сечении, МПа [17, 41].

#### 5.10.1 Критическая угловая скорость консольного вала:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		102

$$\omega_{0к} = \left( \frac{\alpha_1}{L_1} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{(E \cdot J)}{m_i}} \quad (5.194)$$

где  $\alpha_1$  – первый корень частного уравнения;  $L_1$  – длина консоли, м;  $J$  – момент инерции поперечного сечения вала, м<sup>4</sup>;  $E$  – модуль упругости материала вала, Па;  $m_i$  – масса единицы длины вала, кг [42].

5.10.2 Относительная приведённая масса деталей на консольном валу:

$$m_{пр.отн} = \frac{m_{сум.пр}}{m_L \cdot L_1} \quad (5.195)$$

где  $m_{сум.пр}$  – суммарная приведённая масса деталей на валу, кг;  $m_L$  – линейная масса вала, кг/м [42].

5.10.2 Линейная масса вала [14]:

$$m_L = \pi \cdot \frac{d_B^2}{4} \cdot \rho_B \quad (5.196)$$

Тогда:

$$m_L = \pi \cdot \left( \frac{65}{1000} \right)^2 \cdot 7700 = 25.551 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$$

5.10.3 Суммарная масса деталей, закреплённых на консольном валу:

$$m_{сум.пр} = \sum_{i=1}^{n_i} m_{i.пр} + \sum_{j=1}^{n_{lj}} m_{lj.пр} \quad (5.197)$$

где  $n_i$  – число деталей в пролёте;  $m_{i.пр}$  – приведённая масса каждой  $i$ -й детали в пролёте, кг;  $n_{lj}$  – число деталей на консоли;  $m_{lj.пр}$  – приведённая масса каждой  $j$ -й детали на консоли, кг [42].

Отметим, что в пролёте вала закреплена муфта. На консоли вала, в соответствии с конструкцией, крепится ещё одна муфта, торцевое уплотнение и рамная мешалка. Произведём следующие действия:

- поместим первую муфту в середине пролёта  $L$ . Её фактическая координата  $l_1$  будет равна 235 мм;
- поместим вторую муфту на том же расстоянии, что и первую, но на консоли  $L_1$ . Её фактическая координата  $l_{1.1}$  будет равна 235 мм;

									Лист
									103
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

ФЮРА.061526.001 ПЗ

- для размещения торцевого уплотнения необходимо их длины консоли  $L_1$  вычесть половину высоты уплотнения, равного 260 мм. Таким образом, фактическая координата уплотнения  $l_{1.2}$  будет равна 520 мм;

- мешалка должна находиться на расстоянии 375 мм от днища аппарата при общей его высоте в 5180 мм. Вычтя из этой высоты расстояние от лопасти мешалки до днища в 375 мм, расстояние от лопасти до шпоночного соединения 580 и дополнительно вычтя 55 мм длины самого шпоночного соединения, получим значение 4170 мм. Добавив к этому значению длину консоли  $L_1$ , получим фактическую координату мешалки  $l_{1.3}$ , равную 4820 мм.

#### 5.10.4 Относительная координата детали в пролёте и консоли:

$$l_{i.отн} = \frac{l_i}{L} \quad (5.198)$$

$$l_{1.j.отн} = \frac{l_{1.j}}{L_1} \quad (5.199)$$

где  $l_i$  – фактическая координата  $i$ -ой детали в пролёте, мм;  $l_{1j}$  – фактическая координата  $j$ -ой детали на консоли [42].

Таким образом:

$$l_{1.отн} = \frac{l_1}{L} = 0.5$$

$$l_{1.1.отн} = \frac{l_{1.1}}{L_1} = 0.043$$

$$l_{1.2.отн} = \frac{l_{1.2}}{L_1} = 0.095$$

$$l_{1.3.отн} = \frac{l_{1.3}}{L_1} = 0.893$$

#### 5.10.5 Приведённая масса детали в пролёте и на консоли:

$$m_{i.пр} = m_i \cdot y_{li}^2 \quad (5.200)$$

$$m_{1j.пр} = m_{1j} \cdot y_{1lj}^2 \quad (5.201)$$

где  $m_i$  – фактическая масса  $i$ -ой детали в пролёте, кг,  $m_{1j}$  – фактическая масса  $j$ -ой детали на консоли, кг;  $y_{li}$  – безразмерный динамический прогиб вала от воздействия  $i$ -ой детали в пролёте;  $y_{1lj}$  – безразмерный динамический прогиб вала от воздействия  $j$ -ой детали

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
						104
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

на консоли [42].

5.10.5 Безразмерные динамические прогибы консолей определяются по графику из пособий [17, 42] в зависимости от относительных координат деталей и относительных длин пролёта и консоли. Относительные длины пролёта и консоли равны соответственно:

$$L_{\text{отн}} = \frac{L}{L_1} = 0.086 ,$$

$$L_{1.\text{отн}} = \frac{L_1}{L_2} = 0.921$$

Безразмерный прогиб в пролёте вала [42]:

$$y_i = K_i \cdot L_{\text{отн}} \quad (5.202)$$

где  $K_i$  – коэффициент, определяемый по рисунку 19 [17].

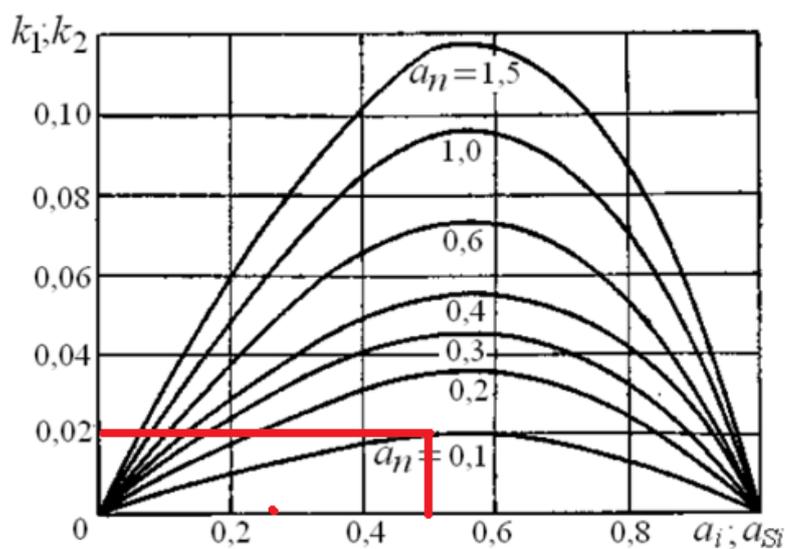


Рисунок 19 – График для определения коэффициентов  $K_i$  [17]

Как видно, для первой муфты коэффициент  $K_1$  равен 0,002. Таким образом, безразмерный прогиб для этой муфты равен:

$$y_{1.1} = K_1 \cdot L_{\text{отн}} = 0.002$$

5.10.6 Безразмерные прогибы консоли для второй муфты, уплотнения и мешалки определяются по рисунку 20 [17].



для жёсткого вала, работающего в системе жидкость-жидкость (равный 0.7 [42]);  $\eta$  – коэффициент, учитывающий условия закрепления вала;  $E$  – модуль упругости материала вала, Па.

Произведём дополнительные расчёты:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = 3.3 \text{ с}^{-1} \quad (5.207)$$

$$\eta = 3 \cdot L_{1.отн} = 2.763 \quad (5.208)$$

Тогда:

$$f = \frac{8 \cdot \rho_B \cdot \omega^2 \cdot L_1^2}{\xi^2 \cdot \eta \cdot E_B} = 7.366 \times 10^{-5}$$

5.10.10 Таким образом, по формулам (5.204) и (5.205):

$$A_1 = q \cdot f \cdot L_1^2 = 5.48 \times 10^{-4},$$

$$A_2 = \frac{8 \cdot m_{\text{сум.пр}} \cdot f \cdot L_1}{\pi \cdot \rho_B} = 7.9 \times 10^{-6}$$

Отсюда по формуле (5.203):

$$d_p = \sqrt{A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}} = 0.058 \text{ м}$$

Данный диаметр вала является минимально требуемым. Присвоим этой переменной значение, уже принятое для диаметра вала в настоящей работе, а именно 65 мм.

5.10.11 Момент инерции сечения вала [42]:

$$J = \frac{\pi \cdot d_p^4}{64} = 8.762 \times 10^{-7} \text{ м}^4 \quad (5.209)$$

5.10.12 Относительная приведённая масса вала [42]:

$$m_{\text{пр.отн}} = \frac{m_{\text{сум.пр}}}{m_L \cdot L_1} = 0.427 \quad (5.210)$$

5.10.13 Первый корень частотного уравнения  $\alpha_1$  определяется по аппроксимирующей формуле [17]:

$$\alpha_1 = 3.146 - 1.3426 \cdot m_{\text{пр.отн}} + 0.836 \cdot m_{\text{пр.отн}}^2 - 0.34086 \cdot m_{\text{пр.отн}}^3 + 0.0638 \cdot m_{\text{пр.отн}}^4 = 2.701 \quad (5.211)$$

5.10.14 Критическая угловая скорость по формуле (5.194):

									Лист
									107
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

$$\omega_{0к} = \left( \frac{\alpha_1}{L_1} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{(E_B \cdot J)}{m_L}} = 20.304 \text{ с}^{-1}$$

5.10.15 Осуществим проверку условия прочности вала по виброустойчивости:

$$\frac{\omega}{\omega_{0к}} = \frac{3.3}{20.3} = 0.163 < 0.7$$

Неравенство выполняется. В связи с этим можно утверждать, что надёжность конструкции по условию виброустойчивости обеспечена.

5.10.16 Эксцентриситет массы мешалки [32]:

$$e_M = \frac{10^{-3}}{\sqrt{\omega}} = 5.506 \times 10^{-4} \text{ м} \quad (5.212)$$

5.10.17 Приведённый эксцентриситет массы мешалки [32]:

$$e_{M.пр} = \frac{e_M}{\gamma_{11.3}} = 6.118 \times 10^{-4} \text{ м} \quad (5.213)$$

5.10.18 Приведённая масса вала [32]:

$$m_{B.пр} = q \cdot \left( m_L \cdot \frac{L_2}{1000} \right) = 37.847 \text{ кг} \quad (5.214)$$

5.10.19 Смещение оси вала за счёт зазоров в опорах [32]:

$$\Delta_{z.1j} = \frac{(\Delta_A + \Delta_B) \cdot (l_{1j} + L)}{L} - \Delta_A \quad (5.215)$$

где  $\Delta_A$  и  $\Delta_B$  – радиальные зазоры в подшипниках, принимаемые для диаметра вала 65 мм равными  $30 \cdot 10^{-6}$  м [32].

Тогда для места крепления мешалки и торцевого уплотнения:

$$\Delta_{z.11.2} = \frac{(\Delta_A + \Delta_B) \cdot (l_{1.2} + L)}{L} - \Delta_A = 9.638 \times 10^{-5} \text{ м},$$

$$\Delta_{z.11.3} = \frac{(\Delta_A + \Delta_B) \cdot (l_{1.3} + L)}{L} - \Delta_A = 6.517 \times 10^{-4} \text{ м}$$

5.10.20 Смещение оси вращения за счёт начальной изогнутости вала [32]:

$$\epsilon_z = \epsilon_B \cdot \gamma_{1.1j} \quad (5.216)$$

где  $\epsilon_B$  – начальная изогнутость вала в точке приведения, м.

Поскольку отношение длины вала к его диаметру составляет:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		108

$$\frac{L_2}{d_B} = 91.154$$

примем по пособию [32] значение начальной изогнутости равным  $0.06 \cdot 10^{-3}$  м.

Тогда для торцевого уплотнения и мешалки:

$$\epsilon_{z.1.2} = \epsilon_B \cdot y_{11.2} = 4.2 \times 10^{-6} \text{ м,}$$

$$\epsilon_{z1.3} = \epsilon_B \cdot y_{11.3} = 5.4 \times 10^{-5} \text{ м}$$

5.10.21 Смещение оси консольного вала в точке приведения [32]:

$$\Delta_B = (\Delta_A + \Delta_B) \cdot \frac{L_2}{L_1} = 6.517 \times 10^{-5} \text{ м (5.217)}$$

5.10.22 Приведённый эксцентриситет массы консольного вала с рамной мешалкой [32]:

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{\sum_{j=1}^n (m_{\text{пр.1j}} \cdot \epsilon_{\text{пр.1j}})}{m_{\text{сум.пр}} + m_{\text{в.пр}}} + \Delta_B + \epsilon_B \quad (5.218)$$

где  $m_{\text{пр.1j}}$  – приведенная масса элемента, кг;  $\epsilon_{\text{пр.1j}}$  – эксцентриситет элемента, м;  $m_{\text{сум.пр}}$  – приведенная масса элементов на валу, кг;  $m_{\text{в.пр}}$  – приведенная масса вала, кг.

5.10.23 Приведённая масса мешалки [32]:

$$m_{\text{пр1.3}} = m_{1.3} \cdot y_{11.3}^2 = 59.13 \text{ кг}$$

Тогда по формуле (5.218):

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{пр1.3}} \cdot \epsilon_{\text{м.пр}}}{m_{\text{сум.пр}} + m_{\text{в.пр}}} + \Delta_B + \epsilon_B = 4.97 \times 10^{-4} \text{ м}$$

поскольку в аппарате установлена только одна мешалка.

