

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

Школа **Инженерная школа новых производственных технологий**
Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**
Направление подготовки (специальность) **18.03.01 Химическая технология**
Профиль **Машины и аппараты химических производств**

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Проектирование реактора окисления метанола в формальдегид

УДК 661.721.422.021.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Г6Б	Хайров Марк Альбертович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук И.В.	к.т.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина М.С.	-		

По разделу «Механический расчёт оборудования»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	к.т.н, доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Беляев В.М.	к.т.н, доцент		

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
Р1	Применять базовые математические и специальные, математические, естественнонаучные, социально-экономические и специальные знания в профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОПК-1,2,3; ПК-8,10,11,12; ОК-1,2,3,4), Критерий 5 АИОР (п.1.1)
Р2	Применять знания в области современных химических технологий для решения производственных задач	Требования ФГОС (ОПК-1,2; ПК-1,3,,9; ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.1.1,1.2)
Р3	Ставить и решать задачи производственного анализа, связанные с созданием и переработкой материалов с использованием моделирования объектов и процессов химической технологии	Требования ФГОС (ОПК-2; ПК-2,4,5,16; ОК-5,7), Критерий 5 АИОР (пп.1.2)
Р4	Разрабатывать новые технологические процессы, проектировать и использовать новое оборудование химической технологии, проектировать объекты химической технологии в контексте предприятия, общества и окружающей среды	Требования ФГОС (ОПК – 1; ПК-2,4,5,8,17,18; ОК-3,4), Критерий 5 АИОР (п.1.3)
Р5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования в области современных химических технологий	Требования ФГОС (ОПК -2,3; ПК-13,14,15; ОК-7), Критерий 5 АИОР (п.1.4)
Р6	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современное высокотехнологичное оборудование, обеспечивать его высокую эффективность, выводить на рынок новые материалы, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на химико-технологическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС (ОПК – 3; ПК-1,4,6,7,9,10,11; ОК-9), Критерий 5 АИОР (п.1.5)
Р7	Демонстрировать знания социальных, этических и культурных аспектов профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1,6), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5)
Р8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (2.6)
Р9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-5), Критерий 5 АИОР (п.2.2)
Р10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать лидерство в инженерной деятельности и инженерном предпринимательстве, ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации	Требования ФГОС (ОК-4,6,8) , Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3)

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

Школа **Инженерная школа новых производственных технологий**
Отделение школы (НОЦ) **Научно-образовательный центр Н.М.Кижнера**
Направление подготовки (специальность) **18.03.01 Химическая технология**
Профиль **Машины и аппараты химических производств**

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ Беляев В.М.
(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
4Г6Б	Хайрову Марку Альбертовичу

Тема работы:

Проектирование реактора окисления метанола в формальдегид	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	27.02.2020, № 58-47/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	03.06.2020
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	
<i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материализделия; 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>	Разработка кожухотрубчатого реактора окисления метанола непрерывного действия производства формалина производительностью 40 тыс. тонн в год по 37% мас. формалину; в качестве теплоносителя в межтрубном пространстве используется Therminol VP-1, в трубки загружена смесь катализатора с инертным материалом; общая конверсия метанола – 99%; селективность по формальдегиду – 86,7 %

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><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>	<p><i>Реферат; Введение; 1 Литературный обзор; 2 Технологический расчёт; 3 Механический расчёт; 4 Результаты разработки; 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение; 6 Социальная ответственность; Заключение; Список использованных источников</i></p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p><i>Лист 1 – Общий вид реактора окисления метанола А1 Лист 1 – Общий вид реактора окисления метанола А1 Лист 3 – Технологическая схема А2 Лист 4 – Технико-экономические показатели А2</i></p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Кашук Ирина Вадимовна</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Черемискина Мария Сергеевна</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>17.04.2020</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент НОЦ Н.М. Кижнера</p>	<p>Беляев Василий Михайлович</p>	<p>к.т.н., доцент</p>		<p>06.05.2020</p>

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>4Г6Б</p>	<p>Хайров Марк Альбертович</p>		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 160 с., 28 рис., 37 табл., 65 источников, 1 прил., 6 листов графического материала.

Ключевые слова: реактор, теплообмен, кожухотрубчатый аппарат, расчёт на прочность, расчёт на устойчивость, расчёт на жёсткость, стеснённость от температурных деформаций. Объектом исследования является реактор окисления метанола в формальдегид.

Цель ВКР: модернизация конструкции реактора окисления метанола с использованием современных САПР для автоматизации расчётно-конструкторской работы, с целью оптимизации параметров конструкции реактора и снижения его металлоёмкости.

В процессе исследования проводились:

- 1) обзор литературных источников по соответствующей тематике;
- 2) технологический расчёт;
- 3) механический расчёт;
- 4) исследование в области социальной ответственности;
- 5) исследование в области финансового менеджмента, ресурсоэффективности и ресурсосбережения;

В результате исследования разработана конструкция реактора с меньшей металлоёмкостью в сравнении с установленным на производстве аппаратом. Надёжность эксплуатации разработки доказана механическим расчётом.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: производительность – 40000 тонн/год в пересчёте на формалин с концентрацией 37% мас., внутренний диаметр – 1600 мм, высота – 3603 мм, максимальная ширина – 2272 мм, масса аппарата – 8600 кг.

Область применения: производство формалина.

ABSTRACT

This graduation qualification work consists of 160 pages, 28 figures, 37 tables, 65 sources of literature and 6 sheets of graphic materials.

Key words: reactor, heat exchange, shell and tube apparatus, strength calculations, rigidity calculations, constraints from temperature deformations.

The object of study is a reactor of methanol oxidation into formaldehyde.

The aim of this project: modernization of methanol oxidation reactor's construction with automatized engineering by means of modern CAD and CAE systems in order to create optimal design and decrease metal capacity of the reactor.

The following work was made during the research:

- 1) literature review according to the theme;
- 2) technological calculations;
- 3) mechanical calculations;
- 4) social responsibility research;
- 5) financial and resource efficiency research.

As a result of the research a design with decreased metal capacity was engineered. The reliability of the reactor was proved by means of mechanical calculation.

The main structural, technological and operational characteristics: productive capacity – 40000 tons/year of 37% mas. formalin, inner diameter – 1600 mm, height – 3603 mm, maximal width – 2272 mm, mass of the reactor – 8600 kg.

Level of implementation: project.

Field of implementation: formalin production.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	12
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ И ИНДЕКСЫ:	13
ВВЕДЕНИЕ.....	18
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	20
1.1 Способы получения формалина в промышленности	20
1.2 Схема реакторного блока производства формалина на оксидном катализаторе.....	23
1.2.1 Реактор производства формалина на оксидном катализаторе	25
1.3 Оценка существующих готовых решений и предложения по оптимизации	27
1.4 Методы расчёта реактора окисления метанола в формальдегид на оксидном катализаторе	28
2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ	31
2.1 исходные расчётные.....	31
2.2 Расчёт эквивалентного диаметра трубки, заполненной керамическими кольцами.....	32
2.3 Расчёт концентраций изобарных теплоёмкостей исходных веществ и продуктов реакции	33
2.4 Материальный баланс.....	36
2.5 Тепловой расчёт аппарата	39
2.5.1 Определение движущей силы процесса теплопередачи	40
2.5.2 Гидродинамический режим движения газов в трубном пространстве	42
2.5.3 Расчёт коэффициента теплоотдачи из зоны подогрева.....	45
2.5.4 Расчёт коэффициента теплоотдачи из реакционной зоны трубного пространства	46
2.5.5 Расчёт коэффициентов теплоотдачи со стороны ДФС	48
2.5.6 Расчёт коэффициентов теплопередачи	49

2.5.7 Расчёт поверхности теплопередачи	50
2.5.8 РАСЧЁТ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ.....	51
2.6 Кинетика реактора	52
2.7 Гидравлический расчёт реактора [20].....	53
2.7.1 Гидравлический расчёт трубного пространства	53
2.7.2 Гидравлический расчёт трубного пространства	55
2.7.3 Подбор штуцеров	57
2.7.4 Подбор штуцеров	58
2.8 Основные результаты технологического расчёта.....	59
3 МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ	60
3.1 Расчёт кожуха	61
3.1.1 Расчёт обечайки греющей камеры (Рисунок 12, позиция 1)	64
3.1.1.1 Расчёт обечайки на устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017 [33].....	66
3.1.1.2 Расчёт обечайки на устойчивость в условиях гидравлических испытаний	68
3.1.1.3 Проверка условия применимости расчётных формул	69
3.1.1.4 Проверка условия прочности для обечайки	70
3.2 Расчёт днища и крышки (Рисунок 12, позиция 4)	71
3.2.1 Проверка условий прочности крышки и днища	72
3.3 Расчёт элементов греющей камеры.....	73
3.3.1 Расчёт толщины трубной решётки	73
3.3.2 Уточнение количества труб (Рисунок 12, позиция 2)	74
3.3.3 Расчёт вспомогательных величин	75
3.3.4 Основные характеристики жёсткости элементов аппарата	76
3.3.5 Определение усилий в элементах аппарата	80
3.3.6 Расчётные напряжения в элементах конструкции.....	82
3.3.7 Расчётные напряжения в трубных решётках (Рисунок 12, позиция 3)	83
3.3.8 Проверка прочности трубных решёток (Рисунок 12, позиция 3)	86
3.3.9 Проверка трубной решётки и труб на малоцикловую прочность.....	86

3.3.10 Расчёт труб на прочность, устойчивость и жёсткость и расчёт крепления труб в решётке	86
3.4 Расчёт укреплений отверстий	87
Расчётные диаметры	88
3.4.2 Расчёт укреплен отверстия под люк-лаз (Рисунок 12, позиция д).....	90
3.4.4 Расчёт укрепления отверстий на эллиптической крышке и днище (Рисунок 12, позиции а, б).....	92
3.5 Расчёт фланцевого соединения аппарата (Рисунок 12, позиция б)	94
3.5.1 Основные расчётные значения	94
3.5.2 Усилия, необходимые для смятия прокладки и обеспечения герметичности фланцевого соединения	96
3.5.3 Усилия в шпильках фланцевого соединения при затяжке и в рабочих условиях	97
3.5.3.1 Податливость прокладки и шпилек.....	97
3.5.3.2 Расчётные параметры и угловая податливость фланцев	98
3.5.3.3 Плечи действия сил и коэффициенты жёсткости	99
3.5.4 Проверка прочности шпилек и прокладки	100
3.5.5 Расчёт фланцев на статическую прочность.....	101
3.5.5.1 Расчётные напряжения во фланце при затяжке	101
3.5.5.2 Расчётные напряжения во фланцах в рабочих условиях	102
3.5.5.3 Проверка условий статической прочности фланцев	103
3.5.6 Проверка углов поворота фланцев	104
3.5.7 Проверка малоцикловой прочности элементов фланцевого соединения	105
3.6 Расчёт элементов конструкции, поддерживающей насадку катализатора	105
3.7 Определение массы аппарата и расчёт обечайки от воздействия опорных нагрузок.....	110
3.7.1 Определение массы аппарата.....	110
3.7.2 Расчёт опор аппарата (Рисунок 12, позиция 8)	112

3.7.3 Расчёт несущей способности для рабочих условий	114
3.7.4 Расчёт несущей способности для условий испытаний	115
4 РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ.....	117
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ».....	118
Введение.....	119
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения...	120
5.1.1 Анализ конкурентных технических решений	120
5.1.2 SWOT-анализ.....	121
5.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	123
5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	123
5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	124
5.2.3 Разработка графика исследовательского проекта.....	125
5.3 Бюджет научно-технического исследования	129
5.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования ..	130
5.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	130
5.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы	131
5.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	133
5.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	133
5.3.6 Накладные расходы.....	134
5.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	134
5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	136
Вывод по разделу	139
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ».....	140

Введение.....	142
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ...	143
6.2 Производственная безопасность	144
6.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	145
6.3.1 Превышение уровня шума	145
6.3.2 Воздействие материальных объектов, имеющих высокие температуры	146
6.3.3 Мероприятия по снижению воздействия токсичных веществ	147
6.3.4 Поражение электрическим током.....	147
6.4 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работающего	148
6.4.1 Превышение уровня шума	148
6.4.2 Меры по предотвращению воздействию материальных объектов имеющих, высокие температуры.....	149
6.4.3 Мероприятия по снижению воздействия токсичных веществ	149
6.4.4 Меры по снижению риска поражения электрическим током	150
6.5 Экологическая безопасность.....	151
6.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	153
Выводы по разделу.....	154
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	155
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	156

ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Дифенильная смесь (ДФС) – высокотемпературный теплоноситель, смесь дифенила и оксида дифенила.

Инерт – инертные по отношению к химическому превращению керамические кольца.

Критическая температура – это температура газа, при превышении которой газ не может быть сжижен никаким повышением давления.

Формалин – водный раствор формальдегида, стабилизированный метанолом.

Метод конечных элементов (МКЭ) – это численный метод анализа технических конструкций.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ И ИНДЕКСЫ:

1 – для зоны подогрева;

2 – для зоны реакции;

2',3 – для пространства, заполненного жидкой дифенильной смесью;

1',4 – для парового пространства;

V – запас поверхности тепловой изоляции, %;

V_1, V_2 – коэффициенты;

C_{p_a} – изобарная теплоемкость азота, Дж/(кг·°С);

C_{p_v} – изобарная теплоемкость паров воды, Дж/(кг·°С);

$C_{p_{дфс}}$ – теплоемкость дифенильной смеси, Дж/(кг·°С);

C_{p_k} – изобарная теплоемкость кислорода, Дж/(кг·°С);

C_{p_m} – изобарная теплоемкость метанола, Дж/(кг·°С);

$C_{p_{мэ}}$ – изобарная теплоемкость диметилового эфира, Дж/(кг·°С);

$C_{p_{оу}}$ – изобарная теплоемкость монооксида углерода, Дж/(кг·°С);

$C_{p_{см}}$ – изобарная теплоемкость смеси в зоне подогрева, Дж/(кг·°С);

$C_{p_{ф}}$ – изобарная теплоемкость формальдегида, Дж/(кг·°С);

C_{v_a} – изохорная теплоемкость азота, Дж/(кг·°С);

C_{v_v} – изохорная теплоемкость паров воды, Дж/(кг·°С);

C_{v_k} – изохорная теплоемкость кислорода, Дж/(кг·°С);

C_{v_m} – изохорная теплоемкость метанола, Дж/(кг·°С);

$C_{v_{мэ}}$ – изохорная теплоемкость диметилового эфира, Дж/(кг·°С);

$C_{v_{оу}}$ – изохорная теплоемкость монооксида углерода, Дж/(кг·°С);

$C_{v_{ф}}$ – изохорная теплоемкость формальдегида, Дж/(кг·°С);

$C_{v_{см}}$ – изохорная теплоемкость смеси, Дж/(кг·°С);

D – внутренний диаметр аппарата, м;

$D_{эқв}$ – внутренний диаметр аппарата, м;

d – внешний диаметр трубок, мм;

d_{int} – внутренний диаметр трубок, мм;

d_k – внешний диаметр кольца катализатора, мм;
 $d_{кв}$ – внутренний диаметр кольца катализатора, мм;
 $d_э$ – эквивалентный диаметр трубки с учётом заполнения катализатором,
мм;
 G – Годовая производительность установке по 37% формалину, т/год;
 $G_ч$ – производительность по метанолу, кг/ч;
 g_{a1} – массовая доля азота в исходной газовой смеси, кг/кг;
 g_{a2} – массовая доля азота в продукте, кг/кг;
 $g_{в1}$ – массовая доля паров воды в исходной газовой смеси, кг/кг;
 $g_{в2}$ – массовая доля паров воды в продукте, кг/кг;
 $g_{к1}$ – массовая доля кислорода в исходной газовой смеси, кг/кг;
 $g_{к2}$ – массовая доля кислорода в продукте, кг/кг;
 $g_{м1}$ – массовая доля метанола в исходной газовой смеси, кг/кг;
 $g_{м2}$ – массовая доля метанола в продукте, кг/кг;
 $g_{мэ2}$ – массовая доля диметилового эфира в продукте, кг/кг;
 h_k – высота кольца катализатора, мм;
 l – высота трубок, мм;
 K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);
 $k_{зап}$ – коэффициент теплопередачи заполнения труб в трубной решетке;
 L – длина канала течения, м;
 M_a – молярная масса азота, г/моль;
 $M_в$ – молярная масса воды, г/моль;
 $M_к$ – молярная масса кислорода, г/моль;
 $M_м$ – молярная масса метанола, г/моль;
 $M_{оу}$ – молярная масса монооксида углерода, г/моль;
 $M_{мэ}$ – молярная масса диметилового эфира, г/моль;
 $M_ф$ – молярная масса формальдегида, г/моль;
 m_k – масса одного кольца катализатора, г;
 Nu – число Нуссельта;

n_k – количество колец катализатора, шт;

$n_{тр}$ – количество трубок, шт;

P_0 – атмосферное давление, МПа;

Pr – число Прандтля;

$P_{изб.тр}$ – избыточное давление в трубном пространстве, МПа;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

$Re_{тр}$ – число Рейнольдса для трубного пространства;

$Re_{ж.дфс}$ – число Рейнольдса для пространства заполненного жидкой ДФС;

r – теплота испарения ДФС, Дж/кг;

T_0 – температура по шкале Кельвина, соответствующая нулю по шкале Цельсия, К;

$T_{a.кр}$ – критическая температура азота, К;

$T_{в.кр}$ – критическая температура водяного пара, К;

$T_{мэ.кр}$ – критическая температура диметилового эфира, К;

$T_{к.кр}$ – критическая температура кислорода, К;

$T_{м.кр}$ – критическая температура метанола, К;

$T_{уг.кр}$ – критическая температура угарного газа, К;

$T_{ф.кр}$ – критическая температура формальдегида, К;

t – шаг размещения труб, м;

$t_{кип.дфс}$ – температура кипения ДФС, °С;

$t_{ср.1}$ – средняя температура в зоне подогрева реакционной смеси, °С;

$t_{ср2}$ – средняя температура ДФС в зоне реакции, °С;

V_k – объём одного кольца катализатора, м³;

V_m – молярный объём идеального газа, л/моль;

$V_{св}$ – свободный объём трубок, заполненных катализатором, м³;

x_{a1} – концентрация азота в исходной газовой смеси, %;

$x_{в1}$ – концентрация паров воды в исходной газовой смеси, %;

$x_{к1}$ – концентрация кислорода в исходной газовой смеси, %;

x_{M1} – концентрация метанола в исходной газовой смеси, %;
 $x_{фз1}$ – концентрация формальдегида в формалине, % мас.;
 $уг$ – время работы установки между остановочными ремонтами, дней;
 W – расход дифенильной смеси, кг/ч;
 W' – расход паров ДФС на нагрев исходной смеси, кг/ч;
 α_1 – коэффициент теплоотдачи для зоны подогрева, Вт/(м²·К);
 α_2 – коэффициент теплоотдачи из зоны реакции, Вт/(м²·К);
 α_3 – коэффициент теплоотдачи для пространства, заполненного жидкой ДФС, Вт/(м²·К);
 α_4 – коэффициент теплоотдачи в паровом пространстве аппарата, Вт/(м²·К);
 α_H – коэффициент теплоотдачи тепловой изоляции аппарата, Вт/(м²·К);
 $\alpha_{м.тр}$ – коэффициент теплоотдачи от межтрубного пространства, Вт/(м²·К);
 $\alpha_{тр}$ – коэффициент теплоотдачи от трубного пространства, Вт/(м²·К);
 $\delta_{отл}$ – толщина отложений на стенке трубы, м;
 $\delta_{ст}$ – толщина стенки трубы, м;
 $\delta_{из}$ – толщина тепловой изоляции, м;
 ΔH – тепло, выделяющееся в ходе всего химического процесса, Дж/ч;
 ΔH_1 – тепловой эффект реакции конверсии метанола, Дж/кмоль;
 $\Delta H_{1.1}$ – тепло, выделяющееся в ходе целевой реакции, Дж/ч;
 ΔH_2 – тепловой эффект побочной реакции с участием формальдегида, Дж/кмоль;
 $\Delta H_{2.1}$ – тепло, выделяющееся в ходе побочной реакции, Дж/ч;
 $\Delta I_{см.н}$ – изменение энтальпии смеси газов, Дж/кг;
 Δt_6 – температура ДФС на входе в реактор, °С;
 Δt_m – температура ДФС на выходе из реактора, °С;
 $\Delta t_{ср1}$ – средняя температура ДФС в реакторе, °С;
 $\Delta t_{ср2}$ – средняя разность температур теплоносителей в зоне реакции, °С;
 λ_1 – теплопроводность газов исходной смеси, Вт/(м·К);

λ_2 – теплопроводность смеси в зоне подогрева, Вт/(м·К);
 $\lambda_{\text{ДФС}}$ – теплопроводность ДФС, Вт/(м·К);
 $\lambda_{\text{загр}}$ – коэффициент теплопроводности загрязнений, Вт/(м·К);
 $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности тепловой изоляции, Вт/(м·К);
 $\lambda_{\text{к}}$ – теплопроводность керамики;
 $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К);
 μ – вязкость теплоносителя, мПа · с;
 $\mu_{\text{а}}$ – динамическая вязкость азота, мПа · с;
 $\mu_{\text{в}}$ – динамическая вязкость водяного пара, мПа · с;
 $\mu_{\text{см1}}$ – динамическая вязкость смеси в зоне подогрева, мПа · с;
 $\mu_{\text{ДФС}}$ – динамическая вязкость дифенильной смеси, мПа · с;
 $\mu_{\text{к}}$ – динамическая вязкость кислорода, мПа · с;
 $\mu_{\text{м}}$ – динамическая вязкость метанола, мПа · с;
 $\mu_{\text{мэ}}$ – динамическая вязкость диметилового эфира в зоне реакции, мПа · с;
 $\mu_{\text{см1}}$ – динамическая вязкость смеси в зоне подогрева, мПа · с;
 $\mu_{\text{см.ср}}$ – среднее значение динамической вязкости смеси, мПа · с;
 $\mu_{\text{уг2}}$ – динамическая вязкость угарного газа в зоне реакции, мПа · с;
 $\mu_{\text{ф2}}$ – динамическая вязкость формальдегида в зоне реакции, мПа · с;
 $\rho_{\text{ДФС}}$ – плотность дифенильной смеси, г/см³;
 $\rho_{\text{кер}}$ – плотность керамики колец, г/см³;
 $\rho_{\text{н.п.}}$ – насыпная плотность катализатора, г/см³;
 $\rho_{\text{см.ср}}$ – средняя плотность исходной смеси, г/см³;
 $\rho_{\text{см.1}}$ – плотность исходной смеси, г/см³;
 $\rho_{\text{см.2}}$ – плотность исходной смеси реакционного, г/см³;
 χ – степень конверсии метанола, доли;
 $\omega_{\text{тр}}$ – скорость течения смеси в трубках, м/с;
 $\omega_{\text{ДФС}}$ – скорость движения ДФС, м/с;
% мас. – массовый процент;
ДФС – дифенильная смесь;

ВВЕДЕНИЕ

Производство формалина с конверсией метанола на оксидном катализаторе является не самым эффективным методом из производственных методов с точки зрения энергетической эффективности и капитальных вложений, но, при этом, формалин, получаемый по данной технологии, имеет наиболее высокое качество из всех хорошо освоенных промышленных методов.

Актуальность темы заключается в том, что потребность в качественном формалине требует оптимизации конструктивных параметров оборудования для снижения материалоёмкости и, как следствие, капитальных вложений в производство.

В настоящее время разными организациями ведутся поиски путей оптимизации производства формалина с использованием оксидного катализатора.

Тема ВКР была сформулирована в ходе производственной практики. Одним из продуктов предприятия ООО «Сибметахим» города Томска является формалин технической марки ФМ (концентрацией около 37% мас.). Мощность производства формалина – 40 тыс. тонн по 37 % формалину. На предприятии используется технология с применением оксидного катализатора.

Задачи ВКР:

- поиск и изучение материалов по теме;
- получение основных геометрических параметров аппарата, позволяющие снизить его размеры;
- разработка конструкции, позволяющую обеспечить надёжность эксплуатации аппарата;
- оценка экономической эффективности разработки;
- разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов производства.

Материалы по теме были взяты из различного рода библиотечных систем, баз данных научных статей и патентов, также значительная часть информации была взята из технической и технологической документации производства формалина ООО «Сибметахим».

Основные геометрические параметры аппарата, были получены на основе технологического расчёта по общепринятым методикам.

Разработка надёжной конструкции аппарата проводилась на основе механического расчёта по стандартам отрасли, а также с помощью программы Inventor Professional.

Определение основных геометрических и конструкционных параметров проводилось чередой последовательных итерационных расчётов, таким образом были подобраны оптимальные параметры. В данной работе представлена только завершающая итерация.

Оценка экономической эффективности разработки производится на основе методики НИ ТПУ по написанию раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение».

Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов производства осуществляется на основе актуальных нормативных документах.

В результате проектной работы ожидается получить аппарат с меньшей металлоёмкостью в сравнении с установленным на производстве формалина ООО «Сибметахим». Об уменьшении металлоёмкости можно судить по снижению массы аппарата.

1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Формальдегид – бесцветный газ с резким запахом, растворимый в полярных растворителях, продукт каталитического окисления метанола. В газообразном состоянии формальдегид склонен к полимеризации при температурах ниже 80°C, в водном растворе без стабилизирующих компонентов процесс полимеризации происходит более интенсивно [1].

Формалин - это водный раствор формальдегида, стабилизированный метанолом. Применяется в качестве дезинфицирующего и дезодорирующего средства, для сохранения анатомических препаратов, дубления кож и бальзамирования [1].

Благодаря высокой реакционной способности и многообразию химических свойств формалин получил широкое распространение в различных отраслях промышленности, таких, как деревообрабатывающая, бумажная, металлообрабатывающей, в производстве каучука и резины, а также в медицине и многих других отраслях [2].

1.1 Способы получения формалина в промышленности

В настоящее время основным методом получения формальдегида в промышленности является каталитическое дегидрирование метанола [3, 4] в двух видах оформления этого процесса [2 – 4]:

- 1 каталитической конверсией метанола на металлическом катализаторе;
- 2 каталитической конверсией метанола на оксидном катализаторе.

В качестве металлического катализатора на реальных промышленных объектах используется серебряный катализатор. Процесс на серебряном катализаторе идёт при температуре 500 – 720 °C [3] при соотношениях концентраций метанола выше предела взрываемости.

Инв. № подл.	Подл. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подл. и дата	<i>ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ</i>												
					Лит	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	Лит	Лист	Листов					
Инв. № подл.	Подл. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подл. и дата	<i>Проектирование реактора окисления метанола в формальдегид</i>					У		20	160				
										<i>Студент</i>	<i>Хайров М.А.</i>				<i>НИ ТПУ ИШНПТ Группа 4Г6Б</i>		
										<i>Руков.</i>	<i>Беляев В.М.</i>						
										<i>Конс.</i>							
										<i>Н. контр.</i>							
			<i>Руков. ООП</i>	<i>Беляев В.М.</i>													

Есть два основных способа получения формальдегида на серебряном катализаторе [5]:

- полная конверсия метанола в присутствии кристаллов серебра, водяного пара, при избытке метанола при температурах 680-720°C;
- частичная конверсия метанола в присутствии кристаллического серебра или серебряной сетки, водяного пара, при избытке метанола при температурах 600-650°C, с последующей ректификацией;

На рисунке 1 представлена технологическая схема производства формальдегида окислением метанола на серебряном катализаторе с полной конверсией метанола (технология с неполной конверсией метанола и дистилляцией выглядит аналогичным образом с добавлением стадии ректификации).

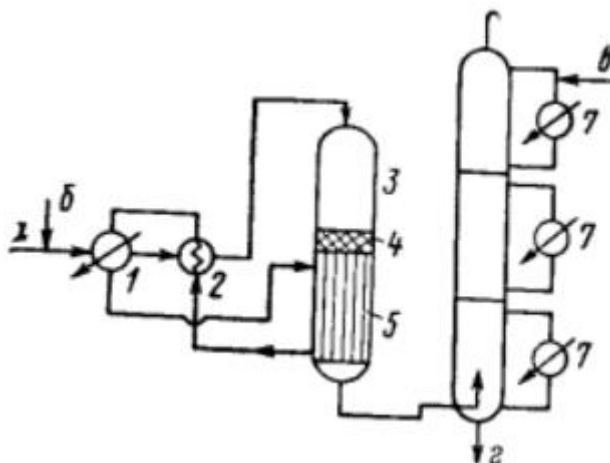


Рисунок 1 – Технологическая схема получения формальдегида окислительной конверсией метанола на серебряном катализаторе [3]:

1 – испаритель; 2 – теплообменник; 3 – реактор; 4 – катализатор; 5 – подконтактный холодильник; 6 – абсорбер; 7 – теплообменник; а – воздух; б – метанол; в – вода; г – метанольный формалин.

В качестве оксидного катализатора в промышленности используют соединения молибдена и железа. Процесс на оксидном катализаторе идет при значительно более низких температурах – 260-400 °С.

Технологическое оформление процесса на оксидном катализаторе в общих чертах похоже на процесс на серебряном катализаторе (Рисунок 2).

Инв. № подл.	Подп. и дата
Инв. № дубл.	
Взам. инв. №	
Инв. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

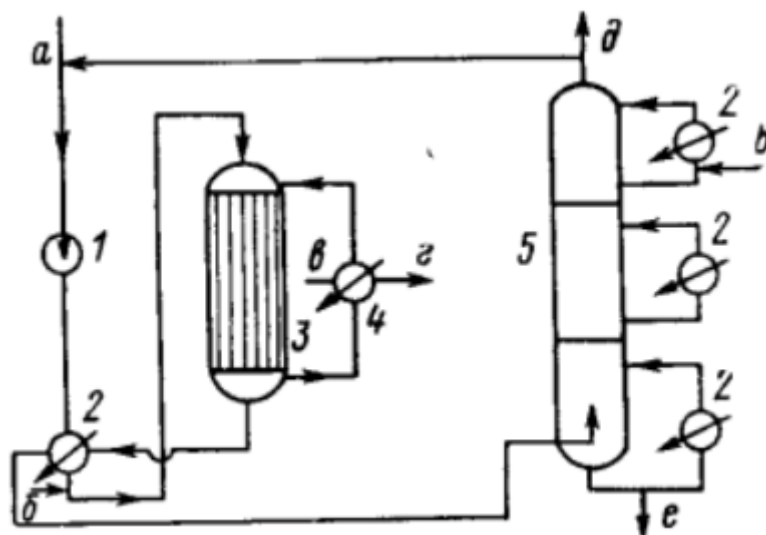


Рисунок 2 – Технологическая схема производства формальдегида окислительной конверсией метанола на оксидном катализаторе [3]: 1 – компрессор; 2, 4 – теплообменники; 3 – реактор; 5 – абсорбционная колонна

Окислением метанола на серебряном катализаторе получают по одним данным [5] 70% по другим 80% формалина [6], т.к. ранее процесс на оксидном катализаторе имел ограничения по производительности и подходил для производств объёмом не более 24-32 тыс. тон в год, таким образом в основе всех крупнотоннажных производств лежал метод окислительной конверсии метанола на серебряном катализаторе. Сейчас же реализованы агрегаты мощностью 200-250 тыс. тонн в год, в разработке есть и более мощные установки [7].

В последнее время всё большее распространение получает метод каталитической конверсии на оксидном катализаторе [4], так как процесс окисления происходит при значительно более низкой температуре, что уменьшает количество побочных реакций, из-за чего товарный формалин, полученный товарный содержит не более 0,6-1%, и не более 0,02% муравьиной кислоты [3]. Это достаточно важное преимущество над процессом на серебряном катализаторе с полной конверсией метанола [3].

Формалин, который получают по технологии с неполной конверсией метанола на серебряном катализаторе и дистилляцией, содержит не более 1% метанола, а также меньшее количество других примесей по сравнению с технологией с применением полной конверсии метанола, но технология с неполной конверсией метанола экономически наименее выгодна [5].

Инва. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата	
Ли	Изм.	№ докум.
		Подп.
		Дата

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

1.2 Схема реакторного блока производства формалина на оксидном катализаторе

Далее будет подробно рассмотрена технология формальдегида (формалина) с каталитической конверсией метанола на примере предприятия ООО «Сибметахим» города Томска [8].

Метанол поступает из сети предприятия в испаритель, после чего смешивается со смесью абсорбционных газов рецикла и воздуха из блока дожигателя и газодувки. Далее смесь направляется в межтрубное пространство рекуператора (Р), который представляет из себя кожухотрубчатый теплообменник, где смесь подогревается (Рисунок 3).

Затем смесь газов направляется в трубчатое пространство каталитического реактора (КР). Химический процесс экзотермический, поэтому реактор охлаждается высокотемпературным теплоносителем дифенильной смесью (ДФС). Смесь продуктов реакции направляется в трубчатое пространство рекуператора (Р) – на собственное охлаждение и передачу тепла исходной смеси реагентов (Рисунок 3).

Поток формальдегида и других газов направляется в блок абсорбции. Часть не абсорбированных абгазов используется для разбавления воздуха, с целью снижения концентрации кислорода (чтобы не допустить образование взрывоопасных концентраций смеси), остатки направляются на каталитическое обезвреживание в дожигатель (Рисунок 3).

Инт. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ	Лист
										23

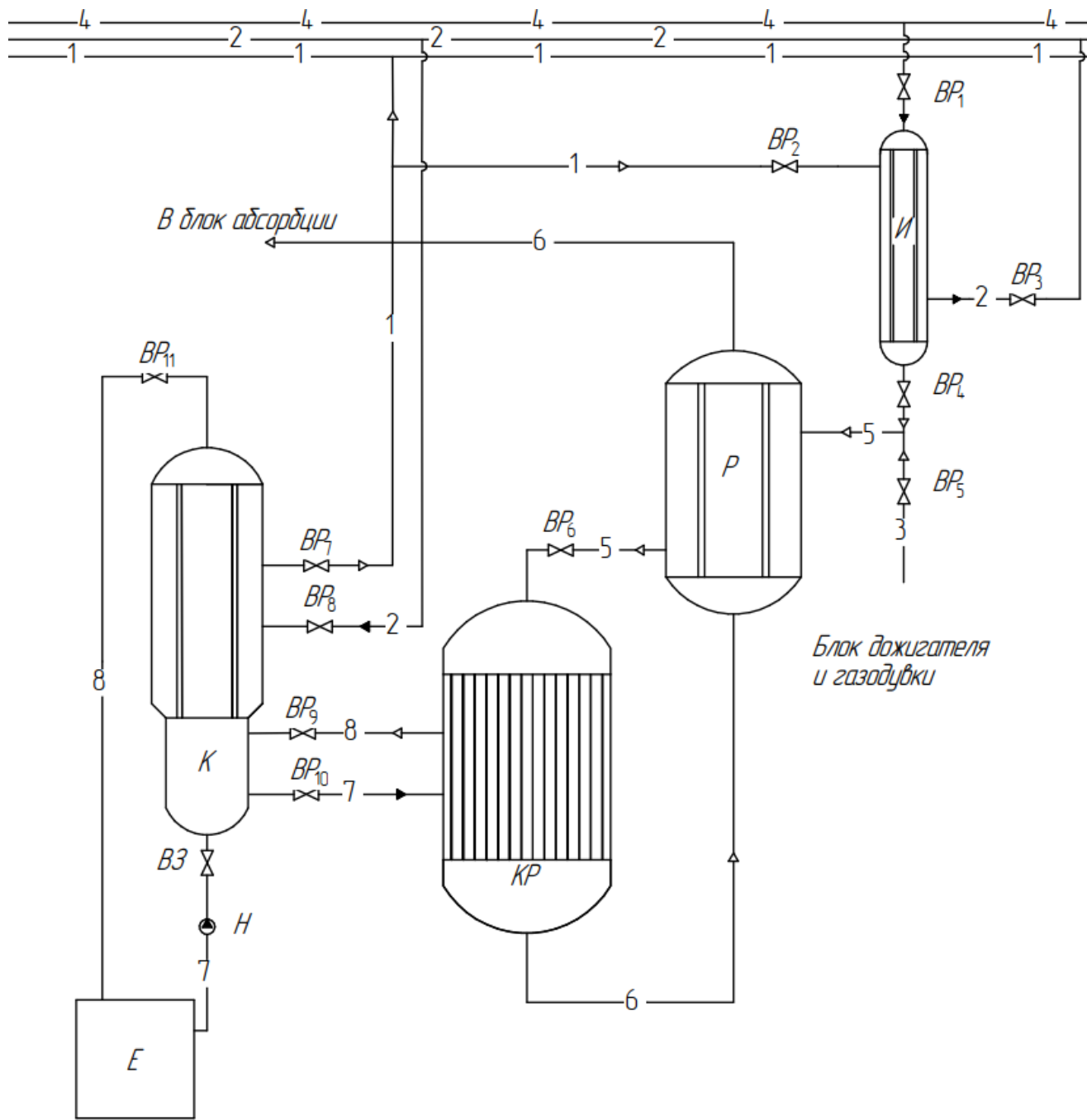


Рисунок 3 – Технологическая схема реакторного блока

1 – водяной пар; 2 – вода; 3 – смесь воздуха с абгазами; 4 – метанол; 5 – спиртогазовая смесь; 6 – продукты реакции; 7 – жидкая ДФС; 8 – пары ДФС;
 Е – ёмкость для ДФС; И – испаритель метанола; К – конденсатор паров ДФС; КР – каталитический реактор; Р – рекуператор; ВР₁₋₁₁ – вентиль регулирующийся; ВЗ – вентиль запорный; Н – насос;

Изм.	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	№ док.	Подп.	Дата
Изм.	№ док.	Подп.	Дата

1.2.1 Реактор производства формалина на оксидном катализаторе

Основным аппаратом производства формальдегида на оксидном катализаторе – это каталитический реактор, который представляет из себя кожухотрубчатый (Рисунок 4). Окисление метанола происходит в трубчатом пространстве, а по межтрубному пространству движется дифенильная смесь (Therminol VP-1 [9]), с помощью которой производится как нагрев реакционной смеси, так и отвод излишнего тепла с испарением хладагента.