5.10.24 Динамический прогиб вала в точке приведения В [32]:

$$y_B = \frac{\epsilon_{\text{пр}}}{\frac{\omega_{0к}}{\omega} - 1} = 9.64 \times 10^{-5} \text{ м (5.219)}$$

5.10.25 Динамическое смещение центра тяжести вала в местах крепления мешалки, торцевого уплотнения и точке приведения В [32]:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		109



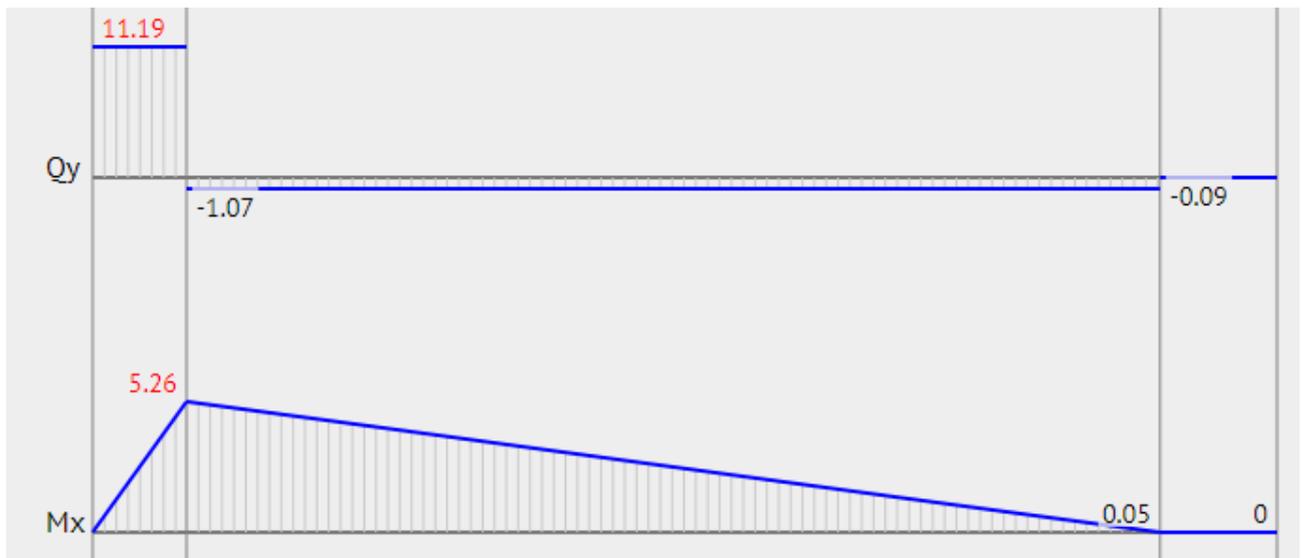


Рисунок 21 – Эпюры поперечных сил и изгибающих моментов на консольном валу

Из рисунка 21 видно, что наиболее опасным по прочности сечением является точка крепления консоли Б, в которой действует изгибающий момент  $M_{и}$ , равный 5,26 Н\*м.

5.10.31 Крутящий момент, передаваемый выходным валом [32]:

$$M_{к} = \frac{N_{пр} \cdot 1000}{\omega} = 1.667 \times 10^3 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (5.226)$$

5.10.32 Момент сопротивления вала в опасном по прочности сечении [32]:

$$W_z = \frac{\pi \cdot d_p^3}{32} = 2.696 \times 10^{-5} \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (5.227)$$

5.10.33 Эквивалентное напряжение в опасном сечении [32]:

$$\sigma_{экр} = \frac{\sqrt{M_{и}^2 + M_{к}^2}}{W_z \cdot 10^6} = 61.842 \text{ МПа} \quad (5.228)$$

где  $M_{и}$  – изгибающий момент в опасном сечении, Н\*м.

5.10.34 Допускаемое напряжение в опасном сечении [32]:

$$\sigma_{д} = \frac{\epsilon_M \cdot \sigma_1}{K_{\sigma.zlj} \cdot n_{\min}} \quad (5.229)$$

где  $\epsilon_M$  – масштабный коэффициент, принимаемый равным 0,65 для легированной стали [17];

$\sigma_1$  – предел выносливости материала вала, равный 294 МПа в соответствии с пособием [32];

$K_{\sigma.zlj}$  – коэффициент, учитывающий шпоночные соединения и принимаемый равным 1.34, поскольку в местах соединения вала с мешалкой имеются шпоночные канавки, выполненные

									Лист
									111
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

торцевой фрезой [32];  $n_{\min}$  – коэффициент запаса прочности материала на выносливость, ориентировочно принимаемый равным 2 [32].

Тогда:

$$\sigma_{\text{д}} = \frac{\varepsilon_{\text{М}} \cdot \sigma_1}{K_{\sigma \cdot zj} \cdot n_{\min}} = 71.306 \quad \text{МПа}$$

5.10.35 Произведём проверку выполнения условия прочности:

$$\sigma_{\text{экв}} = 61.842 \text{ МПа} < \sigma_{\text{д}} = 71.306 \text{ МПа}$$

Неравенство выполняется, в связи с чем можно заключить, что надёжность конструкции вала по механической прочности обеспечена.

5.10.36 Резюмируем произведённый расчёт:

- прочность вала по условию виброустойчивости – обеспечена (пункт 5.10.15);
- прочность вала по условию жёсткости – обеспечена (пункт 5.10.26);
- выполнение условия механической прочности вала – обеспечено (пункт 5.10.35).

Таким образом, делаем вывод, что надёжность конструкции консольного вала общей длины 5350 мм, длиной консоли 470 мм и длиной пролёта 4880 мм обеспечена.

## 5.11 Расчёт укрепления отверстий в реакторе синтеза смолы

Названия элементов – торцевое уплотнение, отверстия для технологических штуцеров в реакторе синтеза смолы. Обозначения на расчётной модели – 4, А, Б, В, Г, Д, Е, Ж, Л. Расположение отверстий на поверхности аппарата также наиболее полно представлено на расчётной модели.

Схемы для расчётов укрепления отверстий представлены на рисунках с 22 по 25.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		112

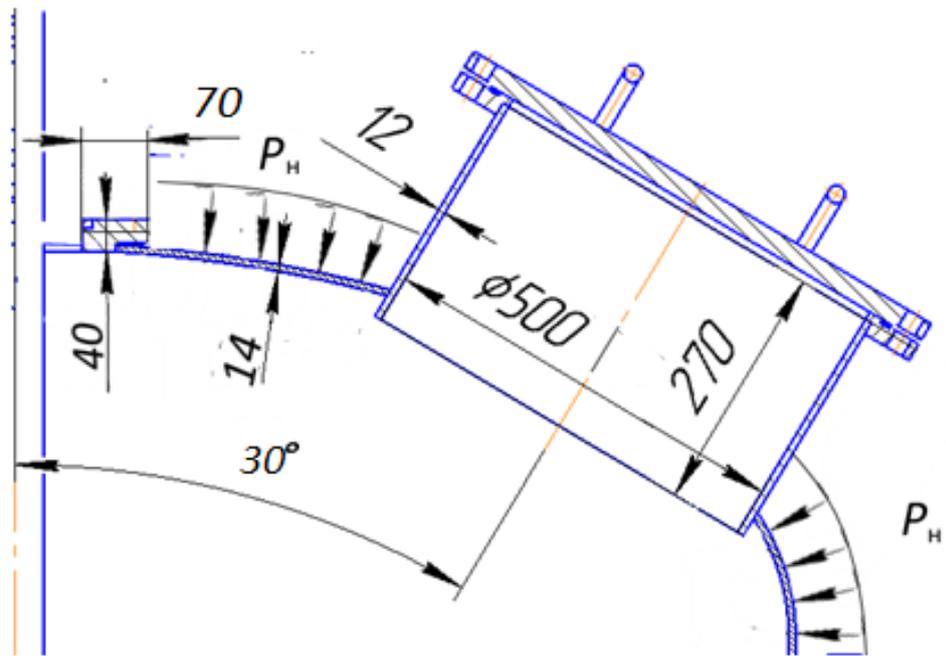


Рисунок 22 – Расчётная схема укрепления взаимовлияющих отверстий под люк-лаз и торцевое уплотнение для рабочих условий  
 где  $p_n$  – наружное давление на аппарат и перемычку между взаимовлияющими отверстиями, МПа.

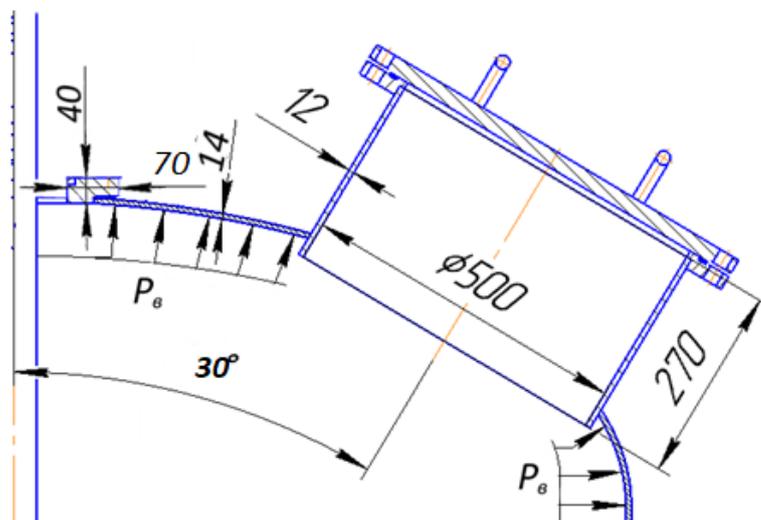


Рисунок 23 – Расчётная схема укрепления взаимовлияющих отверстий под люк-лаз и торцевое уплотнение для условий испытания  
 где  $p_v$  – давление гидравлического испытания на аппарат, МПа.

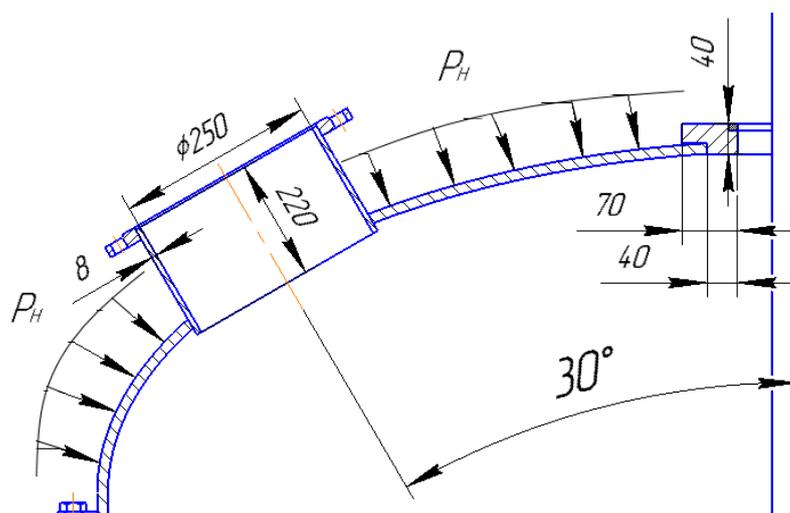


Рисунок 24 – Расчётная схема укрепления взаимодействующих отверстий под штуцер Б и торцевое уплотнение для рабочих условий  
 где  $p_n$  – наружное давление на аппарат и перемычку между взаимодействующими отверстиями, МПа.

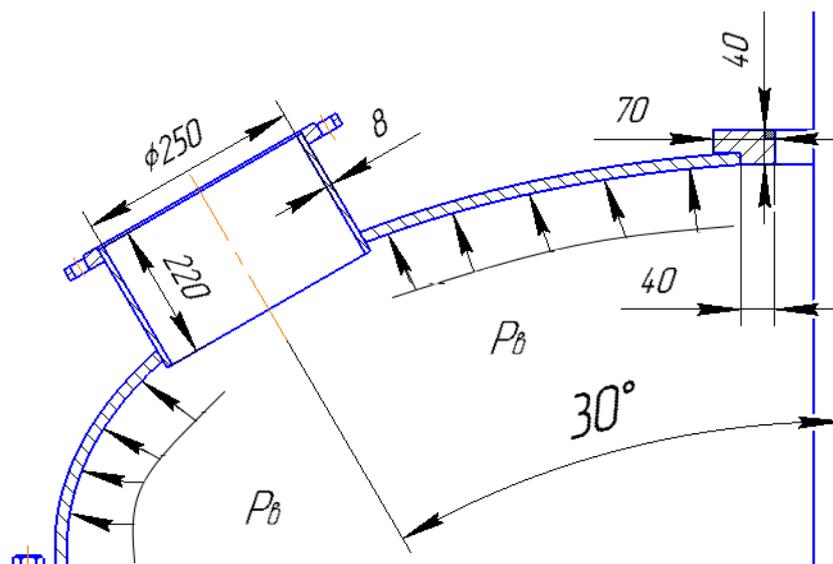


Рисунок 25 – Расчётная схема укрепления взаимодействующих отверстий под штуцер Б и торцевое уплотнение для условий испытания  
 где  $p_b$  – давление гидравлического испытания на аппарат, МПа.

*Исходные данные для расчёта:*

- рабочее давление в рубашке, МПа,  $p_{руб} = 0,2$ ;
- пробное давление в рубашке при гидравлическом испытании, МПа,  $p_{и.руб} = 0,252$  (пункт 5.4);
- наружное давление на крышку и днище корпуса, МПа,  $p_n = 0,04$  МПа;

- пробное давление в корпусе при гидравлическом испытании, МПа,  $p_{и} = 0,2$  МПа (по рекомендации [30]);
- исполнительная толщина стенки обечайки корпуса, днища и крышки, мм,  $s = 14$ ;
- исполнительная толщина стенки обечайки и днища рубашки, мм,  $s_{руб} = 8$ ;
- расчётная толщина стенки днища, мм  $s_{1p} = 4,135$  (пункт 5.2);
- расчётная толщина стенки крышки, мм,  $s_{2p} = 2,21$  (пункт 5.3);
- расчётная толщина стенки обечайки и днища рубашки, мм,  $s_{p,руб} = 1,67$  (пункт 5.4);
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т при рабочих условиях, МПа,  $\sigma_{д} = 170$ ;
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т при условиях гидравлического испытания, МПа,  $\sigma_{д,20} = 318$ ;

Геометрические параметры всех штуцеров указаны в таблице 2 настоящей работы.

Целью расчёта является проверка надёжности конструкции отверстий по критерию прочности, а также проверка взаимного влияния отверстий по этому же критерию. Условие укрепления одиночного отверстия:

$$l_{1p} \cdot (s_1 - s_{1p} - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3 + l_p \cdot (s - s_p - c) \geq (5.230) \\ \geq 0.5 \cdot (d_p - d_{оп}) \cdot s_p$$

где  $l_{1p}$ ,  $l_{2p}$ ,  $l_{3p}$ ,  $l_p$  – расчётные длины внутренней и внешней части штуцера, накладного кольца и зоны укрепления вокруг отверстия, мм;  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$ ,  $s$  – исполнительные толщины внутренней и внешней части штуцера, накладного кольца и зоны укрепления вокруг отверстия, мм;  $s_{1p}$ ,  $s_p$  – расчётные толщины внутренней части штуцера и зоны укрепления вокруг отверстия, мм;  $c_s$ ,  $c_{s1}$ ,  $c$  – прибавки на различные виды разрушений для штуцеров, укрепляющих элементов и зоны укрепления;  $d_p$  – расчётный диаметр отверстия, мм;  $d_{оп}$  – расчётный диаметр отверстия, не требующий дополнительного укрепления,  $\chi_1$ ,  $\chi_2$ ,  $\chi_3$  – отношения допускаемых напряжений материалов обечайки и штуцера [44].

Условие прочности для одиночного и взаимовлияющих отверстий:

$$p \leq p_{д} \quad (5.231)$$

$p$  – расчётное внутреннее или внешнее давление на зону укрепления отверстия или перемычку между взаимно влияющими отверстиями, МПа;  $p_{д}$  – допускаемое внутреннее или внешнее давление на зону укрепления отверстия или перемычку между взаимно влияющими

									Лист
									115
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

отверстиями [44].

5.11.1 Расчётные диаметры укрепляемых элементов для штуцеров, расположенных нормально к поверхности обечайки и смещённых штуцеров на эллиптическом днище:

$$D_p = D, \quad (5.232)$$

$$D_p = 2 \cdot D \cdot \sqrt{1 - 3 \cdot \left(\frac{x}{D}\right)^2} \quad (5.233)$$

где  $x$  – расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища, мм [44].

Поскольку исполнительные и расчётные толщины укрепляемых элементов уже определены в пунктах работы с 5.1 по 5.4, необходимо рассчитать для каждого из отверстий максимальный диаметр, не требующий дополнительного укрепления:

$$d_o = 2 \cdot \left( \frac{s - c}{s_p} - 0.8 \right) \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} \quad (5.234)$$

где  $s$  – исполнительная толщина укрепляемого элемента, мм;  $s_p$  – расчётная толщина укрепляемого элемента [44].

Все имеющиеся отверстия в данный момент рассматриваются как одиночные.

Поскольку в данном случае мы имеем дело с большим количеством однотипных расчётов, структурируем их в таблицу 5, воспользовавшись упомянутыми сверху формулами.

Таблица 5 – Расчёт диаметров отверстий, не требующих дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда

Обозначение	$D_y$ по [25], мм	$D$ , мм	$x$ , мм	$D_p$ , мм	$s$ , мм	$s_p$ , мм	$d_o$ , мм
А	80	1800	575	2998,7	14	2,21	1756,5
Б	250	1800	575	2998,7	14	2,21	1756,5
В	80	1800	0	3600	14	4,135	873,81
Г	150	1950	—	1950	8	1,67	604,18
Д	32	1950	300	3759	8	1,672	837,56

Продолжение таблицы 5

Обозначение	D <sub>y</sub> по [25], мм	D, мм	x, мм	D <sub>p</sub> , мм	s, мм	s <sub>p</sub> , мм	d <sub>o</sub> , мм
Е	25	1800	575	2998,8	14	2,21	1756,5
Ж	25	1800	575	2998,8	14	2,21	1756,5
Л	500	1800	575	2998,8	14	2,21	1756,5
У	235	1800	0	3600	14	2,21	1924,6

Как видно из приведённой выше таблицы, ни одно из установленных на аппарате отверстий не требует дополнительного укрепления ввиду избыточных толщин стенок рубашки и корпуса. Поэтому позволительно принять диаметры отверстий и остальные параметры выбранных штуцеров по документу [25].

5.11.2 Штуцера В, Г и Д являются одиночными, так как первый является единственным, размещённым на днище аппарата, а два других размещены на рубашке в большом удалении друг от друга.

5.11.3 Минимальное расстояние между наружными поверхностями любых двух соседних штуцеров из пяти расположенных на крышке вокруг торцевого уплотнения [44]:

$$b = \sqrt{D_{p.кр} \cdot (s - c)} + \sqrt{D_{p.кр} \cdot (s - c)} = 379.473 \text{ мм (5.235)}$$

Тогда расположим штуцера на крышке таким образом, как показано на модели, дабы между соседними штуцерами не возникало взаимного влияния. Взаимное влияние возникает между отверстием под люк-лаз на 500 мм, отверстием под торцевое уплотнение 235 мм и отверстием для отвода паров воды из реактора 250 мм. Произведём их расчёт с учётом известных исполнительных размеров.

5.11.4 Учтём, что при установке торцевого уплотнения в отверстие диаметром 235 мм уже было вварено укрепляющее кольцо длиной  $l_{2,y} = 40$  мм и толщиной  $s_{2,y} = 40$  мм. Учтём также, что для люка-лаза уже принята его исполнительная длина и толщина, он вварен внутрь на  $l_{1,л} = 5$  мм и отстаёт от поверхности крышки на  $l_{3,л} = 251$  мм. Толщины штуцера  $s_{1,л}$  и  $s_{3,л}$  равны 12 мм. Поскольку штуцера изготавливаются из той же стали 08X18Г8Н2Т, что и корпусные элементы, все соотношения допускаемых напряжений равны 1. Коэффициенты прочности сварных швов также принимаются равными 1. Коэффициент



размеры люка-лаза, а также выбранное торцевое уплотнение обеспечивают надёжность конструкции.

5.11.8 Произведём тот же расчёт для штуцера Б и торцевого уплотнения. Значения  $K_1$ ,  $K_3$  и  $l_{1.Y}$  остаются теми же, что и в предыдущем расчёте. Штуцер Б вварен внутрь на  $l_{1.Б} = 5$  мм и отстаёт от поверхности крышки на  $l_{3.Б} = 201$  мм. Коэффициент понижения прочности [44]:

$$V_1 = \min \left[ 1, \frac{1 + \frac{l_{1.Б} \cdot s_{1.Б} \cdot \chi_1 + l_{3.Б} \cdot s_{3.Б} \cdot \chi_3 + l_{2.Y} \cdot s_{2.Y} \cdot \chi_2}{b_{yБ} \cdot s}}{K_3 \cdot \left( 0.8 + \frac{d_y + d_Б}{2 \cdot b_{yБ}} \right) + K_1 \cdot \left( \frac{d_y}{D_{p.Y}} \cdot \frac{\phi}{\phi_y} \cdot \frac{l_{1.Y}}{b_{yБ}} + \frac{d_Б}{D_{p.Б}} \cdot \frac{\phi}{\phi_Б} \cdot \frac{l_{1.Б}}{b_{yБ}} \right)} \right] = 1$$

где  $b_{yБ}$  конструктивно принято равным 332,5 мм.

5.11.9 Допускаемое давление по условию прочности:

$$P_{гр.1} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \phi \cdot \sigma_d}{0.5 \cdot (D_{p.Y} + D_{p.Б}) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 2.464 \text{ МПа}$$

5.11.10 Допускаемое давление для условий испытания:

$$P_{д.и} = \frac{2 \cdot K_1 \cdot (s - c) \cdot \phi \cdot \sigma_{д.20}}{0.5 \cdot (D_{p.Y} + D_{p.Б}) + (s - c) \cdot V_1} \cdot V_1 = 4.609 \text{ МПа}$$

5.11.11 Допускаемое давление на перемычку для рабочих условий:

$$P_{д.1} = \frac{P_{гр.1}}{\sqrt{1 + \left( \frac{P_{гр.1}}{P_E} \right)^2}} = 1.296 \text{ МПа}$$

5.11.12 Осуществим проверку условий прочности:

$$p = 0.04 \text{ МПа} < p_{д.1} = 1.296 \text{ МПа}$$

$$p = 0.2 \text{ МПа} < p_{д.и.1} = 4.609 \text{ МПа}$$

Условия прочности выполняются. Таким образом, можно сделать вывод, что принятые в пункте 3.4 размеры штуцера Б и торцевого уплотнения обеспечивают надёжность конструкции.

										Лист
										119
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

## 5.12 Расчёт шпоночного соединения вала с мешалкой

Названия элементов – гладкий вал аппарата, рамная мешалка. Номера позиций на расчётной модели – 5, 13.

Схема для расчёта шпоночного соединения представлена на рисунке 26.

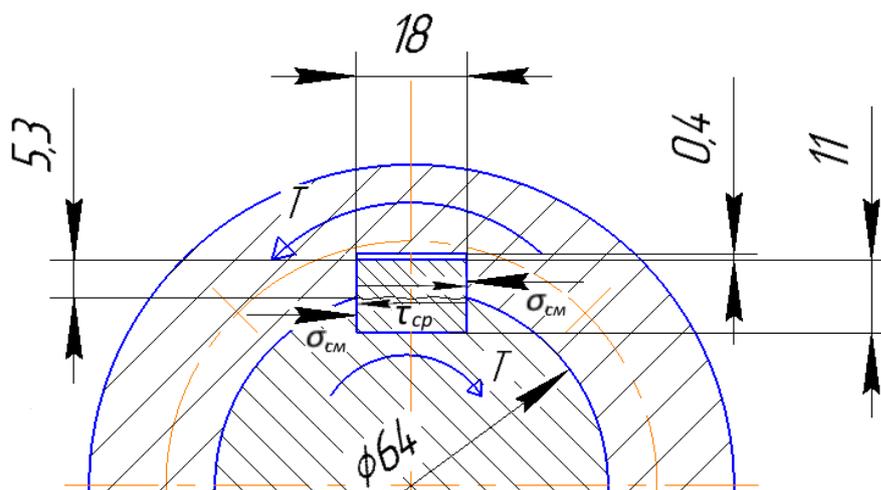


Рисунок 26 – Расчётная схема шпоночного соединения вала с рамной мешалкой где  $T$  – крутящий момент на валу, Н\*м;  $\sigma_{см}$  – напряжение смятия шпонки, МПа;  $\tau_{ср}$  – напряжение шпонки на срез, МПа.

Исходные данные для расчёта:

- крутящий момент на валу, Н\*м,  $T = 1,667 \cdot 10^3$  (пункт 5.10);
- диаметр вала, мм,  $d = 65$  (пункт 3.2);
- ширина шпонки, мм,  $b = 18$  [45];
- рабочая длина шпонки, мм,  $l_p = 90$  [45];
- справочный размер шпонки для расчёта на смятие, мм,  $K = 4$  [45];
- допускаемое напряжение стали 08X18Г8Н2Т при работе шпоночного соединения, МПа,  $\sigma_d = 207,5$  (таблица 3 настоящей работы по данным стандарта [28]).

Целью расчёта является проверка надёжности конструкции шпоночного соединения по прочности на смятие и срез. Условия прочности на смятие и срез:

$$\sigma_{см} \leq \sigma_{д.см} \quad (5.239)$$

$$\tau_c \leq \tau_{д.с} \quad (5.240)$$

где  $\sigma_{см}$  – расчётное значение напряжения шпонки на смятие, МПа;  $\tau_c$  – расчётное значение напряжения шпонки на срез, МПа [46].

									Лист
									120
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

Все вычисления производятся в соответствии с пособием [46]:

5.12.1 Для соединения вала с мешалкой принята призматическая шпонка по стандарту [45]. Расчётное напряжение на смятие [46]:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{2 \cdot T}{d \cdot l_p \cdot K} = 142.479 \text{ МПа (5.241)}$$

5.12.2 Расчётное напряжение на срез [46]:

$$\tau_c = \frac{2 \cdot T}{d \cdot l_p \cdot b} = 31.662 \text{ МПа (5.242)}$$

5.12.3 Поскольку шпоночное соединение будет контактировать с агрессивной средой в аппарате, необходимо изготавливать шпонки из той же стали 08X18Г8Н2Т, что и основные детали реактора. В соответствии с рекомендациями [46] допускаемые напряжения на смятие и срез принимаются как:

$$\sigma_{\text{д.см}} = (2 \dots 2.5) \cdot \sigma_{\text{д}}, \quad (5.243)$$

$$\tau_{\text{д.с}} = (0.7 \dots 0.8) \cdot \sigma_{\text{д}} \quad (5.244)$$

То есть:

$$\sigma_{\text{д.см}} = 2 \cdot \sigma_{\text{д}} = 415 \text{ МПа},$$

$$\tau_{\text{д.с}} = 0.7 \cdot \sigma_{\text{д}} = 145.25 \text{ МПа}$$

5.12.4 Произведём проверку выполнения условий прочности на смятие и срез:

$$\sigma_{\text{см}} = 142.5 \text{ МПа} < \sigma_{\text{д.см}} = 415 \text{ МПа}$$

$$\tau_c = 31.7 \text{ МПа} < \tau_{\text{д.с}} = 145.25 \text{ МПа}$$

Условия прочности выполняются. Делаем вывод, что принятая призматическая шпонка с шириной 18 мм и рабочей длиной 90 мм обеспечивает надёжность конструкции соединения.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		121

## 6 Поверочный расчёт реактора синтеза смолы

При поверочном расчёте осуществляется оценка надёжности всей конструкции аппарата во время его работы. Рассмотрим некоторые нагрузки, для которых необходим поверочный расчёт:

- химический реактор не испытывает в процессе работы дополнительных температурных деформаций, которые не были бы учтены в разделах с 2 по 5. В конструкции реактора нет деформирующихся под действием температуры деталей, которые были бы жёстко закреплены с двух сторон, как это происходит в теплообменных аппаратах;
- опорные нагрузки для реактора синтеза карбамидоформальдегидной смолы были рассчитаны в пункте 5.9 настоящей работы, дополнительных опорных нагрузок реактор не испытывает;
- поскольку в согласии с пунктом 3.5 настоящей работы было принято расположить реактор в перекрытии между этажами цеха, нет необходимости производить его расчёт на ветровую или снеговую нагрузку;
- предполагается осуществление установки и введение реактора в эксплуатацию в Томской области либо ближайших к ней областях. Эти области не подвержены значительному воздействию сейсмической активности, а потому нет необходимости в проведении данного поверочного расчёта.