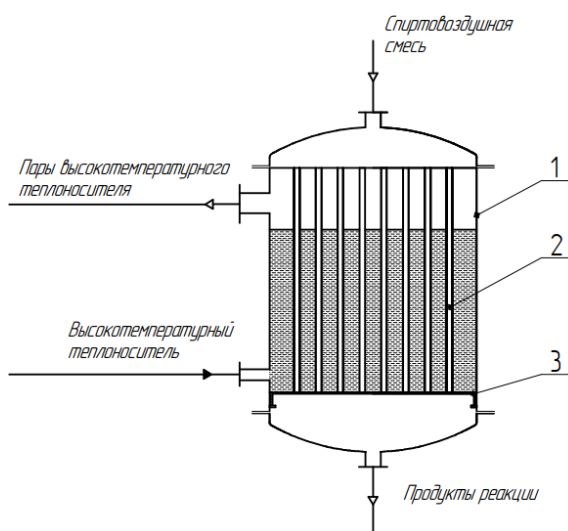


Рисунок 4 – Каталитический реактор окисления метанола:

1 – корпус; 2 – трубка; 3 – поддерживающая решётка

В трубки реактора загружен катализатор и инерт – керамические кольца без нанесения каталитически активного вещества (Рисунок 5). Инерт нужен для снижения температуры в реакционном пространстве с целью сохранить катализатор - при температуре выше 410 °С катализатор разрушается.



Рисунок 5 – Fe-Mo катализатор на инертном носителе [10]

Существует несколько различных вариантов распределения катализатора и инерта. На рассматриваемом производстве используют слои катализатора

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

25

разной активности - на входе в реактор и выходе из него исходная смесь проходит через слои с разным разбавлением катализатора (от инертного до слоя чистого катализатора, представлено на рисунке б).

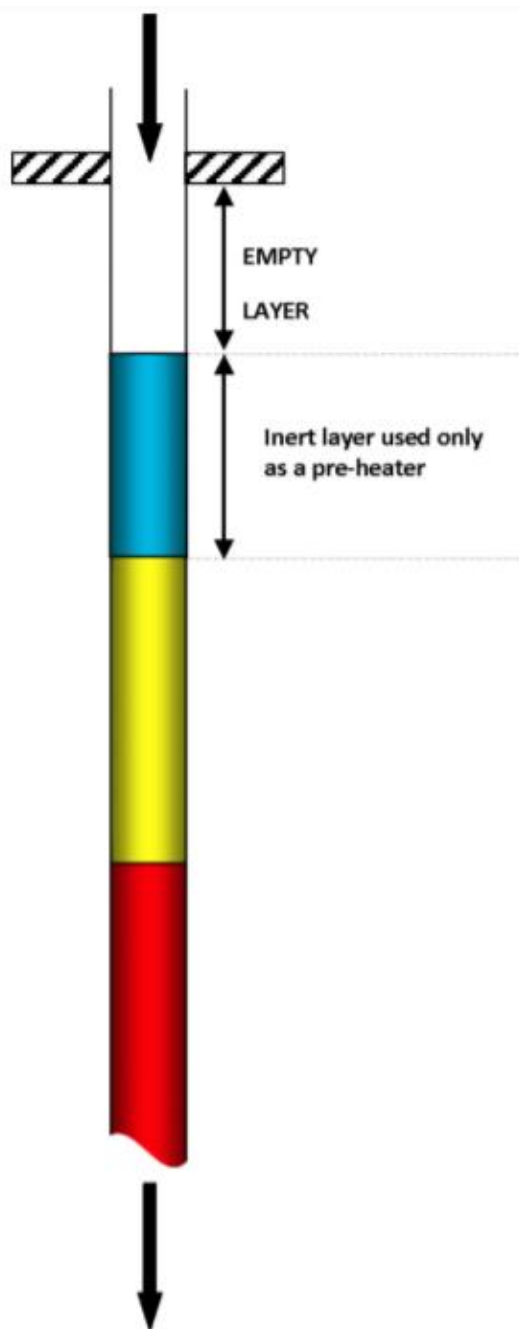


Рисунок б – Слои катализатора разной активности [10] (разбавленный слой + чистый):

Синий слой – слой чистого инерта; жёлтый слой – слой катализатора смешанного с инертном; красный слой – слой чистого катализатора.

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № инв. №	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

1.3 Оценка существующих готовых решений и предложения по оптимизации

Что касается производства формалина с применением оксидного катализатора, здесь есть значительные недостатки, которые ограничивают широкого использование данной технологии. Первый недостаток заключается в высокой энергоёмкости производства, что обусловлено проведением процесса окисления метанола в формальдегид при концентрациях метанола и кислорода ниже предела взрываемости (содержанием метанола до 11-12,5% об. [8, 10]); это требует прокачки большого объёма газа, что требует мощной газодувки. Второй значительный недостаток заключается в высокой металлоёмкости реактора для процесса на оксидном катализаторе, также из-за необходимости прокачки больших объёмов газа [3].

В настоящее время активно ведутся разработки по повышению энергетической эффективности. Например, было предложено по увеличению концентрации метанола в реакционной смеси с заменой кислорода на другой окислитель – N_2O [11]. Также было предложено частично заменить азот, в токе которого проводится химическое превращение на пропан, такая замена способствует снижению адиабатического разогрева реактора из-за более высокой теплоёмкости пропана по сравнению с азотом.

В патенте США [12] был предложен вариант технологической схемы формалина с совмещением двух типов реакторов, где реакционная смесь сперва поступает в реактор с серебряным катализатором, а за тем в реактор с оксидным катализатором. Серьёзным препятствием на пути реализации данной схемы являются необходимость перехода через область взрывоопасных концентраций и большой перепад температур между реакторами (около $400^{\circ}C$) [7].

В статье [13] был предложен мембранный реактор (мембрана используется в качестве носителя катализатора), такой аппарат позволяет добиться почти 100% выхода формальдегида и осуществлять независимое управление концентрацией метанола и окислителя на катализаторе. Несмотря на все

Инт. № подл.	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Инт. № подл.
Инт. № подл.	Инт. № дубл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

27

достоинства, такая разработка не получила широкого распространения из-за высокой стоимости мембраны [7].

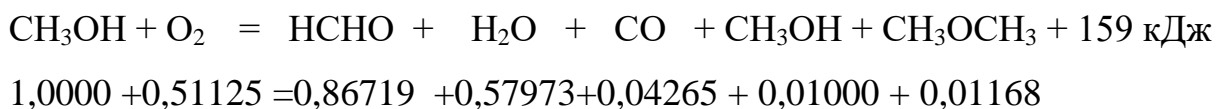
В настоящее время мировым лидером по поставке линий производства формалина является шведская фирма Perstorp AB [14], которая выпускает ряд типовых установок мощностью от 56 до 360 тыс. тонн формалина с концентрацией 37% мас. в год. Деятельность фирмы нацелена на создание установок с большой единичной мощностью, и технологические решения Perstorp AB мало подходят для производства формалина малых-средних объёмов.

На производстве формалина предприятия ООО «Сибметахим» города Томска используется технология, поставляемая ЗАО «Безопасные технологии», которая рассчитана на различную мощность производства – от 5 до 105 тыс. тонн формалина 37% масс [15]. Всё же, реактор используемый на предприятии достаточно громоздкий: число теплообменных трубок составляет 8652 шт, внутренний диаметр аппарата составляет 3600 мм, а высота и ширина 8600 и 4451мм соответственно [16].

Вероятно, такие размеры реактора обусловлены некоторым запасом реактора по производительности, ведь необходимая мощность производства формалина ООО «Сибметахим» составляет всего 40 тыс. тонн в год в пересчёте на формалин 37% мас. [8]. Отсюда возникает необходимость в оптимизации конструкции аппарата – снижение металлоёмкости и уменьшения габаритов конструкции.

1.4 Методы расчёта реактора окисления метанола в формальдегид на оксидном катализаторе

Суммарное превращение можно представить в следующем виде (ниже представлена «реальная стехиометрия» суммарной реакции – отношения продуктов и исходных веществ суммарной реакции к исходному количеству метанола) [8]:



Интв. № подл.	Подп. и дата
Интв. № дубл.	Взам. инв. №
Интв. № инв.	Подп. и дата
Интв. № подл.	Интв. № инв.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	<i>ФЮРА РОМ. 00.00.00 ПЗ</i>	Лист 28

Превращение происходит с выделением тепла, таким образом, на один моль метанола выделяется 159 кДж тепла.

В представленной схеме помимо основных продуктов (метанола, кислорода, формальдегида и воды) также учитываются главные побочные продукты - окись углерода и диметиловый эфир.

Для достаточной интенсивности протекания химического превращения кислород подают с некоторым избытком, но при этом концентрация кислорода в реакционной смеси должна быть ниже пределов взрываемости, который зависит от концентрации метанола в смеси.

В трудах исследователей институт катализа СО РАН [17, 18] разработана кинетическая модель для двух основных реакций окисления метанола на железо-молибденовом катализаторе:

- образование формальдегида



- образование оксида углерода



Кинетический расчёт позволит составить температурный профиль реактора, по которому можно сделать тепловой расчёт аналогично теплообменнику согласно классическим пособиям по проектированию основных процессов и аппаратов химической технологии [19, 20].

Расчёт элементов сосудов и аппаратов проводится в основном по серии стандартов ГОСТ 34233 – 2017, а также по справочнику по расчётам и конструированию под редакцией Н.Н. Лацинского [21] и пособиям по расчётам и конструированию В.М. Беляева и В.М. Миронова [22, 23].

Так как стандартная и адекватная методика расчётов существует далеко не для всех элементов, то целесообразно воспользоваться численными методами в прочностных расчётах. Одним из таких методов является метод конечных элементов (МКЭ). Возможность анализа МКЭ включают в себя такие САЕ системы как Inventor Professional, SOLIDWORKS, Ansys и др.

Инт. № подл.	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Инт. № дубл.
Инт. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Основная идея МКЭ состоит в том, что любую непрерывную в некоторой области величину (например, внутреннее усилие в фундаментной балке, перемещение в плите перекрытия и т.п.) можно аппроксимировать дискретной моделью, которая создается из множества кусочно-непрерывных функций, определенных в конечном числе подобластей (элементов).

Главное преимущество расчётов с помощью МКЭ в различных инженерных программах – это возможность расчёта конструкций практически любой сложности с визуализацией результатов.

Инв. № подл.	Подп. и дата				Инв. № дубл.	Взам. инв. №				Инв. № подл.	Подп. и дата				
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	<i>ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ</i>										Лист
															30

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ

Технологический расчёт направлен на определение основных геометрических параметров.

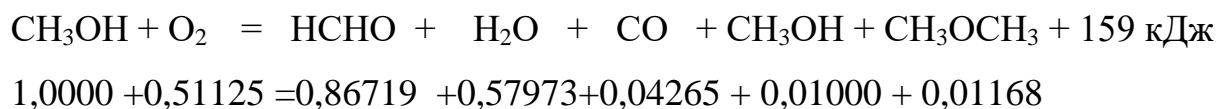
2.1 исходные расчётные

В таблице 1 ниже представлены основные параметры технологического процесса [8].

Таблица 1 – Основные параметры технологического процесса

Параметр	Характеристика
Годовая производительность установки, тонн/год	40000
Давление в трубчатом пространстве (избыточное), МПа	0,025
Давление в межтрубном пространстве (избыточное), МПа	0
Температур кипения ДФС, °С	257
Теплота испарения ДФС, Дж/кг	$2,944 \cdot 10^5$
Степень общей конверсии метанола	0,99

Суммарное уравнение химической реакции с реальными стехиометрическими коэффициентами [8]:



Параметры трубок были взяты из технической и технологической документации ООО «Сибметакхим» [8, 16]. Количество трубок было подобрано последовательными итерационными расчётами; параметры трубок представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Рассчитанные параметры аппарата

Параметр	Значение параметра
Высота трубок (l), мм	1510
Внешний диаметр трубок (d), мм	25
Внутренний диаметр трубок, мм	21
Количество трубок, шт	1892

Ивл. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата	Ивл. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Параметры керамических колец (Таблица 3), которыми заполнены трубное пространство реактора, взяты из [7, 10].

Таблица 3 – Параметры керамического носителя катализатора

Параметр	Значение параметра
Насыпная плотность катализатора ($\rho_{н.п.}$), г/см ³	0,8
Плотность керамики колец ($\rho_{кер}$), г/см ³	2,75
Внешний диаметр кольца катализатора (d_k), мм	4,5
Внутренний диаметр кольца катализатора ($d_{кв}$), мм	2
Высота кольца катализатора (h_k), мм	4,5

2.2 Расчёт эквивалентного диаметра трубки, заполненной керамическими кольцами.

Для теплового и гидродинамического расчёта необходимо определить эквивалентный диаметр трубок, заполненных катализатором

Объём одного кольца катализатора (миллиметры переведены в метры):

$$V_k = \frac{\pi}{4} \cdot (d_k^2 - d_{кв}^2) \cdot h_k = \frac{\pi}{4} \cdot (0,0045^2 - 0,002^2) \cdot 0,0045 = 5,74 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$$

Масса одного кольца катализатора:

$$m_k = V_k \cdot \rho_{кер} \cdot h_k = \frac{\pi}{4} \cdot 5,74 \cdot 10^{-8} \cdot 2,75 \cdot 10^6 \cdot 0,0045 = 0,158 \text{ г}$$

Количество колец катализатора:

$$n_k = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l \cdot \rho_{н.п.}}{4 \cdot m_k} = \frac{\pi \cdot 0,016^2 \cdot 1,51 \cdot 0,8 \cdot 10^6}{4 \cdot 0,158} = 3754$$

Свободный объём трубок, заполненных катализатором:

$$V_{св} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{int}^2 \cdot l - n_k \cdot V_k = \frac{\pi}{4} \cdot 0,021^2 \cdot 1,51 - 3754 \cdot 5,74 \cdot 10^{-8} = 3,07 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Эквивалентный диаметр трубки с учётом заполнения катализатором:

$$d_э = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{св}}{\pi \cdot l}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,03 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 1,51}} = 0,016 \text{ м}$$

Инд. № подл.	Подп. и дата
Инд. № дубл.	
Взам. инв. №	
Инд. № подл.	Подп. и дата
Инд. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

2.3 Расчёт концентраций изобарных теплоёмкостей исходных веществ и продуктов реакции

Определим изобарные теплоёмкости компонентов, входящих в исходную смесь газов, и продуктов химического превращения как для смеси идеальных газов [24].

Изобарная теплоёмкость идеального двухатомного газа, Дж/кг·°С:

$$C_{p_i} = \frac{7 \cdot R \cdot 1000}{2 \cdot M_i}$$

Изобарная теплоёмкость идеального многоатомного газа, Дж/кг·°С:

$$C_{p_i} = \frac{4 \cdot R \cdot 1000}{M_i}$$

Тепловые ёмкости метанола, кислорода, паров воды и азота соответственно:

$$C_{p_M} = \frac{4 \cdot R \cdot 1000}{M_M} = \frac{4 \cdot 8,314 \cdot 1000}{32} = 1039 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$$

$$C_{p_K} = \frac{7 \cdot R \cdot 1000}{2 \cdot M_K} = \frac{7 \cdot 8,314 \cdot 1000}{2 \cdot 32} = 909 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$$

$$C_{p_B} = \frac{4 \cdot R \cdot 1000}{M_B} = \frac{4 \cdot 8,314 \cdot 1000}{18} = 1109 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$$

$$C_{p_A} = \frac{7 \cdot R \cdot 1000}{2 \cdot M_{MЭ}} = \frac{7 \cdot 8,314 \cdot 1000}{2 \cdot 34} = 856 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$$

По [8] концентрация метанола в спиртогазовой смеси составляет 6,5-8,9% об., а концентрация кислорода от 6.5 до 12.3% об.

Примем концентрацию метанола исходной смеси равной 7,8 % об., концентрацию кислорода 10,0% об, концентрацию водяных паров 0,1% об., тогда остальной объём занимает азот.