Таким образом, можно сделать вывод, что в дополнительных поверочных расчётах химического реактора для производства карбамидоформальдегидной смолы нет необходимости.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Студент</i>		<i>Желнорович В.А.</i>			<i>Поверочный расчёт реактора синтеза смолы</i>		
<i>Руковод.</i>		<i>Беляев В.М.</i>					
<i>Конс.</i>							
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Руков. ООП</i>		<i>Краснокутская Е.А.</i>					
					<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
					<i>Д</i>	<i>122</i>	<i>1</i>

## 7                      Результаты                      расчётов                      реактора                      синтеза карбамидоформальдегидной смолы

В соответствии с произведёнными расчётами были приняты следующие конструктивные решения:

- аппарат – химический реактор для получения карбамидоформальдегидной смолы;
- положение аппарата – вертикальное;
- тип аппарата – с механическим перемешивающим устройством;
- число мешалок – одна;
- тип мешалки – рамная;
- диаметр мешалки – 1500 мм;
- тип привода – II с одной промежуточной опорой;
- мощность привода – 5,5 кВт;
- тип вала – консольный;
- длина вала – 5350 мм;
- тип соединения вала с мешалкой – шпоночное;
- тип шпонки – призматическая по [45];
- тип муфт на валу – втулочно-пальцевые;
- тип уплотнения вала – торцевое;
- объём аппарата – 12,5 м<sup>3</sup>;
- внутренний диаметр аппарата – 1800 мм;
- высота аппарата – 5180;
- тип крышек и днищ – эллиптические по [33];
- тип теплообменного устройства – гладкая рубашка;
- тип теплоносителя в рубашке – глухой пар;
- внутренний диаметр рубашки – 1950 мм;
- высота рубашки – 4050 мм;
- площадь поверхности теплообмена – 23,3 м<sup>2</sup>;

					<b>ФЮРА.061526.001 ПЗ</b>			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Студент		Желнорович В.А.			Результаты расчётов реактора синтеза карбамидоформальдегидной смолы	Лит.	Лист	Листов
Руковод.		Беляев В.М.				Д	123	5
Конс.								
Н. Контр.								
Руков. ООП		Краснокутская Е.А.						

- тип соединения корпуса с крышкой – фланцевое, исполнения 2 и 3 по [35];
- тип опор – опорные лапы по [39];
- число опорных лап – 4;
- число технологических штуцеров – 7;
- характеристики штуцеров – по [25] (см. таб.2).

Проверку различных условий, осуществляющуюся в течение расчётов, приведённых в настоящей работе, продемонстрируем в форме таблицы 6.

Таблица 6 – Результаты расчётов реактора синтеза карбамидоформальдегидной смолы

Раздел	Результаты			
	Деталь	Параметр	Расчётное значение	Допускаемое значение
Технологический расчёт	Корпус аппарата	Объём, м <sup>3</sup>	12,5	—
		Внутренний диаметр, мм	1800	—
		Высота, мм	5180	—
	Вал аппарата	Частота вращения, об/мин	31,5	—
	Привод	Мощность, кВт	5,5	—
	Теплообменная рубашка	Поверхность теплообмена, м <sup>2</sup>	23,285	22,77
		Внутренний диаметр, мм	1950	—
		Высота, мм	4050	—
	Технологические штуцера	Условный проход, мм	(см. таб. 2)	—
		Толщина стенки, мм	(см. таб. 2)	—
		Длина патрубка, мм	(см. таб. 2)	—
Механический расчёт	Цилиндрическая обечайка корпуса аппарата	Толщина стенки, мм	14	—
		Условие устойчивости для рабочих условий	0,556	1
		Давление для условий испытания, МПа	0,2	4,212

Продолжение таблицы 6

Раздел	Результаты			
	Деталь	Параметр	Расчётное значение	Допускаемое значение
Механический расчёт	Эллиптическое днище корпуса аппарата	Толщина стенки, мм	14	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,14	1,341
		Давление для условий испытания, МПа	0,2	4,226
	Эллиптическая крышка корпуса аппарата	Толщина стенки, мм	14	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,04	1,341
		Давление для условий испытания, МПа	0,2	4,226
	Цилиндрическая обечайка рубашки аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,2	0,896
		Давление для условий испытания, МПа	0,252	0,903
	Эллиптическое днище рубашки аппарата	Толщина стенки, мм	8	—
		Давление для рабочих условий, МПа	0,2	0,896
		Давление для условий испытания, МПа	0,252	0,903
	Сопряжение эллиптической и цилиндрической обечаек корпуса	Максимальное краевое напряжение, Па	$5,25 \cdot 10^6$	$2,763 \cdot 10^8$
	Сопряжение эллиптической и цилиндрической обечаек рубашки	Максимальное краевое напряжение, Па	$1,625 \cdot 10^7$	$1,898 \cdot 10^8$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

ФЮРА.061526.001 ПЗ

Лист

125

Продолжение таблицы 6

Раздел	Результаты			
	Деталь	Параметр	Расчётное значение	Допускаемое значение
Механический расчёт	Сопряжение рубашки с корпусом	Толщина сопряжения, мм	8	—
		Давление в рубашке	0,2	0,295
	Фланцевое соединение	Напряжение в болтах при затяжке, МПа	58,8	147
		Напряжение в болтах при рабочих условиях, МПа	65,3	143
		Удельное давление на прокладку, МПа	9,4	40
		Максимальное напряжение во фланце при затяжке, МПа	157,5	299
		Максимальное напряжение во фланце при рабочих условиях, МПа	178,1	271
		Угол поворота, °	$3,3 \cdot 10^{-3}$	0,017
		Опорные лапы аппарата	Нагрузка на одну опорную лапу, Н	54200
	Вал аппарата	Условие виброустойчивости	0,163	0,7
		Динамическое смещение центра тяжести в опасном по жёсткости сечении, м	$9,4 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
		Эквивалентное напряжение в опасном по прочности сечении, МПа	61,8	71,3

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА.061526.001 ПЗ

Лист

126

Продолжение таблицы 6

Раздел	Результаты			
	Деталь	Параметр	Расчётное значение	Допускаемое значение
Механический расчёт	Отверстия под люк-лаз и торцевое уплотнение	Давление на перемычку между отверстиями в рабочих условиях, МПа	0,04	1,27
		Давление на перемычку между отверстиями в условиях испытания, МПа	0,2	4,303
	Отверстия под штуцер Б и торцевое уплотнение	Давление на перемычку между отверстиями в рабочих условиях, МПа	0,04	1,296
		Давление на перемычку между отверстиями в условиях испытания, МПа	0,2	4,609
	Шпоночное соединение вала с мешалкой	Напряжение на смятие, МПа	142,5	415
		Напряжение на срез, МПа	31,7	145,25

## 8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данном разделе выпускной квалификационной работы рассмотрена экономическая целесообразность претворения в жизнь предложенного проекта.

Целью проекта является создание автоматизированной системы проектирования химических реакторов и её реализация на примере реактора с гладкой теплообменной рубашкой и перемешивающим устройством для производства карбамидоформальдегидной смолы марки КФ-Ж.

Сферой применения проекта является одна из отраслей промышленности, а именно – химическое машиностроение.

Потенциальными потребителями результатов реализации проекта являются компании и частные лица, составляющие рынок химического оборудования.

Конечным результатом реализации проекта является удовлетворение двух потребностей:

- предоставление на рынок более энергоэффективного и экологичного химического оборудования для производства формальдегидных смол;
- упрощение процесса проектирования реакторов различного назначения за счёт создания программы их расчёта на базе MathCAD.

### 8.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований

В данном подразделе проект химического реактора для производства карбамидоформальдегидной смолы рассмотрен с точки зрения его коммерческой значимости и экономических перспектив. Необходимые для данного рассмотрения расчёты произведены в соответствии с пособием [47].

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Студент</i>		<i>Желнарович В.А.</i>			<i>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Беляев В.М.</i>				<i>Д</i>	<i>128</i>	<i>19</i>
<i>Конс.</i>		<i>Верховская М.В.</i>						
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Руков. ООП</i>		<i>Краснокутская Е.А.</i>						

## 8.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.

### Сегментация рынка

Продуктом производства в соответствии с предлагаемым в данной бакалаврской работе проектом является химический реактор с гладкой теплообменной рубашкой для производства карбамидоформальдегидной смолы.

Целевым рынком для производства подобного рода является рынок химического оборудования.

В качестве двух основных критериев сегментирования рынка предполагается выделить:

- географическое положение, а именно – Российская Федерация, ближнее зарубежье, дальнее зарубежье;
- тип потенциального потребителя – государственные химические компании, частные химические компании, частные лица.

В соответствии с выбранными критериями строится карта сегментации рынка химического оборудования. Данная карта отражена на рисунке 27. В качестве конкурирующих компаний были взяты предприятия Экотех НН Химтехпром, ОАО НИИПТхиммаш и завод металлоконструкций и промышленного оборудования «ЮВС». Информация, необходимая для построения данной карты, была взята с официальных сайтов предприятий [48–50].

		Географическое положение		
		Российская федерация	Ближнее зарубежье	Дальнее зарубежье
Тип потребителя	Государственные компании			
	Частные компании			
	Частные лица			

Рисунок 27 – Карта сегментирования рынка химического оборудования

где:



– Экотех НН  
Химтехпропм



– ОАО  
НИИПТхиммаш



– Завод  
"ЮВС"

В соответствии с приведённой на рисунке 27 картой сегментирования были сделаны

выводы:

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		129

- основные сегменты рынка химического оборудования в рамках данной работы было целесообразно разделить по признакам географического положения и типам потребителей;

- наиболее благоприятным для продаж химических реакторов на первых этапах развития предприятия, в соответствии с картой, является сегмент частных компаний, базирующихся в Российской Федерации;

- привлекательными для предприятия в будущем, в соответствии с картой, представляются сегменты частных компаний Российской Федерации и ближнего зарубежья.

### 8.1.2 Оценка перспективности разработки

В целях оценки качества предлагаемой научной разработки и перспектив её коммерческого успеха в рамках данной бакалаврской работы использовалась технология QuaD.

Для проведения анализа проекта по технологии QuaD были предварительно распределены веса критериев, по которым оценивается научная разработка. В рамках производства химических реакторов одними из наиболее весомых критериев были выбраны:

- энергоэффективность – 0,1;
- надёжность – 0,1;
- безопасность – 0,1;
- простота эксплуатации – 0,12;
- ремонтпригодность – 0,12;
- цена – 0,1.

В соответствии с результатами конструктивно-механического расчёта химического реактора одними из наивысших баллов были отмечены следующие критерии:

- надёжность – 90;
- унифицированность – 92;
- безопасность – 89;
- простота эксплуатации – 86;
- ремонтпригодность – 88.

В соответствии с пособием [47] список критериев, их веса, а также необходимые расчётные величины заносятся в таблицу 7.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						30
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Таблица 7 – Оценочная карта для анализа по технологии QuaD [47]

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
<b>Показатели оценки качества разработки</b>					
1. Энергоэффективность	0,1	81	100	0,81	0,081
2. Помехоустойчивость	0,05	85	100	0,85	0,0425
3. Надёжность	0,12	90	100	0,9	0,108
4. Унифицированность	0,05	92	100	0,92	0,046
5. Уровень материалоемкости разработки	0,05	82	100	0,82	0,041
6. Уровень шума	0,01	70	100	0,7	0,007
7. Безопасность	0,1	89	100	0,89	0,089
8. Потребность в ресурсах памяти	0,005	87	100	0,87	0,00435
9. Функциональная мощность	0,02	75	100	0,75	0,015
10. Простота эксплуатации	0,12	86	100	0,86	0,1032
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,005	84	100	0,84	0,0042
12. Ремонтопригодность	0,12	88	100	0,88	0,1056
<b>Показатели оценки коммерческого потенциала разработки</b>					
13. Конкурентоспособность продукта	0,03	73	100	0,73	0,0219
14. Уровень проникновения на рынок	0,01	68	100	0,68	0,0068
15. Перспективность рынка	0,01	78	100	0,78	0,0078

Продолжение таблицы 7

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
<b>Показатели оценки коммерческого потенциала разработки</b>					
16. Цена	0,1	60	100	0,6	0,06
17. Послепродажное обслуживание	0,05	71	100	0,71	0,0355
18. Финансовая эффективность научной разработки	0,03	77	100	0,77	0,0231
19. Срок выхода на рынок	0,01	69	100	0,69	0,0069
20. Наличие сертификации разработки	0,01	74	100	0,74	0,0074
Итого	1				0,81625

Величина, помещённая в графе таблицы «Итого», рассчитана по формуле из [47]:

$$P_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^{20} (B_i \cdot B_i) \quad (8.1)$$

где  $P_{\text{ср}}$  – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;  $B_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – средневзвешенное значение  $i$ -го показателя [47].

В соответствии с предложенной в [47] классификацией можно говорить о перспективности предложенной в бакалаврской работе научной разработки, поскольку значение средневзвешенного показателя качества и перспективности составило 0,82 или 82 балла. Однако, в результате анализа было выяснено, что слабостью разработки могут оказаться цена, уровень проникновения на рынок и сроки выхода аппарата на рынок. Эти слабые места необходимо учесть в последующих частях данного раздела работы, а именно – в SWOT-анализе.

### 8.1.3 SWOT-анализ разработки

В рамках данного подраздела был произведён анализ сильных и слабых сторон разработки, рассмотрены возможности и угрозы, которые могут возникнуть в перспективе, а также даны советы на основе их корреляции. Вся информация и необходимые рекомендации систематизированы в таблицу 8 [47], представленную ниже.