Рассчитаем массовые доли компонентов смеси

$$g_{M1} = \frac{x_{M1} \cdot M_M}{x_{M1} \cdot M_M + x_{K1} \cdot M_K + x_{B1} \cdot M_B + x_{A1} \cdot M_A} = \frac{0,078 \cdot 32}{0,078 \cdot 32 + 0,100 \cdot 32 + 0,001 \cdot 18 + 0,821 \cdot 28} = 0,087 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

Инва. № дубл.	Инва. № инв. №	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата	Инва. № подл.
Ли	Изм.	№ докум.
Подп.	Дата	

$$g_{к1} = \frac{x_{к1} \cdot M_{к}}{x_{м1} \cdot M_{м} + x_{к1} \cdot M_{к} + x_{в1} \cdot M_{в} + x_{а1} \cdot M_{а}}$$

$$= \frac{0,100 \cdot 32}{0,078 \cdot 32 + 0,100 \cdot 32 + 0,001 \cdot 18 + 0,821 \cdot 28} = 0,111 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

$$g_{а1} = \frac{x_{а1} \cdot M_{а}}{x_{м1} \cdot M_{м} + x_{к1} \cdot M_{к} + x_{в1} \cdot M_{в} + x_{а1} \cdot M_{а}}$$

$$= \frac{0,801 \cdot 28}{0,078 \cdot 32 + 0,100 \cdot 32 + 0,001 \cdot 18 + 0,821 \cdot 28} = 0,801 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

$$g_{в1} = \frac{x_{в1} \cdot M_{в}}{x_{м1} \cdot M_{м} + x_{к1} \cdot M_{к} + x_{в1} \cdot M_{в} + x_{а1} \cdot M_{а}}$$

$$= \frac{0,001 \cdot 18}{0,078 \cdot 32 + 0,100 \cdot 32 + 0,001 \cdot 18 + 0,821 \cdot 28} = 0,001 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

В таблице 4 представлена сводка по расчётам теплоёмкостей, объёмных и массовых долей компонентов исходной смеси.

Таблица 4 – Изобарные теплоёмкости, объёмные и массовые доли компонентов исходной смеси

Компонент смеси	Изобарная теплоёмкость (Cp), Дж/кг·°C	Объёмная доля компонента смеси (x1), %	Массовая доля компонента смеси (g1), %
метанол	1039	7,8	8,70
кислород	909	10	11,10
вода (пары)	1109	0,1	0,1
азот	1848	82,1	80,1

Рассчитаем тепловые ёмкости продуктов реакции (формальдегида, монооксида углерода и диметилового эфира):

$$Cp_{ф} = \frac{7 \cdot R \cdot 1000}{2 \cdot M_{ф}} = \frac{4 \cdot 8,314 \cdot 1000}{30} = 1109 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$$

$$Cp_{оу} = \frac{7 \cdot R \cdot 1000}{2 \cdot M_{оу}} = \frac{7 \cdot 8,314 \cdot 1000}{2 \cdot 28} = 1039 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$$

$$Cp_{мэ} = \frac{7 \cdot R \cdot 1000}{2 \cdot M_{мэ}} = \frac{7 \cdot 8,314 \cdot 1000}{2 \cdot 34} = 856 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}$$

Определим массовые доли компонентов прореагировавшей смеси, так как скорость химического процесса достаточно высокая [7] и большая часть

Инва. № подл. Подп. и дата
Инва. № дубл. Подп. и дата
Взам. инв. №
Инва. № подл. Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

34

превращения происходит на начальном участке трубы, будем считать, что соотношение компонентов в реакционном пространстве трубки аппарата совпадает с конечным

$$g_{M2} = g_{M1}(1 - \chi) = 0,001 \frac{\text{КГ}}{\text{КГ}}$$

$$g_{\phi 2} = \frac{x_{M1} \cdot \chi \cdot n_{\phi} \cdot M_{\phi}}{x_{M1} \cdot M_M + x_{K1} \cdot M_K + x_{B1} \cdot M_B + x_{a1} \cdot M_a}$$

$$= \frac{0,078 \cdot 0,99 \cdot 0,867 \cdot 30}{0,078 \cdot 32 + 0,100 \cdot 32 + 0,001 \cdot 18 + 0,821 \cdot 28} = 0,070 \frac{\text{КГ}}{\text{КГ}}$$

$$g_{B2} = \frac{x_{B1} \cdot M_B + x_{M1} \cdot \chi \cdot n_B \cdot M_B}{x_{M1} \cdot M_M + x_{K1} \cdot M_K + x_{B1} \cdot M_B + x_{a1} \cdot M_a}$$

$$= \frac{0,001 \cdot 18 - 0,078 \cdot 0,99 \cdot 0,58 \cdot 32}{0,078 \cdot 32 + 0,100 \cdot 32 + 0,001 \cdot 18 + 0,821 \cdot 28} = 0,029 \frac{\text{КГ}}{\text{КГ}}$$

$$g_{oy2} = \frac{x_{M1} \cdot \chi \cdot n_{oy} \cdot M_{oy}}{x_{M1} \cdot M_M + x_{K1} \cdot M_K + x_{B1} \cdot M_B + x_{a1} \cdot M_a}$$

$$= \frac{0,078 \cdot 0,99 \cdot 0,043 \cdot 28}{0,078 \cdot 32 + 0,100 \cdot 32 + 0,001 \cdot 18 + 0,821 \cdot 28} = 0,003 \frac{\text{КГ}}{\text{КГ}}$$

$$g_{K2} = \frac{x_K \cdot M_K - x_M \cdot \chi \cdot n_K \cdot M_K}{x_M \cdot M_M + x_K \cdot M_K + x_B \cdot M_B + x_a \cdot M_a}$$

$$= \frac{0,100 \cdot 32 - 0,078 \cdot 0,99 \cdot 0,5 \cdot 32}{0,078 \cdot 32 + 0,100 \cdot 32 + 0,001 \cdot 18 + 0,821 \cdot 28} = 0,068 \frac{\text{КГ}}{\text{КГ}}$$

$$g_{MЭ2} = \frac{x_{M1} \cdot \chi \cdot n_{MЭ} \cdot M_{MЭ}}{x_{M1} \cdot M_M + x_{K1} \cdot M_K + x_{B1} \cdot M_B + x_{a1} \cdot M_a}$$

$$= \frac{0,078 \cdot 0,99 \cdot 0,043 \cdot 34}{0,078 \cdot 32 + 0,100 \cdot 32 + 0,001 \cdot 18 + 0,821 \cdot 28} = 0,001 \frac{\text{КГ}}{\text{КГ}}$$

$$g_{a2} = 0,801 \frac{\text{КГ}}{\text{КГ}}$$

В таблице 5 представлена сводка расчётов массовых долей компонентов смеси.

Инд. № подл.	Подп. и дата
Инд. № дубл.	
Взам. инв. №	
Инд. № подл.	
Подп. и дата	
Инд. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Таблица 5 – Объёмные и массовые доли основных газообразных продуктов реакции

Компонент смеси	Изобарная теплоёмкость (Ср), Дж/кг·°С	Объёмная доля компонента смеси (x2), %	Массовая доля компонента смеси (g2), %
метанол	1039	0,1	0,1
формальдегид	1109	6,7	7,0
кислород	909	6,1	6,8
Вода (пары)	1848	4,6	2,9
азот	1039	82,1	80,1
оксид углерода	1039	0,3	0,3
диметиловый эфир	856	0,1	0,1
побочный конденсированный продукт	-	0	2,7

2.4 Материальный баланс

В трубчатом и межтрубном пространстве имеются две зоны теплообмена: в трубном пространстве – зона подогрева исходной смеси (1') и зона химической реакции (2'), в межтрубном пространстве – паровое пространство (1) и пространство жидкой ДФС (2) (Рисунок 7).

Инв. № подл.	Подп. и дата				
	Взам. инв. №				
	Инв. № дубл.				
	Подп. и дата				
<p>ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ</p>					
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
					36

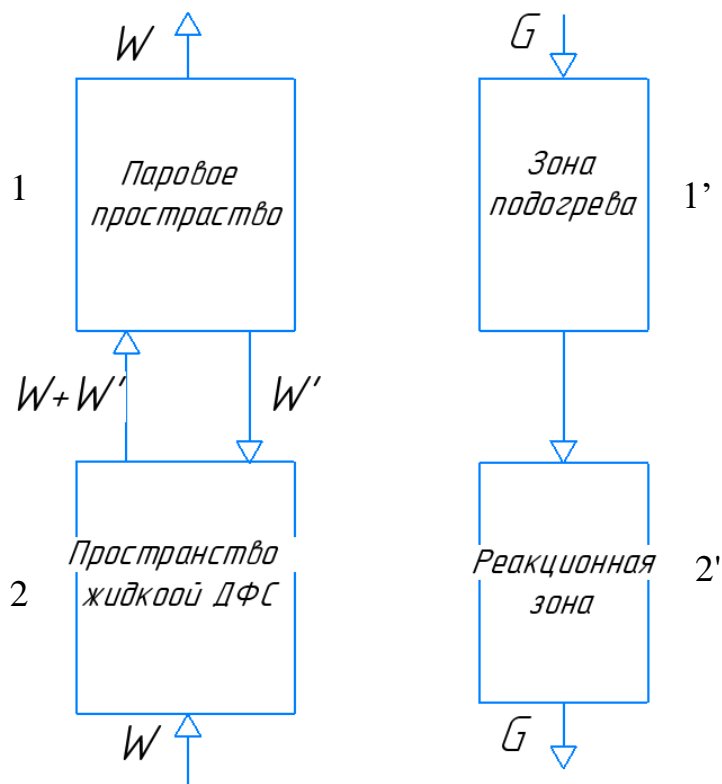


Рисунок 7 – Материальные потоки

Определим количество паров ДФС, конденсирующихся в процессе нагрева исходной смеси.

Пространство жидкой ДФС предназначено для охлаждения реакционной смеси, в паровом пространстве происходит конденсация паров, с целью подогрева реакционной смеси.

Производительность установки по формалину (G) с концентрацией 37% мас. составляет 40 тыс. тонн в год, тогда производительность установки по формальдегиду составит:

$$G_{\phi} = G \cdot 0,37 = 14,80 \frac{\text{ТЫС. ТОНН}}{\text{ГОД}}$$

Годовая потребность в метаноле:

$$G_{\text{м}} = \frac{G_{\phi}}{n_{\phi}} = 17,07 \frac{\text{ТЫС. ТОНН}}{\text{ГОД}}$$

Годовая производительность по общей смеси газов, проходящих через реакционное пространство:

$$G_{\text{общ}} = \frac{G_{\phi}}{g_{\phi 2}} = 211,45 \frac{\text{ТЫС. ТОНН}}{\text{ГОД}}$$

Подп. и дата
Взам. инв. №
Инв. № дубл.
Подп. и дата
Инв. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Часовая производительность по общей смеси газов:

$$G_{\text{общ,ч}} = \frac{G_{\text{общ}}}{yr \cdot 24} = \frac{2,11 \cdot 10^8}{350 \cdot 24} = 25173 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

В таблице 6 приведён общий материальный баланс реактора по реакционному пространству.

Таблица 6 – Общий материальный баланс по реакционному пространству

Компонент реакционной смеси	Входит в реакционное пространство, кг/ч	Выходит из реакционного пространства, кг/ч
Метанол	2031,74	1,77
Формальдегид	0	1761,90
Кислород	2806,51	1722,92
Азот	20161,29	20161,29
Вода	15,79	722,50
Оксид углерода	0	80,88
Диметиловый эфир	0	26,89
Побочный конденсированный продукт	-	537,18

Определим количество паров ДФС, необходимое для нагрева исходной смеси газов.

Изменение энтальпии смеси газов при нагреве [20]:

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{см.н}} &= (g_{\text{м1}} C_{p\text{м}} + g_{\text{к1}} C_{p\text{к}} + g_{\text{в1}} C_{p\text{в}} + g_{\text{а1}} C_{p\text{а}}) \cdot (t_1 - t_0) \\ &= (0,087 \cdot 1039 + 0,111 \cdot 909 + 0,001 \cdot 1109 + 0,801 \cdot 1848) \\ &\quad \cdot (220 - 150) = 7,177 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \end{aligned}$$

Примем тепловые потери 4% и влажность пара – 3%

$$W' \cdot 0,96 \cdot 0,97 \cdot r = G_{\text{ч}} \cdot \Delta I_{\text{см.н}}$$

Расход паров ДФС на нагрев исходной смеси:

$$W' = \frac{G_{\text{ч}} \cdot \Delta I_{\text{см.н}}}{0,96 \cdot 0,97 \cdot r \cdot 1000} = \frac{2517 \cdot 7,177 \cdot 10^{-4}}{0,96 \cdot 0,97 \cdot 2,944 \cdot 10^5 \cdot 1000} = 6,59 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

Ивл. № подл. Подл. и дата
Ивл. № дубл. Ивл. № инв. № Взам. инв. № Подл. и дата
Ивл. № подл. Подл. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

38

Далее необходимо найти количество ДФС, которое необходимо для отвода тепла химической реакции, для этого нужно определить суммарный тепловой эффект от химических превращений.

Тепловой эффект реакции конверсии метанола [7]:

$$\Delta H_1 = 1,59 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль}}$$

Тепловой эффект побочной реакции с участием формальдегида [7]:

$$\Delta H_2 = 2,30 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль}}$$

Степень конверсии метанола:

$$\chi = 0,99$$

Тепло, выделяющееся в ходе целевой реакции:

$$\Delta H_{1.1} = G_{\text{ч}} \cdot g_{\text{м.н.}} \cdot \chi \cdot \frac{\Delta H_1}{M_{\text{к}}} = 2517 \cdot 0,087 \cdot 0,99 \cdot \frac{1,59 \cdot 10^8}{32} = 1,077 \cdot 10^{10} \frac{\text{Дж}}{\text{ч}}$$

Тепло, выделяющееся в ходе побочной реакции:

$$\Delta H_{2.1} = G_{\text{ч}} \cdot g_{\text{оу.к.}} \cdot \frac{\Delta H_2}{M_{\text{оу}}} = 2517 \cdot 0,003 \cdot \frac{2,30 \cdot 10^8}{32} = 4,593 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{ч}}$$

Тепло, выделяющееся в ходе всего химического процесса:

$$\Delta H = \Delta H_{1.1} + \Delta H_{2.1} = (107,7 + 4,6) \cdot 10^8 = 112,3 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{ч}}$$

Количество ДФС, которое необходимо испарить для отвода тепла химического процесса:

$$W + W' = \frac{\Delta H}{0,96 \cdot r \cdot 1000} = \frac{112,3 \cdot 10^8}{0,96 \cdot 2,94410^5 \cdot 1000} = 39,73 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

С учётом того, что часть испарившихся паров пространства, заполненного жидкостью, конденсируется и снова возвращается в это пространство, расход ДФС:

$$W = 39,73 - 6,59 = 33,14 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

2.5 Тепловой расчёт аппарата

Под тепловым расчётом подразумевается расчёт коэффициентов теплопередачи пары ДФС – исходная спиртогазовая смесь (паровое

Инва. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата	Инва. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

39

пространство – зона подогрева) и смесь продуктов реакции – жидкая ДФС (зона реакции – пространство жидкой ДФС).

Расчёт коэффициента теплопередачи проведём с учётом коэффициентов сопротивления загрязнений и теплопроводности стенки трубок аппарата [20]:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_{\text{тр}}} + \frac{2 \cdot \delta_{\text{отл}}}{\lambda_{\text{загр}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{м.тр}}}$$

Для определения коэффициента теплопередачи необходимо рассчитать коэффициенты теплоотдачи среды со стороны труб и межтрубного пространства, которые рассчитываются из расчёта критерия Нуссельта [20]:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_3}{\alpha}$$

Для проведения теплового расчёта аппарата необходимо выяснить значение движущей силы (разности температур), гидродинамические режимы движения теплоносителей в трубном и межтрубном пространстве и коэффициенты теплоотдачи

2.5.1 Определение движущей силы процесса теплопередачи

Так как количество вырабатываемого пара значительно превышает количество конденсируемого пара, целесообразно задаться противотоком теплоносителей.

Расчитаем среднюю разность температур для процесса нагрева исходной смеси [20]:

$$\Delta t_6 = t_{\text{кип.дфс}} - t_0 = 257 - 150 = 107 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = t_{\text{кип.дфс}} - t_1 = 257 - 220 = 37 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{ср1}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}\right)} = \frac{107 - 37}{\ln\left(\frac{107}{37}\right)} = 65,92 \text{ }^\circ\text{C}$$

Температурный профиль в зоне реакции достаточно сложен, поэтому для расчёта средней движущей силы возьмём ряд экспериментальных точек.

Была взята четырнадцать экспериментальных точек [10] из температурного профиля трубы (Рисунок 8), расположенных на равном

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ	Лист
											40

расстоянии друг от друга, начиная с точки $t=220^{\circ}\text{C}$, которая соответствует окончанию процессу нагрева и началу химического процесса, и заканчивая в конечной точке температурного профиля.

Длина
трубы

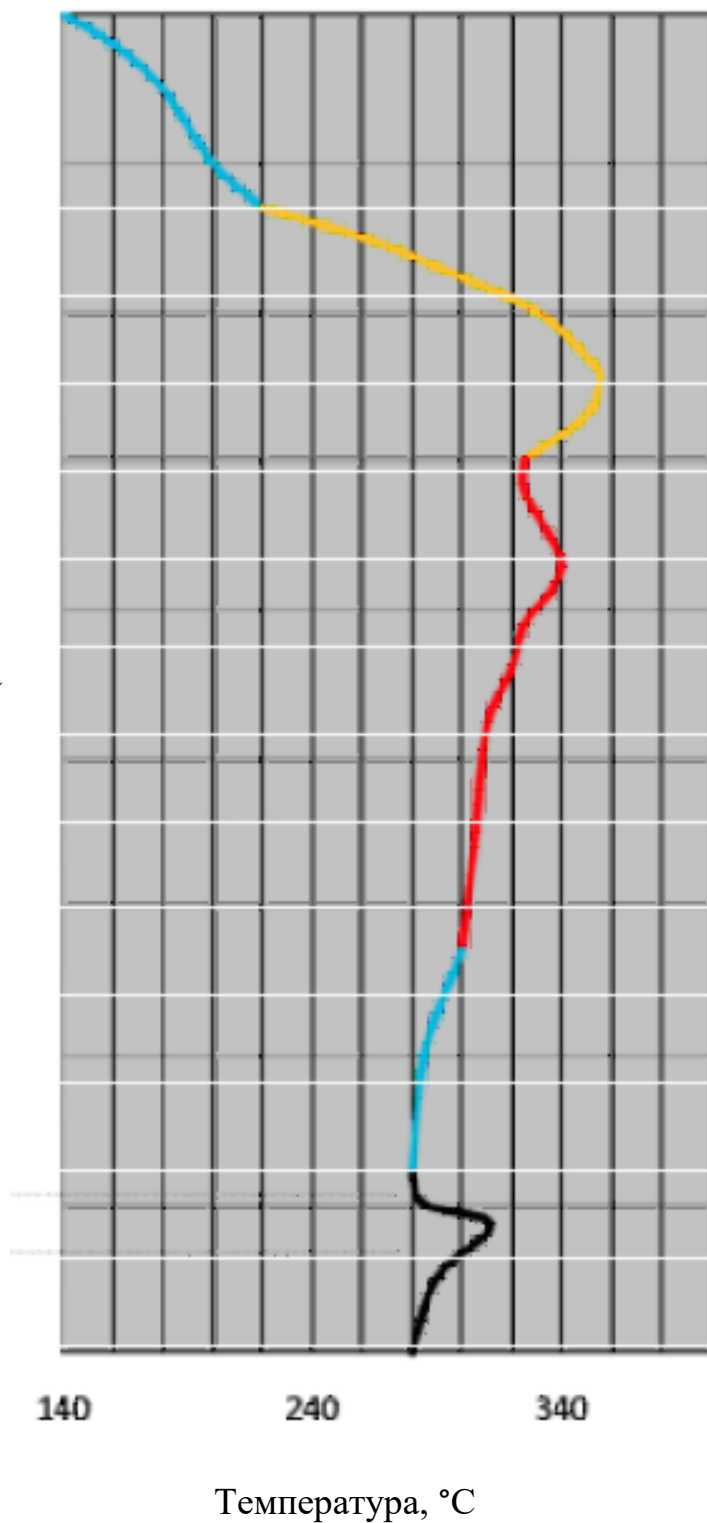


Рисунок 8 – Температурный профиль [10]

Массив экспериментальных точек представлен таблице 7.