Таблица 8 – Матрица SWOT[47]

	<p><b>Сильные стороны:</b>  С1. Простота конструкции проектируемого реактора.  С2. Значительная часть деталей стандартна, что позволяет легче ремонтировать аппарат.  С3. Заявленная энергоэффективность разработки.  С4. Экологичность разработки.  С5. Продуктом является как сам реактор, так и программа для его расчёта.</p>	<p><b>Слабые стороны:</b>  Сл1. Отсутствие обширного опыта проектирования у основной команды разработчиков.  Сл2. Однозадачность аппарата.  Сл3. Отсутствие макетов реактора.  Сл4. Большая длительность научно-технической разработки.  Сл5. Отсутствие базы для быстрой организации производства.</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1. Возникновение дополнительного спроса на производимый аппаратом продукт (смола).  В2. Координация деятельности ТПУ с компаниями, являющимися ведущими в химической отрасли.  В3. Близость одной из химических компаний к месту разработки реактора (Томскнефтехим).  В4. Привлечение специалистов из сторонних организаций для координации разработки и сотрудничества.  В5. Возможность субсидирования исследований со стороны</p>	<p><b>Сильные стороны и возможности:</b>  1. Повышение спроса на проектируемые по данной работе реакторы вследствие повышения спроса на смолу.  2. Возможность контакта с химическими компаниями-партнёрами ТПУ в целях организации производства оборудования.  3. Привлечение дополнительных специалистов в целях дальнейшего повышения энергоэффективности и экологичности разработки.  4. Развитие автоматизированного проектирования реакторов на базе более совершенных по сравнению с MathCAD программ.  5. Дальнейшее развитие цели</p>	<p><b>Слабые стороны и возможности:</b>  1. Возможность привлечения сторонних специалистов для компенсации недостатков изначальной команды разработчиков.  2. Возможность проектирования аппаратов для других продуктов по имеющимся программам.  3. Возможность создания макета и проведения его испытаний через финансирование как ТПУ, так и сторонними организациями.  4. Ускорение разработки и проектирования аппарата через сотрудничество с химическими компаниями.  5. Внедрение аппарата в производство на базе одного из предприятий-партнёров.</p>





Продолжение таблицы 9

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Выбор направления исследований	3	Проведение патентных исследований	Инженер
	4	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер
	5	Выбор и анализ технологической схемы	Руководитель, инженер
	6	Календарное планирование работ по теме	Инженер
Проведение исследования	7	Проведение технологических расчётов	Инженер
	8	Проведение конструктивно-механических расчётов	Инженер
	9	Осуществление теоретического анализа в области экологии	Инженер
	10	Оценка экономической значимости проекта	Инженер

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА.061526.001 ПЗ



отлагательств, или болезнь руководителя, составление технического задания может занять 4 человеко-дня. Исходя из предложенной в [47] формулы, осуществляем расчёт ожидаемой трудоёмкости для первого этапа работы:

$$t_{\text{ож.1}} = \frac{3 \cdot t_{\text{min.1}} + 2 \cdot t_{\text{max.1}}}{5} = 2.8 \text{ чел-дн (8.2)}$$

где  $t_{\text{ож.1}}$  – ожидаемая трудоёмкость 1 работы;  $t_{\text{min.1}}$  – минимальная трудоёмкость 1 работы, чел-дн;  $t_{\text{max.1}}$  – максимальная трудоёмкость 1 работы, чел-дн [47].

Поскольку руководитель выполняет данную работу один, в соответствии с формулой из пособия [47] продолжительность работы составит:

$$T_{\text{р.1}} = \frac{t_{\text{ож.1}}}{\text{Ч}_1} = 2.8 \text{ (8.3)}$$

где  $T_{\text{р.1}}$  – продолжительность 1 работы, раб.дн.;  $\text{Ч}_1$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел [47].

Подобные рассуждения и расчёты осуществляются для всех подпунктов основных этапов научно-исследовательской работы.

### 8.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

В рамках данного подпункта осуществлено построение диаграммы Ганта и проведены необходимые расчёты для её построения.

При построении графика необходимо перевести рабочие дни в календарные, для чего используется следующая формула:

$$T_{\text{к.і}} = T_{\text{р.і}} \cdot k_{\text{кал}} \text{ (8.4)}$$

где  $T_{\text{к.і}}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;  $k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности [47].

Данный коэффициент рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}} \text{ (8.5)}$$

где  $T_{\text{кал}}$  – число календарных дней в году;  $T_{\text{вых}}$  – число выходных дней в году;  $T_{\text{пр}}$  – число праздничных дней в году [47].

В 2017 году, для которого производится расчёт, число календарных дней составило 365, праздничных – 14, выходных – 104. Таким образом, по формуле (8.5):

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{(365 - 104 - 14)} = 1.48$$

										Лист
										138
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>					

Примем коэффициент календарности равным 1,5. Все рассчитанные значения заносятся в таблицу 10 [47].

Таблица 10 – Временные показатели проведения научного исследования [47]

Номер работы	Трудоёмкость работ			Число исполнителей	Длительность работ в рабочих днях	Длительность работ в календарных днях
	$t_{\min}$ , чел-дн	$t_{\max}$ , чел-дн	$t_{\text{ож}}$ , чел-дн			
1	2	4	2,8	1	3	4
2	5	8	6,2	1	6	9
3	4	5	4,4	1	4	7
4	1	2	1,4	2	1	1
5	1	2	1,4	2	1	1
6	2	4	2,8	1	3	4
7	5	12	7,8	1	8	12
8	16	28	20,8	1	21	31
9	3	10	5,8	1	6	9
10	3	10	5,8	1	6	9
11	1	2	1,4	2	1	1
12	8	10	8,8	1	9	13
13	8	10	8,8	1	9	13
14	1	1	1	1	1	1

Общая длительность работ в рабочих днях составила 79 дней, в календарных – 115.

Диаграмма Ганта для научно-исследовательской работы в целях проектирования химического реактора для производства карбамидоформальдегидной смолы представлена на рисунке 28.



где  $Q$  – стоимость электроэнергии, руб;  $N$ –мощность, потребляемая компьютером во время работы, кВт;  $t$ –время работы компьютера, ч;  $P$ –тариф на электроэнергию в данном субъекте РФ, руб за кВт\*ч.

Ввиду большого количества различных моделей персональных компьютеров и приближенности расчётов примем мощность, потребляемую устройством во время работы равной 220 Вт. Для простоты расчёта примем, что компьютер находится в работе в течение всех рабочих дней, то есть 79 дней. Тариф на электроэнергию примем равным 5 рублей 80 копеек за 1 кВт\*ч. Таким образом:

$$Q = \frac{220}{1000} \cdot (79 \cdot 24) \cdot 5.8 = 2419.3 \text{ руб}$$

где  $Q$  – стоимость электроэнергии, потреблённой за год одним компьютером.

Полученное значение умножим на два, поскольку на персональных компьютерах будет работать как инженер, так и научный руководитель. Таким образом, получим, что расходы на электроэнергию составят 4838 рублей 59 копеек.

### 8.3.2 Основная заработная плата исполнителей темы

В исполнении проекта, описываемого в данной бакалаврской работе, задействованы два работника: руководитель и инженер. Пример расчёта основной заработной платы дадим на примере руководителя, результаты расчёта для инженера будут занесены в сводную таблицу.

По рекомендации консультанта по разделу работы «Финансовый менеджмент» месячный должностной оклад работника рассчитывается по формуле:

$$Z_M = Z_{OK} \cdot k_p \quad (8.7)$$

где  $Z_M$  – месячный должностной оклад работника, руб;  $Z_{OK}$  – оклад работника, руб;  $k_p$  – районный коэффициент, равный для Томска 1,3.

Поскольку научным руководителем является доцент, его оклад составляет 33664 рубля. Таким образом:

$$Z_M = 33664 \cdot 1.3 = 43763.2 \text{ руб}$$

Для расчёта среднедневной заработной платы используется формула из [47]:

$$Z_{дн} = \frac{Z_M \cdot M}{F_D} \quad (8.8)$$

									Лист
									141
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

где  $Z_{д}$  – среднедневная заработная плата, руб;  $M$  – количество месяцев работы без отпусков в течение года;  $F_{д}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

Расчёт действительного годового фонда рабочего времени сводится в таблицу 11.

Таблица 11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:	52	104
• выходные дни;		
• праздничные дни.	14	14
Потери рабочего времени:	48	24
• отпуск;		
• невыход по болезни.	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	223

Количество месяцев работы без отпуска для руководителя-доцента, работающего по шестидневной рабочей неделе с отпуском в 48 рабочих дней, составит 10,4 месяца. Таким образом, по формуле (8.8):

$$Z_{дн} = \frac{43763.2 \cdot 10.4}{251} = 1813.3 \text{ руб}$$

Основная заработная плата рассчитывается по формуле [47]:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p \quad (8.9)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата, руб;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемая научно-техническим работником, раб. дн.

Продолжительность работ для научного руководителя принимаем в соответствии с данными таблицы 10 равной 6 рабочим дням. Таким образом:

$$Z_{осн} = 1813.3 \cdot 6 = 10879.8 \text{ руб}$$

Как и было сказано выше, результаты расчёта основной заработной платы инженера сведены в таблицу 12.

Таблица 12 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	Должность	З <sub>ок</sub> , руб	к <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , руб	З <sub>дн</sub> , руб	Т <sub>р</sub> , руб	З <sub>осн</sub> , руб
Руководитель	Доцент	33664	1,3	43763,2	1813,30	6	10879,8
Инженер	Инженер	9489	1,3	12335,7	619,55	76	47085,86

### 8.3.3 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

В соответствии с пособием [47] дополнительная заработная плата исполнителей темы равна:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} \quad (8.10)$$

где  $З_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата исполнителей темы, руб;  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы, на стадии проектирования принимаемый равным от 0,12 до 0,15.

Примем  $k_{\text{доп}}$  равным 0,12. Таким образом, для руководителя:

$$З_{\text{доп}} = 0,12 \cdot 10879,8 = 1305,58 \text{ руб}$$

Для инженера:

$$З_{\text{доп}} = 0,12 \cdot 47085,86 = 5650,3 \text{ руб}$$

### 8.3.4 Отчисления во внебюджетные фонды

В соответствии с пособием [47] сумма отчислений во внебюджетные фонды определяется по формуле:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (8.11)$$

где  $З_{\text{внеб}}$  – сумма отчислений во внебюджетные фонды, руб;  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (принимается равным 27,1% по рекомендации из [47]).

Также по рекомендации пособия [47] расчёт отчислений во внебюджетные фонды оформлен в виде таблицы 13.

Таблица 13 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата
Руководитель	10879,8	1305,58
Инженер	47085,86	5650,30
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,271	
<b>Итого</b>	<b>3302,23</b>	<b>14291,50</b>

### 8.3.5 Накладные расходы и формирование бюджета

В соответствии с пособием [47] накладные расходы рассчитываются по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = \Sigma \text{ст} \cdot k_{\text{нр}} \quad (8.12)$$

где  $Z_{\text{накл}}$  – сумма накладных расходов, руб;  $\Sigma \text{ст}$  – сумма статей бюджета с первой по четвертую, руб;  $k_{\text{нр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы (принимаемый равным 16% по рекомендации [47]).

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект приведено в таблице 14.

Таблица 14 – Расчёт бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма		Примечание
	Руководитель	Инженер	
1. Материальные затраты НТИ	2419,3	2419,3	Пункт 2.4.1
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	10879,88	47085,86	Пункт 2.4.2
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	1305,58	5650,3	Пункт 2.4.3
4. Отчисления во внебюджетные фонды	3302,24	14291,50	Пункт 2.4.4

Продолжение таблицы 14

Наименование статьи	Сумма		Примечание
	Руководитель	Инженер	
5. Накладные расходы	2865,12	11111,51	16% от суммы статей с 1 по 4
6. Бюджет затрат на НТИ	101330,59		Сумма статей с 1 по 5

### 8.4 Оценка научно-технического эффекта разработки

Для проведения данной оценки необходимо рассчитать коэффициент научно-технического эффекта по следующей формуле:

$$H = \sum_{i=1}^4 (k_i \cdot n_i) \quad (8.13)$$

где H – показатель научно-технического эффекта;  $k_i$  – весовой коэффициент i-го признака;  $n_i$  – оценка i-го признака в баллах.

Признаки научно-технического эффекта разработки систематизируются в соответствующую таблицу 15, в которой также проставляются баллы по каждому признаку.

Таблица 15 – Оценка научно-технического эффекта разработки

Признак НТУ	Весовой коэфф.	Балл	Характеристика разработки	Выбранный балл
Уровень новизны	0.6	от 8 до 10 от 5 до 7 от 2 до 4 0	Принципиально новая <b>Новая</b> Относительно новая Не обладает новизной	5
Теоретический уровень результатов	0.4	10 8 6 2 0.5	Установление закона Глубокая разработка проблемы <b>Разработка способа (программы, устройства)</b> Элементарный анализ Изложение опыта	6
Возможность реализации	0.2	Время реализации		10
		10	<b>В течение первых лет</b>	
		4 2	От 5 до 10 лет Свыше 10 лет	



## 9 Социальная ответственность

В рамках данного раздела выпускной квалификационной работы изложены вредные и опасные факторы производства карбамидоформальдегидной смолы марки КФ-Ж на стадии поликонденсации в реакторе, оснащённом механическим перемешивающим устройством и теплообменной рубашкой, представлены пути минимизации их вредного влияния, даны рекомендации по предотвращению чрезвычайных ситуаций, а также изложены правила, регламентирующие трудовое законодательство в данной области.

### 9.1 Производственная безопасность

В рамках данного подраздела рассмотрены вредные и опасные факторы производства смолы на стадии поликонденсации. Собранные данные систематизированы в таблице 16.