Инва. № подл.	Подл. и дата	Инва. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Таблица 7 – Точки температурного профиля

№ т-ки.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
t _{при}	220	316	358	326	340	323	309	306	302	291	282	280	301	280

Среднюю температуру реакционной смеси в зоне реакции вычислим как среднее арифметическое из взятых экспериментальных точек:

$$t_{\text{ср.2}} = \frac{\sum_{n=1}^{14} t_{\text{при}}}{14}$$

$$= (220 + 316 + 358 + 326 + 340 + 323 + 309 + 306 + 302 + 291 + 280 + 301 + 280)/14 = 302,43^{\circ}\text{C}$$

Средняя разность температур теплоносителей в зоне реакции:

$$\Delta t_{\text{ср.2}} = t_{\text{ср.2}} - t_{\text{кип.дфс}} = 302,43 - 257 = 45,43^{\circ}\text{C}$$

Средняя температура в зоне подогрева реакционной смеси:

$$t_{\text{ср.1}} = \frac{t_1 + t_0}{2} = \frac{220 + 150}{2} = 185^{\circ}\text{C}$$

2.5.2 Гидродинамический режим движения газов в трубном пространстве

Плотность исходной смеси:

$$\rho_{\text{см.1}} = \frac{T_0 \cdot (P_0 + P_{\text{изб.тр}})}{(T_0 + t_{\text{ср.1}}) \cdot P_0 \cdot V_m \cdot \left(\frac{g_{\text{M1}}}{M_{\text{M}}} + \frac{g_{\text{K1}}}{M_{\text{K}}} + \frac{g_{\text{a1}}}{M_{\text{a}}} + \frac{g_{\text{B1}}}{M_{\text{B}}} \right)}$$

$$= (273 \cdot (1,013 + 0,025)) / ((273 + 185) \cdot 1,013 \cdot 22,4 \cdot \left(\frac{0,087}{32} + \frac{0,0111}{32} + \frac{0,801}{28} + \frac{0,001}{18} \right)) = 0,952 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Взам. инв. №
Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Плотность исходной смеси реакционного пространства, учитывая, что превращение происходит по большей части происходит в начальном отрезке зоны:

$$\rho_{см.2'} = \frac{T_0 \cdot (P_0 + P_{изб.тр})}{(T_0 + t_{ср.2}) \cdot P_0 \cdot V_m \cdot \left(\frac{g_{M2}}{M_M} + \frac{g_{K2}}{M_K} + \frac{g_{a2}}{M_a} + \frac{g_{\phi 2}}{M_{\phi}} + \frac{g_{MЭ2}}{M_{MЭ}} + \frac{g_{Oy2}}{M_{Oy}} + \frac{g_{B2}}{M_B} \right)}$$

$$= \frac{273 \cdot (1,013 + 0,025)}{(273 + 302,43) \cdot 1,013 \cdot 22,4 \cdot \left(\frac{0,001}{32} + \frac{0,068}{32} + \frac{0,81}{28} + \frac{0,07}{30} + \frac{0,001}{34} + \frac{0,003}{28} + \frac{0,029}{18} \right)}$$

$$= 0,758 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\rho_{см.ср} = \frac{\rho_{см.1'} + \rho_{см.2'}}{2} = \frac{0,952 + 0,758}{2} = 0,844 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Скорость течения смеси в трубках:

$$\omega_{тр} = \frac{4 \cdot G \cdot \rho_{см.ср}}{3600 \cdot d_3^2 \cdot \pi \cdot n_{тр}} = \frac{4 \cdot 2517 \cdot 0,855}{3600 \cdot 0,016^2 \cdot \pi \cdot 1892} = 21,51 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

По [20] были определены динамические вязкости компонентов исходной смеси (Таблица 8)

Таблица 8 - Динамическая вязкость газов в зоне подогрева [20] при температуре $t_{ср.1}$

Газ	Динамическая вязкость, мПа · с
Кислород ($\mu_{к1}$)	0,028
Азот (μ_{a1})	0,025
водяной пар ($\mu_{в1}$)	0,015
Метанол ($\mu_{м1}$)	0,013

По [20] были определены динамические вязкости компонентов смеси продуктов реакции (Таблица 9)

Подп. и дата
 Взам. инв. №
 Инв. № дубл.
 Подп. и дата
 Инв. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

43

Таблица 9 - Динамическая вязкость газов в зоне реакции [20] при температуре $t_{ср.2}$

Газ (обозначение дин. вяз-ти газа)	Динамическая вязкость, мПа · с
Кислород ($\mu_{к2}$)	0,028
Азот ($\mu_{а2}$)	0,029
водяной пар($\mu_{в2}$)	0,019
Метанол ($\mu_{м2}$)	0,019
Угарный газ ($\mu_{уг2}$)	0,029
Пары формальдегида ($\mu_{ф2}$)	0,014
Пары диметилового эфира ($\mu_{мэ2}$)	0,020

Критическая температура для водяных паров, азота, кислорода, метанола, диметилового эфира, формальдегида и угарного газа соответственно представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Критические температуры газов смеси [20]

Газ (обозначение)	Критическая температура, К
Кислород ($T_{к.кр}$)	154
Азот ($T_{а.кр}$)	126
водяной пар($T_{в.кр}$)	647
Метанол ($T_{м.кр}$)	513
Угарный газ ($T_{уг.кр}$)	190
Формальдегид ($T_{ф.кр}$)	413
Диметиловый эфир ($T_{мэ.кр}$)	400

Динамическая вязкость смеси в зоне подогрева [20]:

$$\mu_{см1} = \frac{x_{м1}\mu_{м1}\sqrt{M_{м}T_{м.кр}} + x_{в1}\mu_{в1}\sqrt{M_{в}T_{в.кр}} + x_{а1}\mu_{а1}\sqrt{M_{а}T_{а.кр}} + x_{к1}\mu_{к1}\sqrt{M_{к}T_{к.кр}}}{x_{м1}\sqrt{M_{м}T_{м.кр}} + x_{в1}\sqrt{M_{в}T_{в.кр}} + x_{а1}\sqrt{M_{а}T_{а.кр}} + x_{к1}\sqrt{M_{к}T_{к.кр}}}$$

$$= (0,078 \cdot 0,013 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{32 \cdot 513} + 0,001 \cdot 0,015 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{18 \cdot 647} + 0,821 \cdot 0,025 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{28 \cdot 126} + 0,100 \cdot 0,028 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{32 \cdot 154}) / (0,078 \cdot \sqrt{32 \cdot 513} + 0,001 \cdot \sqrt{18 \cdot 647} + 0,821 \cdot \sqrt{28 \cdot 126} + 0,100 \cdot \sqrt{32 \cdot 154})$$

$$= 0,024 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с} = 0,024 \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

Инва. № дубл. Подп. и дата
Инва. № инв. № Подп. и дата
Инва. № подл. Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

44

Динамическая вязкость смеси в зоне реакции [20]:

$$\begin{aligned} \mu_{см2} &= (x_{м2}\mu_{м2}\sqrt{M_{м}T_{м,кр}} + x_{в2}\mu_{в2}\sqrt{M_{в}T_{в,кр}} + x_{а2}\mu_{а2}\sqrt{M_{а}T_{а,кр}} + x_{к2}\mu_{к2}\sqrt{M_{к}T_{к,кр}} + x_{уг2}\mu_{уг2}\sqrt{M_{уг}T_{уг,кр}} + x_{ф2}\mu_{ф2}\sqrt{M_{ф}T_{ф,кр}} \\ &+ x_{мэ2}\mu_{мэ2}\sqrt{M_{мэ}T_{к,кр}})/(x_{м2}\sqrt{M_{м}T_{м,кр}} + x_{в2}\sqrt{M_{в}T_{в,кр}} + x_{а2}\sqrt{M_{а}T_{а,кр}} + x_{к2}\sqrt{M_{к}T_{к,кр}} + x_{уг2}\sqrt{M_{уг}T_{уг,кр}} + x_{ф2}\sqrt{M_{ф}T_{ф,кр}} \\ &+ x_{мэ2}\sqrt{M_{мэ}T_{к,кр}}) = \\ &= (0,001 \cdot 0,019 \cdot 10^{-3} \sqrt{32 \cdot 513} + 0,046 \cdot 0,019 \cdot 10^{-3} \sqrt{18 \cdot 647} + 0,821 \cdot 0,029 \cdot 10^{-3} \sqrt{28 \cdot 126} + 0,061 \cdot 0,028 \\ &\cdot 10^{-3} \sqrt{32 \cdot 154} + 0,003 \cdot 0,029 \cdot 10^{-3} \sqrt{28 \cdot 190} + 0,067 \cdot 0,014 \cdot 10^{-3} \sqrt{30 \cdot 413} + 0,001 \cdot 0,020 \cdot 10^{-3} \sqrt{34 \cdot 400}) / (0,001 \\ &\cdot \sqrt{32 \cdot 513} + 0,046 \cdot \sqrt{18 \cdot 647} + 0,821 \cdot \sqrt{28 \cdot 126} + 0,061 \cdot \sqrt{32 \cdot 154} + 0,003 \cdot \sqrt{28 \cdot 190} + 0,067 \cdot \sqrt{M_{ф}T_{ф,кр}} + 0,001 \\ &\cdot \sqrt{34 \cdot 400}) = 0,030 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с} = 0,030 \text{ мПа} \cdot \text{с} \end{aligned}$$

Среднее значение динамической вязкости:

$$\mu_{см.ср} = \frac{\mu_{см2} + \mu_{см1}}{2} = \frac{0,030 + 0,024}{2} = 0,027 \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

Критерий Рейнольдса для трубного пространства:

$$Re_{тр} = \frac{\omega_{тр} d_{э} \rho_{см.ср}}{\mu_{см.ср}} = \frac{21,14 \cdot 0,016 \cdot 0,855}{0,026 \cdot 10^{-3}} = 10868$$

2.5.3 Расчёт коэффициента теплоотдачи из зоны подогрева

Теплопроводность для смеси газов исходной смеси можно вычислить по следующей расчётной формуле [20]:

$$\lambda_1 = V_1 C_{V_{см1}} \mu_{см1}$$

Изохорная теплоёмкость метанола, кислорода, азота, угарного газа, формальдегида, диметилового эфира и паров воды (соответственно) [24]:

$$C_{V_{м}} = \frac{6}{2} \cdot \frac{R \cdot 1000}{M_{м}} = \frac{6}{2} \cdot \frac{8,314 \cdot 1000}{30} = 779 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$C_{V_{к}} = \frac{5}{2} \cdot \frac{R \cdot 1000}{M_{к}} = \frac{5}{2} \cdot \frac{8,314 \cdot 1000}{32} = 650 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$C_{V_{а}} = \frac{5}{2} \cdot \frac{R \cdot 1000}{M_{а}} = \frac{5}{2} \cdot \frac{8,314 \cdot 1000}{28} = 742 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$C_{V_{в}} = \frac{6}{2} \cdot \frac{R \cdot 1000}{M_{в}} = \frac{6}{2} \cdot \frac{8,314 \cdot 1000}{18} = 1386 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Изобарная теплоёмкость смеси в зоне подогрева:

$$C_{p_{см1}} = g_{м1} C_{p_{м}} + g_{к1} C_{p_{к}} + g_{а1} C_{p_{а}} + g_{в1} C_{p_{в}} = 1025 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Теплопроводность в зоне подогрева:

$$k_1 = \frac{C_{p_{cm1}}}{C_{v_{cm1}}} = \frac{1026}{736} = 1,394$$

Коэффициент В:

$$B_1 = 0,25 \cdot (9 \cdot k_1 - 5) = 0,25 \cdot (9 \cdot 1,394 - 5) = 1,886$$

Теплопроводность в зоне подогрева:

$$\lambda_1 = B_1 C_{v_{cm1}} \mu_{cm1} = 1,886 \cdot 736 \cdot 0,024 \cdot 10^{-3} = 0,033 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Критерий Прандтля для зоны подогрева:

$$Pr_1 = C_{p_{cm1}} \frac{\mu_{cm1}}{\lambda_1} = 1026 \frac{0,024 \cdot 10^{-3}}{0,033} = 0,74$$

Критерии Нуссельта для трубчатого каталитического реактора для зоны подогрева [25]:

$$Nu_1 = \frac{\lambda_k}{\lambda_1} + 0,09 Re_{tr}^{0,8} Pr_1^{0,4} = \frac{2,7}{0,033} + 0,09 \cdot 11041^{0,8} \cdot 0,74 = 217,74$$

Коэффициенты теплоотдачи для зоны подогрева [20]:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_3} = \frac{219,08 \cdot 0,033}{0,016} = 441,84 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

2.5.4 Расчёт коэффициента теплоотдачи из реакционной зоны трубного пространства

Вычислим теплопроводность смеси продуктов превращения по формуле:

$$\lambda_2 = B_2 C_{v_{cm2}} \mu_{cm2}$$

Рассчитаем изохорную теплоёмкость для продуктов реакции

$$C_{v_{oy}} = \frac{5}{2} \cdot \frac{R \cdot 1000}{M_{yг}} = \frac{5}{2} \cdot \frac{8,314 \cdot 1000}{28} = 742 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$C_{v_{\phi}} = \frac{6}{2} \cdot \frac{R \cdot 1000}{M_{\phi}} = \frac{6}{2} \cdot \frac{8,314 \cdot 1000}{30} = 831 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$C_{v_{m3}} = \frac{6}{2} \cdot \frac{R \cdot 1000}{M_{m3}} = \frac{6}{2} \cdot \frac{8,314 \cdot 1000}{34} = 734 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ	Лист
											46

Изохорная теплоёмкость смеси в зоне реакции:

$$\begin{aligned}Cv_{см2} &= g_{a2}Cv_a + g_{ф2}Cv_ф + g_{м2}Cv_м + g_{к2}Cv_к + g_{a2}Cv_a + g_{в2}Cv_в + g_{мэ2}Cv_{мэ} \\ &+ g_{оу.к.} \cdot Cv_{оу} \\ &= 0,801 \cdot 650 + 0,07 \cdot 831 + 0,001 \cdot 779 + 0,068 \cdot 779 + 0,801 \cdot 742 \\ &+ 0,029 \cdot 1386 + 0,001 \cdot 734 + 0,003 \cdot 742 = 741 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\end{aligned}$$

Изобарная теплоёмкость смеси в зоне подогрева:

$$\begin{aligned}Cp_{см2} &= g_{a2}Cp_a + g_{ф2}Cp_ф + g_{м2}Cp_м + g_{к2}Cp_к + g_{a2}Cp_a + g_{в2}Cp_в + g_{мэ2}Cp_{мэ} = \\ &= 1030 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\end{aligned}$$

Теплопроводность смеси в зоне подогрева:

$$\lambda_2 = B_2 Cv_{см2} \mu_{см2}$$

Показатели адиабаты в зоне подогрева и в зоне реакции (соответственно):

$$k_2 = \frac{Cp_{см2}}{Cv_{см2}} = \frac{1030}{741} = 1,391$$

Коэффициент В:

$$B_2 = 0,25 \cdot (9 \cdot k_2 - 5) = 0,25 \cdot (9 \cdot 1,391 - 5) = 1,879$$

Теплопроводность в зоне реакции [20]:

$$\lambda_2 = B_2 Cv_{см2} \mu_{см2} = 1,879 \cdot 741 \cdot 0,029 \cdot 10^{-3} = 0,042 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Критерии Прандтля для зоны реакции:

$$Pr_2 = Cp_{см2} \frac{\mu_{см2}}{\lambda_2} = 1030 \frac{0,029 \cdot 10^{-3}}{0,040} = 0,74$$

Критерии Нуссельта для трубчатого каталитического реактора для зоны реакции [25]:

$$Nu_2 = \frac{\lambda_к}{\lambda_2} + 0,09 Re_{тр}^{0,8} Pr_2^{0,4} = \frac{2,7}{0,040} + 0,09 \cdot 11041^{0,8} \cdot 0,74 = 202,03$$

Коэффициенты теплоотдачи из зоны реакции:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_3} = \frac{206,92 \cdot 0,040}{0,016} = 528,40 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Взам. инв. №
Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

2.5.5 Расчёт коэффициентов теплоотдачи со стороны ДФС

Расчёт коэффициента теплоотдачи со стороны парового пространства
Сперва необходимо определить гидродинамический режим движения
жидкой ДФС.

Определим внутренний диаметр корпуса аппарата.