Таблица 16 – Опасные и вредные производственные факторы на стадии поликонденсации карбамида с формалином

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы по [51].		Нормативные документы
	вредные	опасные	
формальдегид ПДК* – 0,5 мг/м <sup>3</sup> [52]	<b>вдыхание:</b> кашель, тошнота, затрудненное дыхание; <b>глаза:</b> покраснение, боль	чрезвычайно <b>огнеопасен;</b> <b>взрывоопасен</b> в смеси с воздухом и паром	справочник [53] стандарт [54]
метанол ПДК – 5 мг/м <sup>3</sup> [52]	<b>вдыхание:</b> кашель, головная боль, тошнота; <b>кожа:</b> сухость, покраснение; <b>глаза:</b> покраснение, боль;	сильно <b>огнеопасен;</b> <b>взрывоопасен</b> в смеси с воздухом; <b>вдыхание:</b> нарушение зрения; <b>проглатывание:</b> боль в животе, одышка, рвота, потеря сознания	справочник [53] стандарт [55]

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>							
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Социальная ответственность</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>		
<i>Студент</i>	<i>Желнорович В.А.</i>							<i>Д</i>			147	9
<i>Руковод.</i>	<i>Беляев В.М.</i>											
<i>Конс.</i>	<i>Штейнле А.В.</i>											
<i>Н. Контр.</i>												
<i>Руков. ООП</i>	<i>Краснокутская Е.А.</i>											

Продолжение таблицы 16

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы по [51].		Нормативные документы
	вредные	опасные	
карбамид ПДК – 10 мг/м <sup>3</sup> [52]	<b>вдыхание:</b> кашель, одышка, боль в горле; <b>кожа:</b> покраснение; <b>глаза:</b> покраснение;	<b>проглатывание:</b> судороги, головная боль, тошнота, рвота	справочник [53] стандарт [56]
аммиак ПДК – 20 мг/м <sup>3</sup> [52]	<b>вдыхание:</b> жжение, одышка, боли в горле; <b>кожа:</b> покраснение; <b>глаза:</b> покраснение и боль	<b>огнеопасен;</b> <b>взрывоопасен</b> в смеси с воздухом; <b>кожа:</b> ожоги, волдыри; <b>глаза:</b> сильные ожоги	справочник [53] стандарт [57]
кислота серная ПДК – 1 мг/м <sup>3</sup> [52]	<b>вдыхание:</b> жжение, одышка, боли в горле; <b>кожа:</b> покраснение, боль; <b>глаза:</b> покраснение и боль; <b>проглатывание:</b> боль в животе	некоторые реакции могут привести к <b>пожару</b> или <b>взрыву</b> ; <b>кожа:</b> волдыри, серьёзные ожоги; <b>глаза:</b> сильные ожоги; <b>проглатывание:</b> шок или коллапс	справочник [53] стандарт [58]
раствор едко-го натра 20% ПДК – 0,5 мг/м <sup>3</sup> [52]	—	<b>кожа:</b> химические ожоги; <b>глаза:</b> потеря зрения	стандарт [59]
чистка трубопроводов	воздействие <b>паров</b> вредных веществ	образование <b>взрыво- и пожароопасных</b> смесей	справочник [53] стандарт [60]
работы на трубопроводах пара	—	возможно получение <b>термических ожогов</b>	стандарт [61]
работа с электрооборудованием	—	возможно <b>поражение электрическим током</b>	стандарт [62]
обслуживание оборудования с вращающимися механизмами	неблагоприятное воздействие <b>шума и вибраций</b>	возможно получение <b>механических травм</b> ; травмы, связанные с воздействием <b>шума и вибраций</b>	стандарты [63–64]
производственный микроклимат	<b>неблагоприятные условия</b>	—	норма [65]
производственное освещение	<b>нерационально спроектированное освещение</b>	—	норма [66]

\* – значения ПДК даны для нормы в воздухе рабочей зоны.

По данным таблицы 16 и нормативным документам [52, 54–66] составлены следующие рекомендации по вредным и опасным производственным факторам:

- **поражение органов дыхания.** Источником являются пары различных вредных веществ. Природа фактора химическая. Допустимые нормы приведены в таблице 16 в соответствии со стандартом [52]. Для защиты органов дыхания рекомендуется применять противогаз марки БКФ, респираторы «Лепесток», самоспасатели ПДУ-3. При работе внутри аппаратов применяются шланговые противогазы ПШ-1, ПШ-2.

- **поражение кожи.** Источником являются пары различных вредных веществ, вредные вещества в жидком состоянии, горячий пар. Природа фактора химическая и физическая. Для защиты кожных покровов рекомендуется использовать соответствующую спецодежду, производить работы только в резиновых перчатках, при необходимости надевать прорезиненные фартуки.

- **поражение глаз.** Источником являются пары различных вредных веществ и вредные вещества в жидком состоянии. Природа фактора химическая. Защита глаз производится в сочетании с защитой органов дыхания либо при помощи специальных защитных масок.

- **поражение желудочно-кишечного тракта.** Источником являются пары различных вредных веществ и вредные вещества в жидком состоянии. Природа фактора химическая. Для защиты от проглатывания вредных и опасных веществ строго запрещается употреблять еду, напитки, а также курить во время работы.

- **пожаро- и взрывоопасность.** Источником являются пары формальдегида, метанола, аммиака в смеси с воздухом, а также некоторые реакции серной кислоты. Природа фактора физико-химическая. Предел взрываемости в объёмных процентах в воздухе: для формальдегида – от 7 до 73; для метанола – от 5,5 до 44; для аммиака – от 15 до 28; для гептана – от 1,1 до 6,7; для бутанола – от 1,4 до 11,3 [67]. Рекомендации по безопасности – не допускать в процессе работы огня, искр, курения, применять вентиляцию и защищённое от взрыва электрооборудование. В качестве средств защиты применять автоматическую систему пенного пожаротушения, пожарные гидранты, огнетушители ОПУ-5.

- **поражение электрическим током.** Источником являются неисправное электрооборудование, оборудование с нарушенной изоляцией, а также поверхности, способные аккумулировать статический электрический заряд. Природа фактора физическая, электрическая. Для обеспечения электробезопасности на производстве необходима регулярная проверка оборудования на исправность, а также создание единой системы заземления во избежание накопления статического заряда. Повышенная электробезопасность

										Лист
										149
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ					

в установках достигается применением систем защитного заземления, зануления, защитного отключения и других средств и методов защиты, в том числе знаков безопасности и предупредительных плакатов и надписей.

- **механические травмы.** Источником является оборудование с вращающимися механизмами (реактор с перемешивающим устройством). Природа фактора физическая, механическая. Для обеспечения промышленной безопасности по данному фактору необходимо производить эксплуатацию оборудования в соответствии с технологическим регламентом и правилами техники безопасности.

- **шум и вибрации.** Источником является оборудование с вращающимися механизмами (реактор с перемешивающим устройством). Природа фактора физическая, в том числе акустическая. Допустимые значения параметров шума в производственном помещении – 85 дБ [63]. Норма вибраций 95 дБ [64]. Основными мерами по снижению шума и вибрации на данном производстве являются: средства индивидуальной защита (наушники); строительно-акустические мероприятия.

- **производственный микроклимат.** Источником является различное оборудование, находящееся в помещении. Природа фактора физическая. Нормы для производственного микроклимата: температура рабочей среды от 17°С до 20°, относительная влажность от 40% до 60%, скорость воздуха не более 1 м/с [65].

- **производственное освещение.** Источником являются солнце и приборы искусственного освещения. Природа фактора физическая. Нормы естественного освещения от 280 до 330 лк [66]. При выборе и сравнении источников света друг с другом может быть выбрана галогеновая лампа (лампа накаливания с йодным цинком) со сроком службы до трех тысяч часов и спектром излучения, близком к естественному. Конструкция светильника должна надежно защищать источник света от пыли и других внешних факторов, обеспечивать электро-, пожаро- и взрывобезопасность, стабильность светотехнических характеристик в данных условиях среды, удобство монтажа и обслуживания. Поскольку в рабочей зоне могут находиться взрывопожароопасные вещества, светильник должен быть взрывобезопасного исполнения типа ВЗГ.

## 9.2 Экологическая безопасность

В соответствии с перечисленными в предыдущем разделе вредными и опасными производственными факторами, в первую очередь касающимися вредных химических веществ, применяемых при производстве карбамидоформальдегидной смолы, необходимо

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		150

дать следующие рекомендации в целях соблюдения экологической безопасности.

### 9.2.1 Защита селитебной зоны

В соответствии с постановлением [68] производство карбамидоформальдегидной смолы производством I класса опасности и предполагает создание вокруг предприятия санитарно-защитной зоны радиусом 1000 м.

### 9.2.2 Защита атмосферы

Вредными веществами, поступающими в атмосферу в процессе работы производства смолы, являются формальдегид, метанол, аммиак и карбамидная пыль. Для снижения концентрации этих веществ в выбросах воздушки аппаратов, содержащих аммиак и формальдегид, а также потоки воздуха из насосов, несущие формальдегид и метанол, должны пропускаться через абсорберы, орошаемые циркуляционной водой. Очищенный от вредных веществ азот выбрасывается в атмосферу.

Для обеспечения защиты атмосферы доля вредных веществ в промышленных выбросах, должна соответствовать значениям ПДК<sub>атм.в.</sub>, а именно: для аммиака – 0,04 мг/м<sup>3</sup>; для формальдегида – 0,01 мг/м<sup>3</sup>; для метанола – 0,5 мг/м<sup>3</sup>, для карбамидной пыли – 0,2 мг/м<sup>3</sup> [69].

### 9.2.3 Защита гидросферы

Загрязнителями гидросферы в производстве карбамидоформальдегидных смол можно считать циркуляционные воды, поступающие из абсорберов, воду от промывки оборудования. В этих водах растворены такие вредные вещества, как аммиак, метанол и формальдегид. Защита гидросферы от загрязнения должна быть обеспечена организацией цеха биохимической очистки сточных вод.

Оценка эффективности очистки сточных вод осуществляется по нормированным значениям, а именно – по ПДК для воды рыбохозяйственных водоёмов, составляющей: для аммиака – 1,5 мг/дм<sup>3</sup>; для метанола – 3 мг/дм<sup>3</sup>, для формальдегида – 0,05 мг/дм<sup>3</sup> [70].

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		151

## 9.2.4 Защита литосферы

Загрязнителями литосферы в производстве смол являются твёрдые отходы, состоящие, в основном, из заподимеризовавшейся смолы, осаждающейся на стенках реакторов, теплообменников и трубопроводов. Сборка твёрдых отходов осуществляется каждый раз при остановочном ремонте технологических ниток в процессе очистки поверхностей оборудования. Собранные твёрдые отходы вывозятся в отвал.

## 9.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной и опасной для жизни и здоровья населения чрезвычайной ситуацией в рамках предприятия по производству карбамидоформальдегидной смолы может считаться химическая авария, поскольку в результате может произойти большой разлив и выброс в атмосферу различных вредных веществ. Общие положения по обеспечению безопасности в чрезвычайных ситуациях даны в стандартах [71, 72]. Далее более детально будет рассмотрена техника безопасности при химической аварии.

Превентивными мерами против химической аварии является обеспечение постоянной и надёжной герметичности оборудования, регулярные проверки оборудования на герметичность и устранение найденных неполадок и несоответствий. Рекомендуется также регулярно проверять воздух рабочей зоны на соответствие содержания вредных веществ значениям ПДК.

При обнаружении резкого запаха химикатов, необходимо срочно принять меры по эвакуации из опасной зоны, при этом органы дыхания следует защитить влажной ватно-марлевой повязкой, если таковая отсутствует, то можно использовать пропитанные водой платки, майки, косынки и другие изделия из тканей. Поверхность тела следует защитить плотной одеждой. При наличии в ближайшем доступе средств индивидуальной защиты, следует воспользоваться ими в полной мере.

Выходить из зоны поражения необходимо в строго определенные места. Действуя по разработанному плану эвакуации, в случае возникновения чрезвычайной ситуации необходимо также руководствоваться указаниями руководства предприятия и штаба гражданской обороны.

После выхода из зараженной зоны необходимо немедленно снять одежду и произвести гигиеническую обработку поверхности тела, особенно лица, рук и других

									Лист
									152
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

незакрытых участков. При проблемах с дыханием, покраснении глаз, жжении участков кожи необходимо срочно обратиться к врачу.

При аварии в случае, если не объявлена общая эвакуация, целесообразно закрыться в помещении (офисе, подсобном помещении, квартире, доме) закрыть все окна, заткнуть все вентиляционные отверстия и щели мокрыми тряпками и дожидаться объявления отмены чрезвычайной ситуации.

Ликвидация последствий химической аварии проводится в два этапа. Работы, производимые на первом этапе:

- выполнение и оценка химической обстановки;
- первоочередные аварийные работы (включение противоаварийных систем, отключение повреждённого участка, установление контроля над аварийной установкой и т.д.);
- спасательные работы;
- оказание медицинской помощи пострадавшим;
- тушение пожаров;
- расчистка путей подхода людей и техники к местам проведения работ.

Второй этап подразумевает следующие действия:

- уточнение химической обстановки;
- основные аварийные работы (локализация и ликвидация источника химического заражения, ремонтно-восстановительные работы);
- санитарная обработка людей и обеззараживание (нейтрализация) химических заражений.

## **9.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

В рамках данного подраздела рассматриваются специальные нормы трудового законодательства для производства смолы марки КФ-Ж, а также организационные мероприятия по компоновке рабочей зоны.

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		153

## 9.4.1 Специальные нормы трудового законодательства

В соответствии с перечисленной в предыдущих подразделах информацией производство формальдегидных смол может быть классифицировано как оказывающее вредное воздействие на здоровье человека.

В соответствии с трудовым кодексом Российской Федерации [73], а именно статьями 92, 117, 147 и 222, работники, задействованные на предприятиях с вредными или опасными производственными факторами, имеют право на следующие льготы:

- сокращение продолжительности рабочего дня;
- предоставление дополнительного оплачиваемого отпуска длительностью не менее 7 календарных дней;
- повышение заработной платы на величину, составляющую не менее 4% от оклада работников, занятых на должностях с нормальными условиями труда;
- организация выдачи молока и лечебно-профилактического питания работникам, занятым на должностях с вредными условиями труда.