При максимальном заполнении трубной решётки (по вершинам правильных
треугольников) коэффициент заполнения и шаг размещения труб [26]:

$$k_{\text{зап}} = 0,85$$

$$t = 0,032 \text{ м}$$

Внутренний диаметр аппарата:

$$D = \sqrt{\frac{n_{\text{тр}} \cdot 4 \cdot 0,866 \cdot t^2}{k_{\text{зап}} \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{1892 \cdot 4 \cdot 0,866 \cdot 0,032^2}{0,85 \cdot \pi}} = 1,600 \text{ м}$$

Эквивалентный диаметр аппарата:

$$D_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2 \cdot n_{\text{тр}})}{\pi \cdot (D - d \cdot n_{\text{тр}})} = \frac{4 \cdot \pi \cdot (1,7^2 - 0,025^2 \cdot 2150)}{\pi \cdot (1,7 - 0,025 \cdot 2150)} = 0,113 \text{ м}$$

Основные теплофизические параметры ДФС при температуре 257°C
представлены в таблице 11.

Таблица 11 - Теплофизические параметры ДФС при температуре 257°C
[9]

Теплофизический параметр	Величина теплофизического параметра
Плотность ($\rho_{\text{ДФС}}$), кг/м ³	860
Динамическая вязкость ($\mu_{\text{ДФС}}$), мПа · с	0,276
Теплоёмкость ($C_{p\text{ДФС}}$), $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	2199
Теплопроводность ($\lambda_{\text{ДФС}}$), $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	0,104

Скорость движения ДФС:

$$\omega_{\text{ДФС}} = \frac{4 \cdot W}{\rho_{\text{ДФС}} \cdot \pi \cdot D_{\text{экв}}^2} = \frac{4 \cdot 33,14}{860 \cdot \pi \cdot 0,109^2 \cdot 3600} = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$$

Критерий Рейнольдса для пространства жидкой ДФС:

Изн. № дубл.	Изн. № инв. №	Подп. и дата
Изн. № подл.	Изн. № инв. №	Подп. и дата
Изн. № подл.	Изн. № инв. №	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

$$Re_{ж,дфс} = \frac{\omega_{дфс} D_{экв} \rho_{дфс}}{\mu_{дфс}} = \frac{1,15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,109 \cdot 860}{0,276 \cdot 10^{-3}} = 376,84$$

Таким образом, режим течения – ламинарный.

Критерий Прандтля:

$$Pr_3 = c_{p,дфс} \frac{\mu_{дфс}}{\lambda_{дфс}} = 2199 \frac{0,276 \cdot 10^{-3}}{0,104} = 5,84$$

Критерий Нуссельта для жидкой ДФС как для ламинарного режима течения теплоносителя [6]:

$$Nu = 1,61 \cdot Re \cdot Pr \cdot \left(\frac{d}{L}\right)^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_{ст}}\right)^{0,44}$$

Примем $\mu_{дфс.ст} = \mu_{дфс}$, предыдущая итерация показала, что $L \approx 1,285$ м

$$Nu_3 = 1,61 \cdot Re_{ж,дфс} \cdot Pr_3 \cdot \left(\frac{D_{экв}}{L}\right)^{0,33} = 1,61 \cdot 389,77 \cdot 5,84 \cdot \left(\frac{0,109}{1,285}\right)^{0,33} = 1586$$

Коэффициенты теплоотдачи для пространства, заполненного жидкой ДФС:

$$\alpha_3 = \frac{Nu_3 \cdot \lambda_{дфс}}{D_{экв}} = \frac{1622 \cdot 0,104}{0,109} = 1464 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Коэффициент теплоотдачи в паровом пространстве для плёночной конденсации на наружном горизонтальном пучке труб [20]:

$$\alpha_4 = 1,15 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda_{дфс}^3 \cdot \rho_{дфс}^2 \cdot g \cdot r}{\mu_{дфс} \cdot \Delta t_{ср1} \cdot (1 - 1,285)}}$$

$$= 1,15 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,104^3 \cdot 860^2 \cdot 9,81 \cdot 2,944 \cdot 10^5}{0,276 \cdot 10^{-3} \cdot 65,92 \cdot (1,510 - 1,285)}} = 1007 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

2.5.6 Расчёт коэффициентов теплопередачи

Тепловую проводимость загрязнения стенок для трубного и межтрубного пространства примем одинаковой как для отложений от паров органических жидкостей и отложений от ДФС [20]:

$$\lambda_{загр} = 2900 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Инва. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата	Инва. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Толщину отложений примем с обеих сторон:

$$\delta_{отл} = 10^{-4} \text{ м}$$

Теплопроводность стали 12Х18Н10Т (принимая в качестве материала стенки):

$$\lambda_{ст} = 19 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Толщина стенки трубки:

$$\delta_{ст} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Коэффициент теплоотдачи паровое пространство-зона подогрева:

$$K_{нагр} = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{2 \cdot \delta_{отл}}{\lambda_{загр}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_4} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{444,56} + \frac{2 \cdot 10^{-4}}{2900} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{19} + \frac{1}{1007} \right)^{-1}$$
$$= 297,43 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Коэффициент теплоотдачи паровое пространство-зона подогрева:

$$K_{ре} = \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{2 \cdot \delta_{отл}}{\lambda_{загр}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_3} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{513,05} + \frac{2 \cdot 10^{-4}}{2900} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{19} + \frac{1}{1549} \right)^{-1}$$
$$= 372,99 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

2.5.7 Расчёт поверхности теплопередачи

Поверхность теплопередачи зоны подогрева:

$$F_1 = \frac{G_{ч} \cdot \Delta t_{см.н}}{\Delta t_{ср1} \cdot K_{нагр} \cdot 3600} = \frac{2517 \cdot 7.177 \cdot 10^{-4}}{65,92 \cdot 295,62 \cdot 3600} = 25,60 \text{ м}^2$$

Поверхность теплопередачи зоны реакции:

$$F_2 = \frac{\Delta H}{\Delta t_{ср2} \cdot K_{ре} \cdot 3600} = \frac{112,3 \cdot 10^8}{45,43 \cdot 375,57 \cdot 3600} = 184,06 \text{ м}^2$$

Общая требуемая поверхность теплопередачи:

$$F_p = F_1 + F_2 = 25,60 + 184,06 = 209,66 \text{ м}^2$$

Реальная поверхность теплопередачи:

$$F_p = \pi \cdot d \cdot l \cdot n_{тр} = 3,14 \cdot 0,025 \cdot 1,51 \cdot 1927 = 224,38$$

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Изм.	Подп. и дата
Ли	Изм.
№ докум.	Подп.
Дата	

Запас поверхности теплопередачи:

$$B = \frac{F_p - F}{F} \cdot 100\% = \frac{228,53 - 208,54}{208,54} = 7\%$$

Длина трубки, погружённая в ДФС (уровень ДФС):

$$l_{\text{ж.дфс}} = l \cdot \left(1 - \frac{F_1}{F}\right) = 1,51 \cdot \left(1 - \frac{25,75}{208,54}\right) = 1,359 \text{ м}$$

2.5.8 РАСЧЁТ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Температура стенки примем такой же, как у ДФС:

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{дфс}} = 257 \text{ }^\circ\text{C}$$

Температура окружающей среды:

$$t_{\text{окр}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$$

Температура внешней поверхности изоляции:

$$t_{\text{из}} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

Средняя температура в изоляции:

$$t_{\text{из.ср}} = \frac{t_{\text{ст}} + t_{\text{из}}}{2} = \frac{257 + 40}{2} = 148,5^\circ\text{C}$$

В качестве изоляции примем плиты из минеральной ваты.

Теплопроводность изоляционного материала [27]:

$$\lambda_{\text{из}} = 0,047 + 0,00021 \cdot t_{\text{из.ср}} = 0,047 + 0,00021 \cdot 148,5 = 0,078 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Средняя скорость ветра в окрестностях Томска [28]:

$$\omega_{\text{в}} = 1,2 \text{ м/с}$$

Приблизительная формула для расчёта теплоотдачи тепловой изоляции для аппарата, находящегося на открытом воздухе:

$$\alpha_{\text{н}} = 11,6 + 7 \cdot \sqrt{\omega_{\text{в}}} = 11,6 + 7 \cdot \sqrt{1,2} = 19,27$$

Толщина тепловой изоляции [11]:

$$\delta_{\text{из}} = \frac{\lambda_{\text{из}}}{\alpha_{\text{н}}} \cdot \frac{t_{\text{ст}} - t_{\text{из}}}{t_{\text{из}} - t_{\text{окр}}} = \frac{0,078}{19,27} \cdot \frac{257 - 40}{40 - 15} = 0,035 \text{ м}$$

Инт. № подл.	Подп. и дата
Инт. № дубл.	
Взам. инв. №	
Инт. № подл.	
Подп. и дата	
Инт. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

551

2.6 Кинетика реактора

Цель кинетического расчёта: получение доказательства достаточного времени пребывания реагентов в реакторе

Согласно [17, 18], процесс окисления метанола имеет следующие кинетические закономерности:

		Размерность
$w_1 = \frac{k_1 \cdot C_M}{1 + a_1 \cdot C_M + a_2 \cdot C_B + a_3 \cdot \frac{C_\Phi}{C_K}}$	$w_2 = \frac{k_2 \cdot C_\Phi}{1 + b_1 \cdot C_M + b_2 \cdot C_B + b_3 \cdot \frac{C_\Phi}{C_K}}$	$\frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МЛ} \cdot \text{М}^2}$
$k_1 := 2.233 \cdot 10^8 \cdot \exp\left(\frac{-18500}{R \cdot T}\right)$	$k_2 := 2.053 \cdot \exp\left(\frac{-3600}{R \cdot T}\right)$	$\frac{\text{МЛ}}{\text{М}^2 \cdot \text{СЕК}}$
$a_1 := 1.205 \cdot 10^{-2} \cdot \exp\left(\frac{5700}{R \cdot T}\right)$	$b_1 := 1.186 \cdot 10^{-9} \cdot \exp\left(\frac{20500}{R \cdot T}\right)$	$\frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Л}}$
$a_2 := 4.790 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(\frac{8800}{R \cdot T}\right)$	$b_2 := 4.456 \cdot 10^{-4} \cdot \exp\left(\frac{8300}{R \cdot T}\right)$	$\frac{\text{МОЛЬ}}{\text{Л}}$
$a_3 := 1.116 \cdot 10^5 \cdot e^{\frac{-11200}{R \cdot T}}$	$b_3 := 4.191 \cdot 10^2 \cdot e^{\frac{-6100}{R \cdot T}}$	-

где w_1 – скорость реакции окисления метанола в формальдегид $\frac{\text{ММОЛЬ}}{\text{МЛ} \cdot \text{М}^2}$; w_2 – скорость реакции окисления метанола в монооксид углерода $\frac{\text{ММОЛЬ}}{\text{МЛ} \cdot \text{М}^2}$; k_1, k_2 – константы скорости реакции $\frac{\text{МЛ}}{\text{М}^2 \cdot \text{СЕК}}$; b_1, b_2, b_3 – константы скорости реакции $\frac{\text{Л}}{\text{ММОЛЬ}}$; b_3 – константа скорости реакции (не имеет размерности).

Согласно закономерностям, приведённым выше был проведён кинетический расчёт реактора (Приложение 1).

Физикохимические характеристики веществ были взяты из технологического расчёта проведённого выше.

В модели также учитывается степень разбавления каталитически активных колец инертными керамическими кольцами. Была использована методика загрузки, при которой верхние 0,3 м занимает инертный материал, затем с 0,3 до 0,6 м сверху располагается слой наполовину заполненный катализатором, с 0,6

Инва. № подл.	
Подл. и дата	
Инва. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Инва. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

52

до 1,25 располагается насадка чистого катализатора, далее следует только инертный материал.

На рисунке 9 (ниже) представлена зависимость степени конверсии метанола от длины реакционной трубки в стационарном режиме.

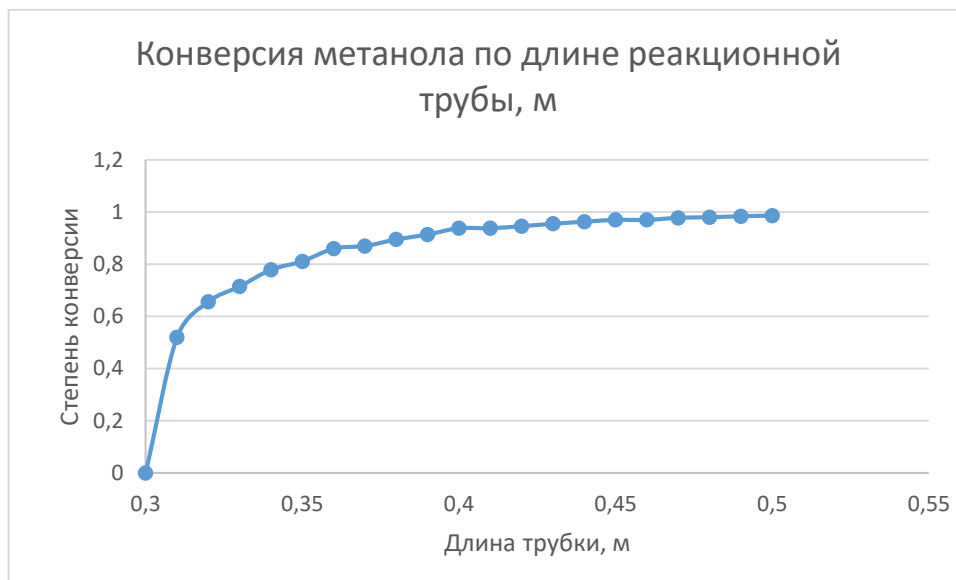


Рисунок 9 – Степень конверсии метанола в реакторе при стационарном режиме

Расчёт показал, что конверсия степенью 99,9% происходит к пройденному газом пути равному 0,52 м.

Таким образом время пребывания в реакторе достаточно для полной конверсии метанола.

2.7 Гидравлический расчёт реактора [20]

Для подбора насоса, перекачивающего ДФС в межтрубное пространство, и определения гидравлического сопротивления слоя катализатора в трубках был проведён гидравлический расчёт

2.7.1 Гидравлический расчёт трубного пространства

Абсолютная шероховатость труб:

$$\Delta = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Относительная шероховатость:

$$e = \frac{\Delta}{d_9} = 0,037$$

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Сопротивление трения в трубах:

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,11 \cdot \left(e + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(0,037 + \frac{68}{11041} \right)^{0,25} = 0,075$$

Местные коэффициенты сопротивления:

Выход и вход теплоносителей из крышки и днища: $\xi_1 = 1,5$;

Выход и вход теплоносителей из трубок: $\xi_2 = 1$.

Суммарные местные коэффициенты сопротивления:

$$\sum \xi = (\xi_1 + \xi_2) \cdot 2 = (1,5 + 1) \cdot 2 = 5$$

Доля свободного объёма:

$$\varepsilon_{\text{св}} = \frac{4 \cdot V_{\text{св}}}{\pi \cdot l \cdot d_{\text{int}}^2} = \frac{4 \cdot 3,07 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 1,51 \cdot 0,021^2} = 0,588$$

Поверхность кольца:

$$\begin{aligned} F_{\text{к}} &= h_{\text{к}} \cdot \pi \cdot (d_{\text{к}} + d_{\text{кв}}) + \frac{\pi}{4} \cdot (d_{\text{к}}^2 - d_{\text{кв}}^2) \\ &= 4,5 \cdot \pi \cdot (4,5 + 2) + \frac{3,14}{4} \cdot (4,5^2 - 2^2) \cdot 10^{-6} = 1,047 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \end{aligned}$$

Приведённый диаметр частицы:

$$d_{\text{пр}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{\text{к}}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 5,74 \cdot 10^{-8}}{3,14}} = 4,787 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Поверхность сферической частицы со схожим объёмом:

$$F_{\text{ш}} = 4 \cdot \pi \cdot d_{\text{пр}}^2 = 4 \cdot \pi \cdot (4,787 \cdot 10^{-3})^2 = 2,88 \cdot 10^{-4}$$

Коэффициент формы:

$$\Phi = \frac{F_{\text{ш}}}{F_{\text{к}}} = \frac{2,88 \cdot 10^{-4}}{1,047 \cdot 10^{-4}} = 2,75$$

Коэффициент сопротивления зернистого слоя:

$$\lambda_{\text{зс}} = 1,26$$

Потеря давления на зернистый слой [6]:

$$\Delta P_{\text{з.сл.}} = \frac{3}{4} \cdot \lambda_{\text{зс}} \cdot \frac{l \cdot \rho_{\text{см.ср}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{св}}) \cdot \omega_{\text{тр}}^2}{\Phi \cdot d_{\text{пр}} \cdot \varepsilon_{\text{св}}^3}$$

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ	Лист
											54

Потеря сопротивления в трубах [20]:

$$\Delta P = \left(\lambda_{\text{тр}} \cdot \frac{1}{d_3} + \sum \xi \right) \cdot \frac{\rho_{\text{см.ср}} \cdot \omega_{\text{тр}}^2}{2}$$

Общая потеря давления:

$$\Delta P_{\text{п}} = \left(\lambda_{\text{тр}} \cdot \frac{1}{d_3} + \sum \xi + \frac{6}{4} \cdot \lambda_{\text{зс}} \cdot \frac{1 \cdot (1 - \varepsilon_{\text{св}})}{\Phi \cdot d_{\text{пр}} \cdot \varepsilon_{\text{св}}^3} \right) \cdot \frac{\rho_{\text{см.ср}} \cdot \omega_{\text{тр}}^2}{2} = \left(0,075 \cdot \frac{1}{0,016} + 5 + \frac{6}{4} \cdot 1,26 \cdot \frac{1,51 \cdot (1 - 0,588)}{2,75 \cdot 4,787 \cdot 10^{-3} \cdot 0,588^3} \right) \cdot \frac{0,855 \cdot 21,12^2}{2} = 8,51 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

Общая потеря напора:

$$H_{\text{п}} = \left(\lambda_{\text{тр}} \cdot \frac{1}{d_3} + \sum \xi + \frac{6}{4} \cdot \lambda_{\text{зс}} \cdot \frac{1 \cdot (1 - \varepsilon_{\text{св}})}{\Phi \cdot d_{\text{пр}} \cdot \varepsilon_{\text{св}}^3} \right) \cdot \frac{\omega_{\text{тр}}^2}{2} = \left(0,075 \cdot \frac{1}{0,016} + 5 + \frac{6}{4} \cdot 1,26 \cdot \frac{1,51 \cdot (1 - 0,588)}{2,75 \cdot 4,787 \cdot 10^{-3} \cdot 0,588^3} \right) \cdot \frac{21,12^2}{2} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ м}$$

Объёмный расход смеси:

$$V_{\text{см}} = \frac{d_3^2 \cdot \pi}{4} \cdot n_{\text{тр}} \cdot \omega_{\text{тр}} = \frac{0,016^2 \cdot 3,14}{4} \cdot 1927 \cdot 21,12 = 8,28 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Рассчитаем необходимую мощность двигателя. Принимаем КПД газодувки как для осевого компрессора большой мощности $\eta_{\text{г.д.}} = 0,8$, а КПД двигателя $\eta_{\text{г.дв.}} = 0,9$ [19]:

$$N_{\text{н.тр.}} = \frac{V_{\text{см}} \cdot \Delta P_{\text{п}}}{1000 \cdot \eta_{\text{г.д.}} \cdot \eta_{\text{г.дв.}}} = \frac{8,28 \cdot 8,51 \cdot 10^4}{1000 \cdot 0,8 \cdot 0,9} = 978 \text{ кВт}$$

Достаточно сложно найти газодувку такой мощности и способную прокачиваемого в каталогах предприятий. По полученной мощности двигателя, напора и объёмного расхода смеси можно сделать подходящую газодувку на заказ.

2.7.2 Гидравлический расчёт трубного пространства

Определим плотность паров ДФС

$$\text{Средний молекулярный вес ДФС [9]: } M_{\text{ДФС}} = 166 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

Плотность паров ДФС:

$$\rho_{\text{п.ДФС}} = \frac{T_0 \cdot (P_0 + P_{\text{изб.м.тр}}) \cdot M_{\text{ДФС}}}{(T_0 + t_{\text{кип.ДФС}}) \cdot P_0 \cdot V_{\text{м}}} = \frac{273 \cdot (0,1013 + 0,1) \cdot 166}{(273 + 257) \cdot 273 \cdot 22,4} = 7,585 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Инва. № дубл.	Инва. № инв. №	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата	Инва. № подл.
Ли	Изм.	№ докум.
Подп.	Дата	

Коэффициент сопротивления входа теплоносителя в межтрубное пространство:

$$\xi_3 = 1,5$$

Давление и напор, создаваемый насосом:

$$\begin{aligned} \Delta P_n &= \xi_3 \cdot \frac{\rho_{\text{ДФС}} \cdot \omega_{\text{ДФС}}^2}{2} + l_{\text{ж.ДФС}} \cdot g \cdot \rho_{\text{ДФС}} \\ &= 1,5 \cdot \frac{860 \cdot (1,15 \cdot 10^{-3})^2}{2} + 1,324 \cdot 9,81 \cdot 860 = 1,12 \cdot 10^4 \text{ Па} \end{aligned}$$

$$H_n = \xi_3 \cdot \frac{\omega_{\text{ДФС}}^2}{2} + l_{\text{ж.ДФС}} \cdot g = 1,5 \cdot \frac{(1,15 \cdot 10^{-3})^2}{2} + 1,324 \cdot 9,81 = 12,98 \text{ м}$$

Объёмный расход ДФС:

$$V_{\text{ДФС}} = \frac{W}{\rho_{\text{ДФС}} \cdot 3600} = \frac{33,14}{860 \cdot 3600} = 1,07 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

По значению напора и объёмного расхода выбираем насос марки Х2/25 (Таблица 12)

Таблица 12 – Характеристики насоса

Характеристика	Значение
Марка насоса	Х2/25
Производительность, м ³ /с	1,25 · 10 ⁻⁴
Напор, м	25
Число оборотов, с ⁻¹	50
К.П.Д. насоса (η _н)	-
Тип двигателя	АОЛ-12-2
(N _н), кВт	1,1
К.П.Д. электродвигателя (η _{н.дв.})	1

Примем К.П.Д. насоса η_н = 0,4 - наихудший, тогда требуемая мощность насоса:

$$N_{\text{н.мтр.}} = \frac{V_{\text{ДФС}} \cdot \Delta P_n}{1000 \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{н.дв.}}} = \frac{1,07 \cdot 10^{-5} \cdot 1,12 \cdot 10^4}{1000 \cdot 0,4 \cdot 1} = 2,99 \cdot 10^{-4} \text{ кВт}$$

Инва. № дубл.	Инва. № инв. №	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

56

2.7.3 Подбор штуцеров

Штуцера для подачи и отвода смеси газов в трубчатое пространство при условии, что скорость газа не превышает $\omega_{шт.тр} = 25 \text{ м/с}$ [19]:

$$d_{тр} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_q}{\pi \cdot 3600 \cdot \omega_{шт.тр} \cdot \rho_{см.ср}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 25173}{3,14 \cdot 3600 \cdot 25 \cdot 0,844}} = 0,65 \text{ м}$$

Штуцера подвода жидкой ДФС, скорость ДФС не превышает $\omega_{шт.м.тр.2} = 0,5 \text{ м/с}$ [19]:

$$d_{м.тр.2} = \sqrt{\frac{4 \cdot W}{\pi \cdot 3600 \cdot \omega_{шт.м.тр.2} \cdot \rho_{ДФС}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 33,14}{3,14 \cdot 3600 \cdot 0,1 \cdot 860}} = 5,22 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Штуцера отвода паров ДФС, скорость паров ДФС не превышает $\omega_{шт.м.тр.1} = 15 \text{ м/с}$:

$$d_{м.тр.1} = \sqrt{\frac{4 \cdot W}{\pi \cdot 3600 \cdot \omega_{шт.м.тр.1} \cdot \rho_{п.ДФС}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 33,14}{3,14 \cdot 3600 \cdot 15 \cdot 7,585}} = 0,010 \text{ м}$$

Штуцера можно выбрать с гладкими фланцами, т.к. установка работает со смесью метанола и кислорода ниже взрывоопасных концентраций. Принимаем штуцера для жидкой ДФС и для паров ДФС одинаковыми АТК 24.218.06-90 [29]. В качестве штуцеров межтрубного пространства принимаем сварную трубу, совмещённую с гладким фланцем по ГОСТ 28759.2-90 [30]. В таблице 13 представлены основные параметры выбранных штуцеров.

Таблица 13 – Таблица штуцеров

Штуцера для отвода и подвода смеси в трубное пространство	
Внутренний диаметр штуцера, мм	650
Длина патрубка, мм	150
Толщина стенки патрубка, мм	8
Штуцер для подвода ДФС	
Внутренний диаметр штуцера, мм	25
Длина патрубка, мм	150
Толщина стенки патрубка, мм	3,5

Изм. №	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
Изм. № подл.				
Изм. № дубл.				
Взам. инв. №				
Подп. и дата				

Продолжение таблицы 13

Штуцер для отвода паров ДФС	
Внутренний диаметр штуцера, мм	25
Длина патрубка, мм	150
Толщина стенки патрубка, мм	3,5

На рисунке 10 представлен внешний вид штуцера.

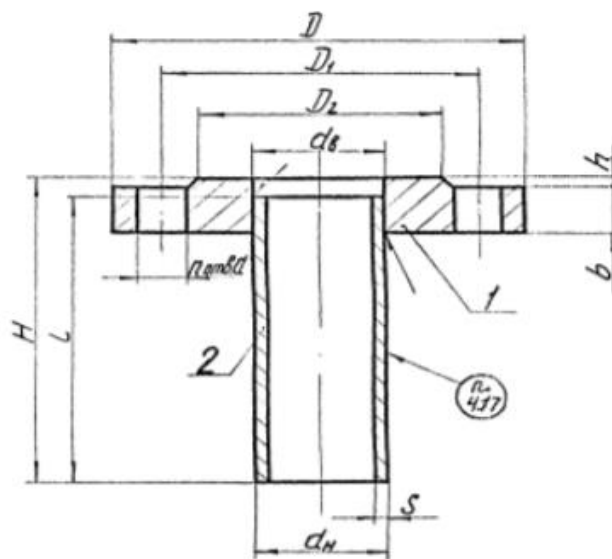


Рисунок 10 – Штуцер по [29] тип 1 исполнение 1

Скорость движения среды в штуцере для трубного пространства:

$$\omega_{шт.тр} = \frac{4 \cdot G_{ч}}{\pi \cdot 3600 \cdot d_{тр}^2 \cdot \rho_{см.ср}} = \frac{4 \cdot 25170}{3,14 \cdot 3600 \cdot 0,65^2 \cdot 0,844} = 24,97 \text{ м/с}$$

Скорость движения среды в штуцере подвода жидкой ДФС:

$$\omega_{шт.м.тр.2} = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot 3600 \cdot d_{м.тр.2}^2 \cdot \rho_{ДФС}} = \frac{4 \cdot 33,14}{3,14 \cdot 3600 \cdot 0,025^2 \cdot 860} = 0,022 \text{ м/с}$$

Скорость движения среды в штуцере подвода жидкой ДФС:

$$\omega_{шт.м.тр.1} = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot 3600 \cdot d_{м.тр.1}^2 \cdot \rho_{ДФС}} = \frac{4 \cdot 33,14}{3,14 \cdot 3600 \cdot 0,025^2 \cdot 7,585} = 2,47 \text{ м/с}$$

2.7.4 Подбор штуцеров

По ОСТ 26-2001-83 [31] был подобран люк-лаз (рисунок 11) с внутренним диаметром 450 мм и толщиной стенки 4 мм.

Ивл. № подл.	
Подл. и дата	
Ивл. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подл. и дата	
Ивл. № инв.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

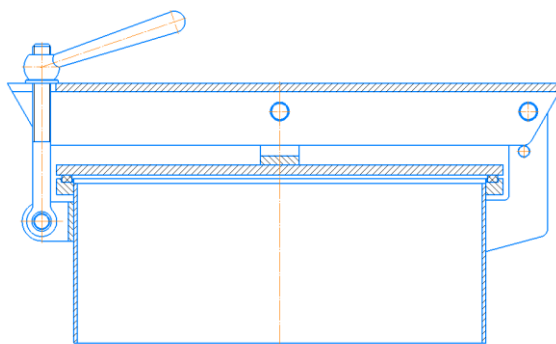


Рисунок 11 – Люк-лаз

2.8 Основные результаты технологического расчёта

В ходе технологического расчёта был составлен материальный баланс (Таблица 6) определена поверхность теплообмена реактора, основные геометрические параметры аппарата (Таблица 14). Также были определены гидравлические потери и подобраны штуцера

Таблица 14 – Основные параметры аппарата, полученные в ходе технологического расчёта

Параметр	Значение параметра
Общая поверхность теплообмена, м ²	210
Количество трубок, шт	1892
Длина трубок, мм	1510

Продолжение таблицы 13

Внутренний диаметр аппарата, мм	1600
Способ крепления труб к трубной решётке	Развальцовка с отбортовкой
Материал трубок	12X18Н10Т
Материал обечайки аппарата	09Г2С
Материал тепловой изоляции	Минеральная вата
Толщина тепловой изоляции, мм	35

Изм. № дубл. Инв. № инв. № Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

3 МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ

Механический расчёт необходим для проверки элементов реактора на надёжность в заданных условиях эксплуатации.

На рисунке 12 представлена схема расположения конструктивных элементов рассчитываемого аппарата.

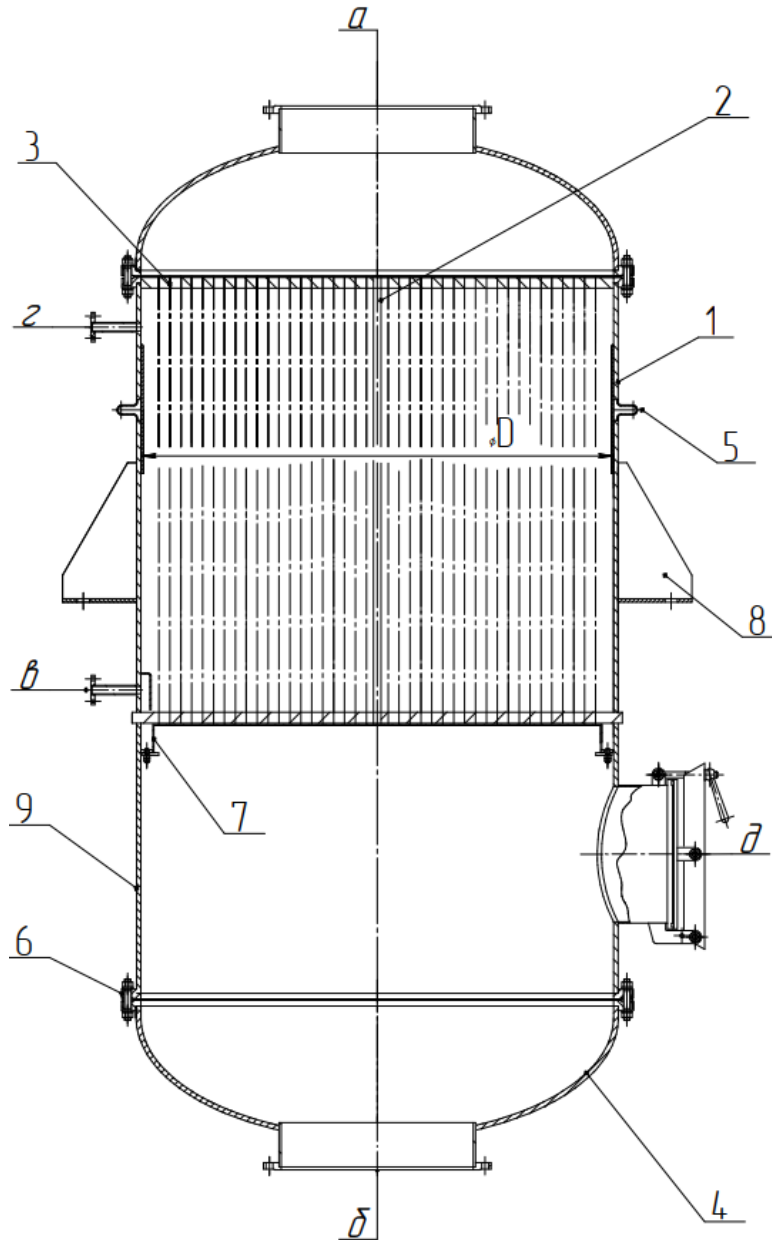


Рисунок 12 – Схема расположения конструктивных элементов аппарата:

- а – штуцер входа в реакционное пространство; б – штуцер выхода из реакционного пространства; в – штуцер подвода ДФС; г – штуцер отвода паров ДФС;
- 1 – греющая камера; 2 – реакционная (теплообменная) трубка; 3 – трубная решётка; 4 – крышка; 5 – компенсатор; 6 – фланцевое соединение; 7 – решётка, поддерживающая насадку катализатора; 8 – опорная лапа; 9 – нижняя обечайка;

Инов. № подл.	Подп. и дата
Инов. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Инов. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Для компенсации температурных деформаций от разности температур в трубном и межтрубном пространствах был выбран линзовый компенсатор, так как средняя разность температур между двумя пространствами составляет 45,43 °С (см. пункт 2.5.1)

3.1 Расчёт кожуха

Расчёт проводится с целью установления толщины стенки цилиндрической обечайки, необходимой для обеспечения прочности и жёсткости конструкции.

Расчётные параметры конструкции

Внутренний диаметр обечайки:

$$D_{\text{вн}} := 1600 \text{ мм}$$

Приблизительная высота обечайки (далее высота будет определена конструктивно)

$$H_{\text{об}} := 1500 \text{ мм}$$

Температуру стенки кожуха примем равной температуре кипения ДФС:

$$t_{\text{к}} := t_{\text{кип.дфс}} = 257 \text{ °С}$$

Расчётная температура для материала обечайки греющей камеры

$$t_{\text{р}} = 257 \text{ °С}$$

Средняя температура материала труб:

$$t_{\text{ср}} := t_{\text{ср1}} \cdot \frac{l_{\text{ж.дфс}}}{l} + t_{0\text{ср}} \cdot \left(1 - \frac{l_{\text{ж.дфс}}}{l} \right) = 290.706 \text{ °С}$$

Допускаемое напряжение материала кожуха - для стали 09Г2С, при расчётной температуре (257°С) [32]:

$$\sigma = 160.4 \text{ МПа}$$

Расчётное значение предела текучести для стали 09Г2С при температуре 20 град [32]:

$$R_{\text{е}} := 300 \text{ МПа}$$

Интв. № подл	Подп. и дата
Интв. № дубл.	Взам. инв. №
Интв. № инв.	Подп. и дата
Интв. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Допускаемое напряжение для стали 09Г2С при температуре гидравлических испытаний [32]:

$$\sigma_{\text{н}} := \text{Floor}\left(\frac{R_e}{1.1}, 0.5\right) = 272.5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 09Г2С при температуре 20°C [32]:

$$\sigma_{20} := 196 \text{ МПа}$$

Модуль упругости стали при температуре 257 град:

$$\sigma_{20} := 196 \text{ МПа}$$

$\eta := 1$ так как аппарат изготавливается из листового проката, в соответствии поправочный коэффициент принимаем в соответствии с рекомендациями

$$\sigma_{\text{д}20} := \eta \cdot \sigma_{20} = 196 \text{ МПа}$$

Модуль упругости стали 09Г2С для условий испытаний [32]:

$$E_{09Г2С.н} := 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 09Г2с в Диапазоне 20-300 град [32]:

$$\alpha_{\text{к}} := 1.31 \times 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

В качестве расчётной температуры для материала труб примем наиболее высокую температуру среды в реакционном пространстве (см. пункт 2.5.1):

$$t_{\text{р.тр}} := 340 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Средняя температура материала труб:

$$t_{\text{ср}1} = 302.429 \text{ - средняя температура среды в реакционном пространстве}$$

$$t_{0\text{ср}} = 185 \text{ - средняя температура среды в зоне подогрева}$$

$$t_{\text{ср}} := t_{\text{ср}1} \cdot \frac{l_{\text{ж.дфс}}}{l} + t_{0\text{ср}} \cdot \left(1 - \frac{l_{\text{ж.дфс}}}{l}\right) = 290.706$$

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при расчётной температуре (340 град):

$$\sigma_{\text{тр}} = 144.8 \text{ МПа}$$

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т при температуре 20 град [32]:

$$\sigma_{20\text{гр}} := 184 \text{ МПа}$$

Расчётное значение предела текучести при остаточном удлинении в 0,2% [32]:

$$R_{p0.2} := 240 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т для гидравлического испытания:

$$\sigma_{\text{и.гр}} := \text{Floor}\left(\frac{R_{p0.2}}{1.1}, 0.5\right) = 218 \text{ МПа}$$

Модуль упругости стали 12Х18Н10Т при температуре 340 град [32]:

$$E_{12\text{X18H10T}} = 1.86 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Модуль упругости стали 12Х18Н10Т при температуре 20°C:

$$E_{12\text{X18H10T.и}} := 2 \cdot 10^5 = 2 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 12Х18Н10Т в диапазоне 20-300 град (для средней температуры среды):

$$\alpha_T := 18 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

Коэффициент прочности сварных швов определяем как для стыкового двухстороннего шва с полным контролем шва [32]:

$$\varphi := 1$$

При 257 град пары ДФС в межтрубном пространстве имеют атмосферное давление [10], таким образом избыточное давление в межтрубном пространстве аппарата будет создавать гидростатический столб жидкости. При полном заполнение межтрубного пространства теплоносителем, на стенки обечайки будет действовать давление от столба ДФС приблизительно 1,5 м, тогда рабочее давление межтрубного пространства:

$$P := 9.8 \cdot 1.5 \cdot \frac{\rho_{\text{ДФС}}}{10^6} = 0.013 \text{ МПа}$$

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

В таком случае давление гидравлических испытаний для межтрубного пространства:

$$P_{и} := 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{д20}}{\sigma} = 0.019 \text{ МПа}$$

Давление в трубном пространстве [8]:

$$P_{тр} := 0.025$$

Давление гидравлических испытаний для трубного пространства:

$$P_{три} := 1.25 \cdot P_{тр} \cdot \frac{\sigma_{20тр}}{\sigma_{тр}} = 0.04 \text{ МПа}$$

3.1.1 Расчёт обечайки греющей камеры (Рисунок 12, позиция 1)

В данном подразделе проводится расчёт обечайки на действие внутреннего давления и осевой сжимающей силы (Рисунок 13) по ГОСТ 34233.2-2017 [33].