Также следует отметить ограничение применения труда женщин и запрет на труд лиц в возрасте до восемнадцати лет на должностях, предполагающих воздействие вредных или опасных факторов производства, в соответствии со статьями 253 и 265 ТК РФ [73].

## 9.4.2 Компоновка оборудования

При производстве карбамидоформальдегидных смол целесообразно использовать закрытый тип компоновки оборудования, размещая аппараты в цехе.

При компоновке оборудования должны быть спроектированы следующие типы помещений:

1. Производственные помещения (место расположения основного технического оборудования).
2. Прицеховые помещения (место расположения ёмкостей с сырьём или продуктом производства).
3. Слесарные мастерские (место проведения мелкого ремонта оборудования).
4. Бытовые помещения, гардеробные, помещения для сушки, для обеспыливания одежды, уборная, душевая, курилки.

В соответствии с [74] производственные здания должны быть оборудованы эвакуационными выходами, в качестве которых можно использовать устроенные для

									Лист
									154
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА.061526.001 ПЗ				

производственных целей проезды, проходы, двери и ворота. Не менее двух эвакуационных выходов должно быть предусмотрено для помещений подвальных и цокольных этажей, предназначенных для одновременного пребывания в них более 15 человек, а также помещений, предназначенных для одновременного пребывания в них более 50 человек. Расстояние по путям эвакуации от дверей наиболее удаленных помещений (кроме уборных, умывальных, курительных, душевых и других обслуживающих помещений) до выхода наружу или на лестничную клетку должно приниматься в соответствии с классом конструкторской пожароопасности здания по таблице источника [74].

					<i>ФЮРА.061526.001 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		155

## **Заключение**

В рамках данной дипломной работы был произведен технологический и конструктивно-механический расчет аппарата с перемешивающим устройством и гладкой рубашкой предназначенного для синтеза карбамидоформальдегидной смолы марки КФ-Ж методом поликонденсации. В результате произведённых расчетов были определены основные геометрические параметры аппарата, рассчитаны штуцера, фланец, опоры, подобран привод и стойка для перемешивающего устройства, а также выбрана мешалка. По результатам механических расчетов, представленных в разделе 7, можно сделать заключение, что все подобранные элементы конструкции удовлетворяют условиям прочности и устойчивости, вал перемешивающего устройства так же удовлетворяет условиям жесткости и виброустойчивости. В связи с чем, результаты данной работы могут быть применены для построения аппарата и использования его на действующих промышленных предприятиях, специализирующихся на подобной продукции. В качестве примера заинтересованного предприятия можно привести “Томскнефтехим”.

В разделе “Финансовый менеджмент” произведен SWOT-анализ и оценен научно-технический эффект и конкурентоспособность данной разработки. Была спланирована реализация проекта, результатом чего стала диаграмма Ганта, в которой отражено время, затраченное на разработку реактора с учетом консультаций научного руководителя.

Помимо вышеуказанного в работе приведён раздел “Социальная ответственность”, в котором даны рекомендации по безопасной работе персонала с данным аппаратом и рассмотрены вопросы обеспечения охраны окружающей среды.

## Список публикаций студента

№ п/п	Наименование работы, ее вид	Форма работы	Выходные данные	Объем работы, с.	Соавторы
а) научные работы					
1	Биодеструкция донных нефтешламов (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Химия и химическая технология в XXI веке : материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва, посвященной 120-летию Томского политехнического университета, 17–20 мая 2016 г., г. Томск. — Томск : Изд-во ТПУ, 2016. — [С. 482-483].	2*	М. С. Полонский, В. В. Желнорович, А. Д. Крошечкин
2	Исследование свойств и содержания ценных компонентов в золах уноса тепловых электростанций Южно-Африканской республики (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Проблемы геологии и освоения недр ; материалы XXI Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М. А. Усова, посвященному 130-летию со дня рождения М.И. Кучина, 3-7 апреля 2017 г., г. Томск. — Томск : Изд-во: ТПУ, 2017 - Т. 2 - С. 411-413	3/2	М. С. Полонский, В. В. Желнорович
3	Импортозамещающий способ производства модификаторов битума на основе атактического полипропилена (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Проблемы геологии и освоения недр ; материалы XXI Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых имени академика М. А. Усова, посвященному 130-летию со дня рождения М.И. Кучина, 3-7 апреля 2017 г., г. Томск. — Томск : Изд-во: ТПУ, 2017 - Т. 2 - С. 873-875	3/1	М. С. Полонский, В. В. Желнорович, Р. А. Котомкин

4	Экономическая и экологическая целесообразность выделения ценных компонентов из зол уноса тепловых электростанций Южно-Африканской республики (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Перспективы развития фундаментальных наук ; сборник трудов XIV Международной конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Том 2.Химия , 25-28 апреля 2017 г., г. Томск. — Томск : Изд-во – ТПУ, 2017. — [С. 123-125].	3/1	М. С. Полонский, В. В. Желнорович
5	Сравнительная оценка различных инициаторов для получения привитых сополимеров на основе атактического полипропилена (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Перспективы развития фундаментальных наук ; сборник трудов XIV Международной конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Том 2. Химия , 25-28 апреля 2017 г., г. Томск. — Томск : Изд-во – ТПУ, 2017. — [С. 259-261].	3/2	М. С. Полонский, В. В. Желнорович, Р. А. Котомкин
6	Исследование свойств и содержания ценных компонентов в золах уноса тепловых электростанций Южно-Африканской Республики (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Химия и химическая технология в XXI веке ; материалы XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва , 29 мая – 01 июня 2017 г., г. Томск — Томск : Изд-во – ТПУ, 2017. — [С. 406-407].	2/1	М. С. Полонский, В. В. Желнорович
7	Comparative evaluation of different radical initiators, used for production of graft copolymers, based on atactic polypropylene (Сравнительная оценка различных радикальных инициаторов, используемых для получения привитых сополимеров на основе атактического полипропилена) (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Химия и химическая технология в XXI веке ; материалы XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва , 29 мая – 01 июня 2017 г., г. Томск — Томск : Изд-во – ТПУ, 2017. — [С. 443-444].	2*	М. С. Полонский, В. В. Желнорович, Р. А. Котомкин

8	Исследование свойств и содержания ценных компонентов в золах уноса тепловых электростанций Южно-Африканской Республики (тезисы доклада)	Электронный ресурс	Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017 : материалы международной научно-практической конференции, Севастополь, 11–15 сентября 2017 г. – Севастополь: Изд-во СевГУ 2017 — [с. 1066-1068]	3/2	Полонский М.С., Желнорович В.А.
б) авторские свидетельства, дипломы, патенты и др.					
9	Диплом 3-ей степени за доклад “Comparative evaluation of different radical initiators, used for production of graft copolymers, based on atactic polypropylene (Сравнительная оценка различных радикальных инициаторов, используемых для получения привитых сополимеров на основе атактического полипропилена)”	Печ.	XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» имени профессора Л.П. Кулёва, 29 мая – 01 июня 2017 г.	2*	М. С. Полонский, В. В. Желнорович, Р. А. Котомкин

Примечание: \* – работа с неразделенным авторством

## Список использованных источников

1. Технология пластических масс: учебник / В. В. Коршак, Д. Ф. Кутепов, Г. М. Цейтлин и др.; Под ред. В. В. Коршака. — издание 2-е, перераб. и доп.. — Москва: Химия, 1976. — 607 с.: ил.
2. ГОСТ 14231-88 Смолы карбамидоформальдегидные. Технические условия (с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2003. — 36 с. — Государственные стандарты.
3. Перри, Джон Г.. Справочник инженера-химика : пер. с англ. : в 2 т. / Д. Г. Перри; под ред. Н. М. Жаворонкова. — Ленинград: Химия, 1969.
4. Пособие по химии для поступающих в Сибирский государственный медицинский университет и другие высшие медицинские учебные заведения. Ч. 3–4: учебное пособие / И. Л. Филимонова, А. С. Галактионова, О. Ф. Прищепова, О. А. Ерофеева, М. С. Юсубов. — Томск: Изд-во Оптимум, 2013. — 204 с.
5. Горловский, Давид Михайлович. Технология карбамида / Д. М. Горловский, Л. Н. Альтшулер, В. И. Кучерявый. — Ленинград: Химия, 1981. — 320 с.: ил.. — Библиография в конце глав. — Предметный указатель: с. 313-316..
6. Производство метанола и формалина / сост. Ю. В. Лендер; М. И. Ведерников; И. В. Рудой; В. П. Сухин. — Киев: Техніка, 1972. — 172 с.: ил.
7. Справочник нефтехимика. Т.2 / под ред. С. К. Огородникова . — Ленинград : Химия , 1978. — 591 с.: ил.
8. Огородников, Сергей Кириллович. Формальдегид / С. К. Огородников. — Ленинград: Химия, 1984. — 280 с.: ил..
9. Патентный поиск, поиск патентов на изобретения [Электронный ресурс]: офиц. сайт. Москва, 2018. URL: <http://www.findpatent.ru> (дата обращения: 17.03.2018).
10. Фромберг, А. Э. Экономическая и социальная география: пособие для школьников и абитуриентов / А. Э. Фромберг. — М.: Издательство «Экзамен», 2011. — 413 с.
11. ТОП-12 химических компаний Европы [Электронный ресурс] : Инжиниринговый химико-технологический центр. Томск, 2016. Схема доступа: <http://ect-center.com/blog/top-12> (дата обращения: 18.03.2018).
12. Лесная индустрия : электрон. журн. 2006. N 5 (13). Схема доступа: <https://www.lesindustry.ru/smart/bGlfbjEz> (дата обращения: 18.03.2018).
13. Формальдегид, смола, фанера // The Chemical Journal: экономическое издание для руководителей химических предприятий. — 2016. — №6. — с. 24–30.

14. Вирпша, Зигмунд. Аминопласты: пер. с польск. / З. Вирпша, Я. Бжезиньский. — Москва: Химия, 1973. — 343 с.: ил.
15. Голубятников, Владимир Алексеевич. Автоматизация производственных процессов и АСУП в химической промышленности: учебник / В. А. Голубятников, В. В. Шувалов. — Москва: Химия, 1978. — 375 с.: ил.
16. Фёдоров, Анатолий Фёдорович. Системы управления химико-технологическими процессами: учебное пособие для вузов / А. Ф. Фёдоров, Е. А. Кузьменко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2011. — 224 с.: ил.
17. Беляев В. М., Расчёт и конструирование основного оборудования отрасли. Часть I. Аппараты с механическими перемешивающими устройствами: учебное пособие / В. М. Беляев, В. М. Миронов, В. В. Тихонов. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 92 с.
18. ГОСТ 20680-2002 Аппараты с механическими перемешивающими устройствами. Общие технические условия. — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 49 с. — Государственные стандарты.
19. АТК 24.201.17-90 Мешалки. Типы, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования. — Изд. офиц. М.: Министерство тяжёлого машиностроения СССР, 1991 год. — 49 с. — Альбомы типовых конструкций.
20. РД 26-01-90-85 Механические перемешивающие устройства. Метод расчета. — Изд. офиц. Л.: РТП ЛенНИИхиммаша, 1987 год. — 58 с. — Руководящие документы.
21. Лашинский, А. А.. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: справочник / А. А. Лашинский, А. Р. Толчинский. — Москва; Ленинград: Машгиз, 1963. — 464 с.: ил.. — Библиогр.: с. 465-468.
22. Павлов, Константин Феофанович. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. — 14-е изд., стер.. — Москва: Альянс, 2007. — 576 с.: ил.. — Библиогр.: с. 502-509.
23. Пахомов, Владимир Сергеевич. Коррозия металлов и сплавов : справочник : в 2 кн. / В. С. Пахомов. — Москва: Наука и технологии, 2013.
24. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию : учебное пособие / под ред. Ю. И. Дытнерского. — Изд. стер.. — Москва: Альянс, 2015. — 493 с.: ил., черт.
25. АТК 24.218.06-90 Штуцера для сосудов и аппаратов стальных сварных. Типы, основные параметры, размеры и общие технические требования. — Акционерное общество

«Центральное конструкторское бюро нефтеаппаратуры» (АО ЦКБН), 1995. — 46 с. — Альбомы типовых конструкций.

26. Беляев, Василий Михайлович. Конструирование и расчет элементов оборудования отрасли учебное пособие: Ч. 1: Тонкостенные сосуды и аппараты химических производств / В. М. Беляев, В. М. Миронов; Томский политехнический университет (ТПУ), Институт дистанционного образования (ИДО). — Томск : Изд-во ТПУ , 2003. — 168 с.: ил. — Библиогр.: с. 165.

27. ГОСТ 5632-2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 65 с. — Государственные стандарты.

28. ГОСТ Р 52857.1-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 43 с. — Государственные стандарты.

29. ГОСТ 10007-80 Фторопласт-4. Технические условия (с Изменениями N 1, 2). — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 38 с. — Государственные стандарты.

30. Семакина, О. К. Монтаж, эксплуатация и ремонт оборудования отрасли: учебное пособие / О. К. Семакина; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. — 177 с.

31. ГОСТ Р 52857.2-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 36 с. — Государственные стандарты.

32. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи : учебное пособие для вузов / М. Ф. Михалев [и др.]; под ред. М. Ф. Михалева. — 2-е изд., испр. и доп.. — Москва: АРИС, 2010. — 310 с.: ил.

33. ГОСТ 6533-78 Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов. Основные размеры (с Изменениями N 1, 2). — Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1985. — 115 с. — Государственные стандарты.

34. ГОСТ Р 52857.8-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Сосуды и аппараты с рубашками. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 134 с. — Государственные стандарты.

35. ГОСТ 28759.2-90 Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные. Конструкция и размеры. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2005. — 49 с. — Государственные стандарты.

36. ГОСТ Р 52857.4-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 121 с. — Государственные стандарты.

37. Краткий справочник по машиностроительным материалам / под ред. В. М. Раскатова. — Москва: Машгиз, 1963. — 440 с.: ил.

38. ГОСТ Р 52857.5-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 89 с. — Государственные стандарты.

39. ГОСТ 26296-84 (СТ СЭВ 4349-83) Лапы опорные подвесных вертикальных сосудов и аппаратов. Основные размеры (с Поправкой, с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1984. — 44 с. — Государственные стандарты.

40. Расчёт химического аппарата с механическим перемешивающим устройством: Методические указания / Сост: Л. Н. Аксенов, Н. Н. Лясникова, С. А. Кунавин, Е. С. Соколов-Бородкин, В. Ф. Хвостов, В. Н. Чечко. — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. — 88 с.

41. Конструирование и расчёт элементов оборудования отрасли. Ч. II. Толстостенные сосуды и вращающиеся детали / сост. В.М. Беляев; Томский политехнический университет. — 2-е изд., испр. и доп. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. — 196 с.

42. Алгоритм расчета на виброустойчивость валов механических перемешивающих устройств: Методические указания к применению вычислительной техники в курсе "Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств" для студентов специальностей 0516, 0558 всех форм обучения / Сост.: В.Г. Доброногов, О.Г. Зубрий, Л.Г. Воронин. — К.: КПИ, 1988. — 52 с.

43. Сопромат Гуру. Расчёт балки онлайн. Построение эпюр [Электронный ресурс]: офиц. сайт. — Москва, 2002. — Схема доступа: <https://sopromatguru.ru/> (дата обращения: 19.04.2018).

44. ГОСТ Р 52857.3-2007 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 48 с. — Государственные стандарты.

45. ГОСТ 23360-78 Основные нормы взаимозаменяемости. Соединения шпоночные с призматическими шпонками. Размеры шпонок и сечений пазов. Допуски и посадки (с

Изменениями N 1, 2). — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2005. — 21 с. — Государственные стандарты.

46. Куклин, Николай Григорьевич. Детали машин: учебник для техникумов / Н. Г. Куклин, Г. С. Куклина. — Москва: Высшая школа, 1973. — 382 с.: ил.

47. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Креницына; Томский политехнический университет. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. — 36 с.

48. ООО Экотех-НН Химпром [Электронный ресурс] : офиц. сайт. Дзержинск, 2009. URL: <http://htpnn.ru> (дата обращения: 17.03.2018).

49. ОАО НИИПТхиммаш [Электронный ресурс] : офиц. сайт. Пенза, 2005. URL: <http://niihim.ru> (дата обращения: 17.03.2018).

50. Завод металлоконструкций и промышленного оборудования «ЮВС» [Электронный ресурс] : офиц. сайт. Боровск, 2006. URL: <http://www.uvsprom.ru> (дата обращения: 17.03.2018).

51. ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2016. — 22 с. — Государственные стандарты.

52. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2008. — 123 с. — Государственные стандарты.

53. Корольченко, А. Я.. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник / А. Я. Корольченко, Д. А. Корольченко. — 2-е изд., перераб. и доп.. — Москва: Пожнаука, 2004. — 739 с.

54. ГОСТ 1625-2016 Формалин технический. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2017. — 48 с. — Государственные стандарты.

55. ГОСТ 2222-95 Метанол технический. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2000. — 46 с. — Государственные стандарты.

56. ГОСТ 2081-2010 Карбамид. Технические условия (с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2010. — 38 с. — Государственные стандарты.

57. ГОСТ 9-92 Аммиак водный технический. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 43 с. — Государственные стандарты.

58. ГОСТ 2184-2013 Кислота серная техническая. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2014. — 51 с. — Государственные стандарты.

59. ГОСТ Р 55064-2012 Натр едкий технический. Технические условия. — Изд. офиц. Москва: Стандартиформ, 2013. — 74 с. — Государственные стандарты.

60. ГОСТ 12.1.010-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Взрывобезопасность. Общие требования (с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 12 с. — Государственные стандарты.

61. Технический регламент Таможенного союза "О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением" (ТР ТС 032/2013) [Электронный ресурс] / Официальный сайт Евразийской экономической комиссии, 2013. URL: [https://docs.eaeunion.org/docs/ru-ru/0123437/cncd\\_03072013\\_41](https://docs.eaeunion.org/docs/ru-ru/0123437/cncd_03072013_41) (дата обращения 25.03.2018).

62. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. — Изд. офиц. Москва: Стандартиформ, 2010. — 53 с. — Государственные стандарты.

63. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. — Изд. офиц. Москва: Стандартиформ, 2015. — 51 с. — Государственные стандарты.

64. ГОСТ 12.1.012-2004 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вибрационная безопасность. Общие требования. — Изд. офиц. Москва: Стандартиформ, 2010. — 56 с. — Государственные стандарты.

65. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. — Изд. офиц. Москва: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. — 48 с. — Санитарные правила и нормы.

66. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. — Изд. офиц. Москва: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. — 52 с. — Санитарные правила и нормы.

67. Институт промышленной безопасности, охраны труда и социального партнёрства [Электронный ресурс]: офиц. сайт. Санкт-Петербург, 2004. Схема доступа: <https://www.safework.ru> (дата обращения: 04.05.2018).

68. О введении в действие новой редакции санитарно-эпидемиологических правил и нормативов СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов" (с изменениями на 25 апреля 2014 года). — Москва: федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. — 69 с. — Постановления.

69. Об утверждении гигиенических нормативов ГН 2.1.6.3492-17 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских

и сельских поселений". — Москва: федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2017. — 45 с. — Постановления.

70. ГН 2.1.5.1315-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования / Российская Федерация, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор). — Изд. офиц., Москва: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008. — 11 с.

71. ГОСТ Р 22.0.02-2016 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Термины и определения. — Изд. офиц. Москва: Стандартинформ, 2016. — 44 с. — Государственные стандарты.

72. ГОСТ Р 22.3.03-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита населения. Основные положения. — Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1995. — 23 с. — Государственные стандарты.

73. Трудовой кодекс Российской Федерации. — Москва: ВИТРЭМ, 2002. — 192 с.

74. СП 1.13130.2009 Системы противопожарной защиты. Эвакуационные пути и выходы (с Изменением N 1). — Изд. офиц. Москва: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009. — 48 с. — Своды правил.

**Приложение А Расчётная модель реактора для синтеза  
карбамидоформальдегидной смолы для осуществления механического  
расчёта аппарата  
(справочное)**

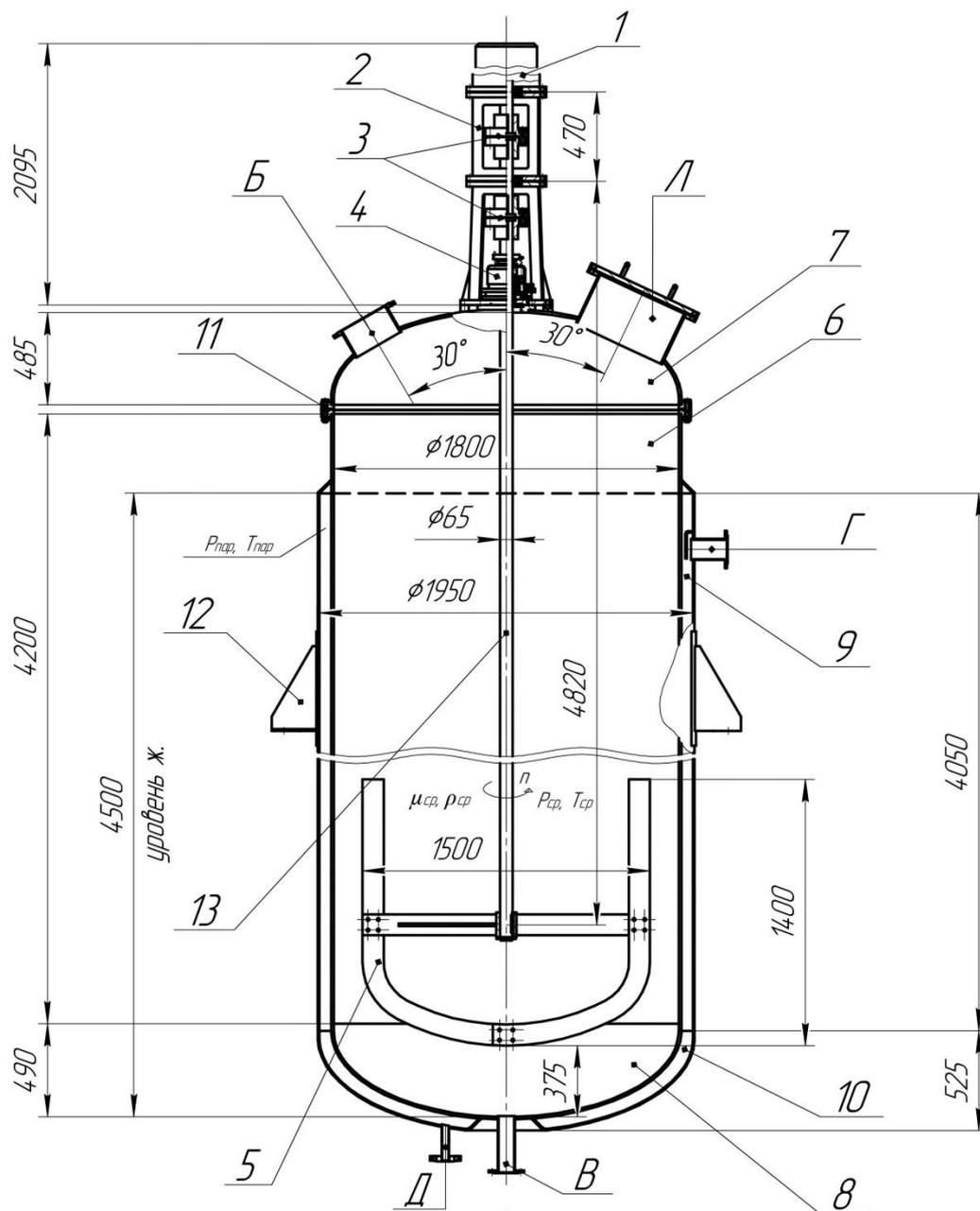


Рисунок А.1 – Расчётная модель реактора для синтеза карбамидоформальдегидной смолы, главный вид

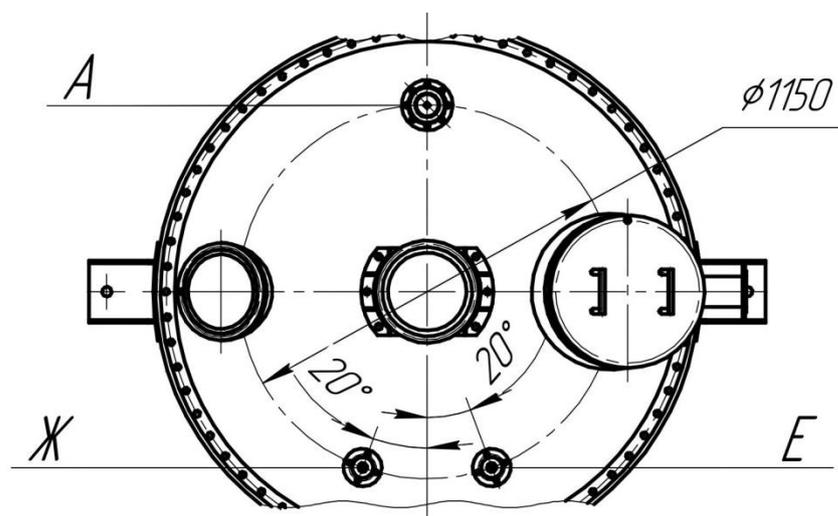


Рисунок А.2 – Расчётная модель реактора для синтеза карбамидоформальдегидной смолы, вид сверху

где 1 – мотор редуктор типа ВО; 2 – стойка привода типа II с одной промежуточной опорой; 3 – муфта втулочно-пальцевая; 4 – уплотнение торцевое; 5 – мешалка рамная; 6 – цилиндрическая обечайка корпуса, 7 – эллиптическая крышка корпуса, 8 – эллиптическое днище корпуса, 9 – цилиндрическая обечайка рубашки, 10 – эллиптическое днище рубашки, 11 – фланец типа шип-паз, 12 – опорная лапа; 13 – вал консольный; А – штуцер для ввода конденсационного раствора, Б – штуцер для отвода паров воды, В – штуцер для отвода продуктов поликонденсации, Г – штуцер для ввода пара в рубашку аппарата, Д –штуцер для отвода конденсата из рубашки аппарата, Е – штуцер для установки датчика давления, Ж – штуцер для установки датчика температуры, Л – люк-лаз.

Параметры среды в аппарате:

- динамическая вязкость, Па\*с,  $\mu_{\text{ср}} = 0,03$ ;
- плотность, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{ср}} = 1153$ ;
- остаточное давление, МПа,  $p_{\text{ср}} = 0,06$ ;
- температура, °С,  $T_{\text{ср}} = 95$ .

Параметры теплоносителя в рубашке:

- избыточное давление, МПа,  $p_{\text{пар}} = 0,2$ ;
- температура, °С,  $T_{\text{пар}} = 130$ .

Частота вращения мешалки, об/мин,  $n = 31,5$ .

## Приложение Б График выполнения ВКР

(обязательное)

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерная школа новых производственных технологий

Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера

Направление подготовки 18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

Профиль Машины и аппараты химических производств

Уровень образования Бакалавриат

Период выполнения весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы: 05.06.2018

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.02.2018	Обзор литературы	5
11.03.2018	Технологическая схема установки синтеза смолы	5
23.03.2018	Технологические расчеты реактора синтеза смолы	5
01.04.2018	Выбор конструкционных материалов	3
18.04.2018	Механический расчет реактора синтеза смолы	12
25.04.2018	Поверочный расчет реактора синтеза смолы	5
12.05.2018	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	5
18.05.2018	Социальная ответственность	5
20.05.2018	Результаты расчётов реактора синтеза карбамидоформальдегидной смолы	3
25.05.2018	Чертежи и демонстрационные плакаты	32
27.05.2018	Оформление пояснительной записки*	20
	Всего	100

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Краснокутская Е.А.	д.х.н.		