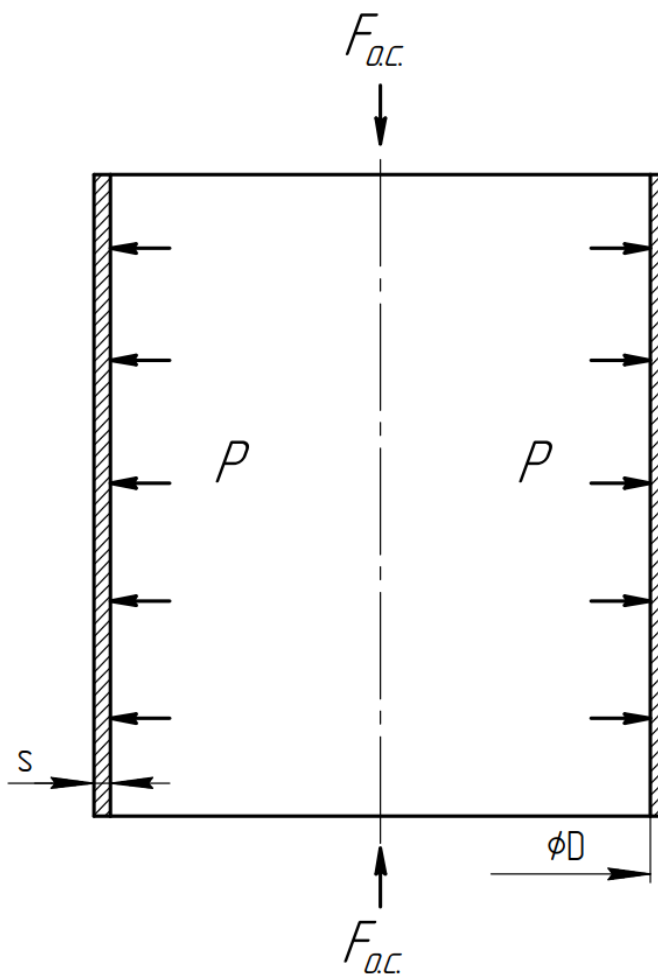


Рисунок 13 – Расчётная схема обечайки греющей камеры

Инд. № подл.	Подп. и дата
Инд. № дубл.	Взам. инв. №
Инд. № подл.	Подп. и дата
Инд. № подл.	Инд. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Прибавку к расчётной толщине стенки вычисляют как [32]:

$$c = c_1 + c_2 + c_3$$

где c_1 – прибавка на коррозионное действие среды; c_2 – прибавка на отрицательное отклонение допуска; c_3 – технологическая прибавка к толщине п обусловленная утонением листа в результате

Прибавка на коррозию согласно пункту:

$$c_1 := 1 \quad \text{мм}$$

Прибавка на отрицательное отклонение согласно ГОСТ [34]:

$$c_2 := 0.8 \quad \text{мм}$$

Пренебрежём технологической прибавкой:

$$c_3 := 0 \quad \text{мм}$$

Таким образом суммарная прибавка составит:

$$c := c_1 + c_2 + c_3 = 1.8 \quad \text{мм}$$

Расчётная толщина стенки обечайки:

$$s_p := \max \left(\frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma \cdot \varphi - P}, \frac{P_{II} \cdot D}{1.8 \cdot \sigma_{II} \cdot \varphi - P_{II}} \right) = 0.063 \quad \text{мм}$$

Исполнительная толщина стенки обечайки с учётом суммы прибавок составляет [33]:

$$s := \text{Ceil}(s_p + c, 0.5) = 2 \quad \text{мм}$$

Расчёт обечайки на устойчивость от веса аппарата, который показал, что минимальная толщина стенки обечайки равна 4 мм, расчёт и конструирование фланцев показал, что минимальная толщина трубной решётки должна быть следующей:

$$s := 15 \quad \text{мм}$$

Исполн.	Подп.	Дата	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

3.1.1.1 Расчёт обечайки на устойчивость по ГОСТ 34233.2-2017 [33]

В рабочих условиях

Коэффициент запаса устойчивости для рабочих условий:

$$n_y := 2.4$$

Количество реакционных (теплообменных) трубок:

$$n_{\text{тр}} := 1892$$

Осевая сжимающая сила, действующая на кожух, которая создаётся давлением в трубном пространстве:

$$d_T := 25 \text{ мм}$$

$$F_{\text{тр}} := P_{\text{тр}} \cdot \pi \cdot \frac{(D^2 - n_{\text{тр}} \cdot d_T)}{4} = 4.934 \times 10^4 \text{ Н}$$

Осевая сжимающее усилие от тяжести фланцев трубной решётки и крышки (см. раздел 3.7.1):

$$F_{\text{тж}} := 6.516 \times 10^4 \text{ Н}$$

Рассмотрим худший случай нагружения, при котором избыточное давление в межтрубном пространстве отсутствует и на обечайку действует результирующая сила от давления в трубном пространстве и вес от элементов аппарата:

$$F_{\text{о.с.}} := F_{\text{тр}} + F_{\text{тж}} = 1.145 \times 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$F_{d\sigma} := \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot \sigma = 1.073 \times 10^7 \text{ Н}$$

Принимаем для расчёта на устойчивость расчётную схему как на рисунке 14 (как для схемы с жёстким консольным креплением):

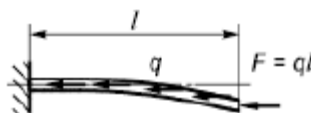


Рисунок 14 – Расчётная схема определения приведённой расчётной длины

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Ивл. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Приведённая расчётная длина для выбранной схемы [33]:

$$l_{\text{пр}} := 1.12H_{\text{об}} = 1.68 \times 10^3 \quad \text{мм}$$

Гибкость:

$$\lambda := \frac{2.83 \cdot l_{\text{пр}}}{D + s - c} = 2.948$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости:

$$F_{\text{дЕ1}} := 31 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{E_{09Г2С}}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(s-c)}{D} \right]^{2.5} = 3.577 \times 10^7 \quad \text{Н}$$

Для обечаек, для которых выполняется условие $\frac{H_{\text{об}}}{D} < 10$ (в данном случае $\frac{H_{\text{об}}}{D} = 0,938$), допускаемое осевое сжимающее усилие определяется как допускаемое осевое усилие из условия местной устойчивости:

$$F_{\text{дЕ}} := F_{\text{дЕ1}} = 3.577 \times 10^7 \quad \text{Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие вычисляются по формуле:

$$F_{\text{д}} := \frac{F_{\text{д}\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{\text{д}\sigma}}{F_{\text{дЕ}}} \right)^2}} = 1.028 \times 10^7 \quad \text{Н}$$

Проверка условия устойчивости:

$$\text{prog}_3 := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \frac{F_{\text{о.с.}}}{F_{\text{д}}} \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{F_{\text{о.с.}}}{F_{\text{д}}} = 0.011$$

prog_3 = "Условие устойчивости выполняется"

Как видно, условие устойчивости обечайки в рабочих условиях выполняется.

Ивл. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата	Ивл. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

3.1.1.2 Расчёт обечайки на устойчивость в условиях гидравлических испытаний

Коэффициент запаса устойчивости для условий испытаний:

$$n_{уст} := 1.8$$

Осевая сжимающая сила, действующая на кожух, которая создаётся давлением в трубном пространстве:

$$F_{три} := P_{три} \cdot \pi \cdot \frac{(D^2 - n_{тр} \cdot d_T^2)}{4} = 7.837 \times 10^4 \text{ Н}$$

Осевая сжимающее усилие от тяжести фланцев трубной решётки и крышки (см. раздел 3.7.1):

$$F_{ГЖ} := 6.516 \times 10^4 \text{ Н}$$

Рассмотрим худший случай нагружения для условий испытаний, при котором в трубном пространстве создаётся пробное давление, а в межтрубном атмосферное:

$$F_{о.с.и.} := F_{три} + F_{ГЖ} = 1.435 \times 10^5 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия прочности:

$$F_{и.д\sigma} := \pi \cdot (D + s - c) \cdot (s - c) \cdot \sigma_H = 1.823 \times 10^7 \text{ Н}$$

Принимаем для расчёта на устойчивость расчётную схему как на рисунке (как для схемы с жёстким консольным креплением), тогда приведённая расчётная длина для выбранной схемы [33]:

$$l_{пр} := 1.12H_{об} = 1.68 \times 10^3 \text{ мм}$$

Гибкость:

$$\lambda := \frac{2.83 \cdot l_{пр}}{D + s - c} = 2.948$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие из условия местной устойчивости в пределах упругости:

$$F_{и.дE1} := 31 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{E_{09Г2С.и}}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[100 \cdot \frac{(s - c)}{D} \right]^{2.5} = 5.424 \times 10^7 \text{ Н}$$

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Для обечаек, для которых выполняется условие $\frac{H_{об}}{D} < 10$ (в данном случае $\frac{H_{об}}{D} = 0,938$), допускаемое осевое сжимающее усилие определяется как допускаемое осевое усилие из условия местной устойчивости:

$$F_{и.дE} := F_{и.дE1} = 5.424 \times 10^7 \text{ Н}$$

Допускаемое осевое сжимающее усилие вычисляют по формуле:

$$F_{и.д} := \frac{F_{и.д\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{F_{и.д\sigma}}{F_{и.дE}}\right)^2}} = 1.728 \times 10^7 \text{ Н}$$

Проверка условия устойчивости:

$$\text{prov}_3 := \begin{cases} \text{"Условие устойчивости выполняется"} & \text{if } \frac{F_{о.с.и.}}{F_{и.д}} \leq 1 \\ \text{"Условие устойчивости НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\frac{F_{о.с.и.}}{F_{и.д}} = 8.306 \times 10^{-3}$$

prov_3 = "Условие устойчивости выполняется"

Как видно, условие устойчивости обечайки в условиях испытаний выполняется.

3.1.1.3 Проверка условия применимости расчётных формул

Проверим выполнение условия применения формул, основанных на безмоментной теории:

$$\text{Пров}_1 := \begin{cases} \text{"Условие применимости выполняется"} & \text{if } \frac{s-c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"Условие применимости НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_1 = \text{"Условие применимости выполняется"} \quad \frac{s-c}{D} = 8.25 \times 10^{-3}$$

Инт. № подл.	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Взам. инв. №
Инт. № инв.	Подп. и дата
Инт. № инв.	Инт. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Проверка применимости формул для расчёта устойчивости обечайки под действием осевой сжимающей силы:

$$\text{Пров}_1 := \begin{cases} \text{"Условие применимости выполняется"} & \text{if } \frac{H_{об}}{D} \geq 1 \\ \text{"Условие применимости НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_1 = \text{"Условие применимости НЕ выполняется"} \quad \frac{H_{об}}{D} = 0.938$$

Условие применимости формул не выполняется, но согласно ГОСТ 34233.2-2017 [33], использование формул, представленных в расчёте на устойчивость выше, допускается.

3.1.1.4 Проверка условия прочности для обечайки

Допускаемое давление для условия прочности:

$$p_1 := 2 \cdot \sigma \cdot \varphi \cdot \frac{(s - c)}{[D + (s - c)]} = 2.625 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление при гидравлических испытаниях

$$p_{ли} := 1.8 \cdot \sigma_{и} \cdot \varphi \cdot \frac{(s - c)}{[D + (s - c)]} = 4.014 \text{ МПа}$$

Проверка условия прочности при рабочих условиях:

$$\text{Пров}_2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{P}{p_1} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_2 = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad \frac{P}{p_1} = 4.89 \times 10^{-3}$$

Проверка условия прочности при условиях гидравлических испытаний:

$$\text{Пров}_3 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{P_{и}}{p_{ли}} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Пров}_3 = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad \frac{P_{и}}{p_{ли}} = 0.051$$

Инт. № подл.	Подп. и дата
Изм.	
№ докум.	
Подп.	
Дата	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Толщина стенки взята с большим запасом, если судить по критерию прочности, что должно обеспечить высокий уровень надёжности разрабатываемого аппарата.

3.2 Расчёт днища и крышки (Рисунок 12, позиция 4)

Принимаем эллиптическую крышку (Рисунок 15).

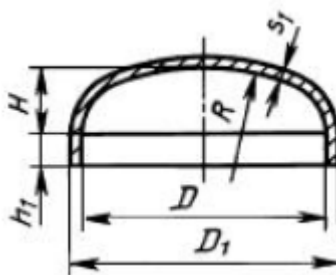


Рисунок 15 – Расчётная схема эллиптической крышки

Принимаем материал крышки 09Г2С. По ГОСТ 34233-1 [32] определяем допустимое напряжение для материала крышки при средней температуре реакционного потока (290,71 °С).

$$\sigma_{д.к} = 153 \text{ МПа}$$

Расчётное значение предела текучести для условий испытаний для стали 09Г2С [31]:

$$R_e := 300 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для условий испытаний

$$\sigma_{и.к} := \text{Floor} \left(\frac{R_e}{1.1}, 0.5 \right) = 272.5 \text{ МПа}$$

Пренебрежём прибавкой на отрицательное отклонение проката и технологической прибавкой [32]; прибавка к расчётным толщинам как для двухсторонней коррозии (атмосферная и кислородная коррозия) составит 2 мм, таким образом [20]:

$$c = 2 \text{ мм}$$

Внутренний диаметр крышки такой же как и внутренний диаметр корпуса:

$$D := 1600 \text{ мм}$$

Принимаем днище, для которого радиус кривизны равен диаметру:

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № инв.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Ив. № инв.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

$$R := D = 1.6 \times 10^3 \text{ мм}$$

Расчётная толщина стенки эллиптической крышки [32]:

$$s_{1p} := \max\left(\frac{P_{\text{тр}} \cdot R}{2 \cdot \sigma_{\text{д.к}} \cdot \varphi - 0.5 \cdot P}, \frac{P_{\text{три}} \cdot R}{1.8 \cdot \sigma_{\text{и.к}} \cdot \varphi - 0.5 \cdot P_{\text{и}}}\right) = 0.131 \text{ мм}$$

С учётом сумм всех прибавок:

$$s_{1\text{кв}} := \text{ceil}(s_{1p} + c) = 3 \text{ мм}$$

Принимаем толщину эллиптической крышки согласно требованиям ГОСТ 27859.2-90 [30] к втулки фланцев (крышка будет совмещена с фланцем):

$$s_{1\text{кв}} := 16 \text{ мм}$$

Выбираем днище и крышку с отбортовкой по ГОСТ 6533-78 [35]. В таблице 15 представлены основные параметры подобранной крышки и днища.

Таблица 15 - Основные параметры крышки и днища

Параметр	Значение
Внутренний диаметр, мм	1600
Толщина крышки (днища), мм	16
Высота цилиндрической части крышки (днища), мм	40
Материал крышки днища	09Г2С
Масса крышки, кг	382,6

3.2.1 Проверка условий прочности крышки и днища

Проверка условия прочности основывается на сравнении расчётных давлений с допускаемыми.

Допускаемое давление для крышки и днища в рабочих условиях [33]:

$$P_1 := 2 \cdot \sigma_{\text{д.к}} \cdot \varphi \cdot \frac{(s_1 - c)}{[R + 0.5(s_1 - c)]} = 2.666 \text{ МПа}$$

Допускаемое давление для условий гидравлического испытания [33]:

$$P_{1\text{и}} := 1.8 \cdot \sigma_{\text{и.к}} \cdot \varphi \cdot \frac{(s_1 - c)}{[R + 0.5(s_1 - c)]} = 4.273 \text{ МПа}$$

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Ивл. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Проверка условия прочности при рабочих условиях:

$$\text{prov}_1 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{P_{\text{тр}}}{P_1} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{prov}_1 = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad \frac{P_{\text{тр}}}{P_1} = 9.378 \times 10^{-3}$$

Проверка условия прочности при гидравлических испытаниях:

$$\text{prov}_2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } \frac{P_{\text{три}}}{P_{1и}} \leq 1 \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{prov}_2 = \text{"Условие прочности выполняется"} \quad \frac{P_{и}}{P_{1и}} = 4.519 \times 10^{-3}$$

3.3 Расчёт элементов греющей камеры

Так как конструкция реактора похожа на конструкцию кожухо-трубчатого теплообменника, то элементы греющей камеры аппарата можно рассчитать аналогично теплообменному аппарату по ГОСТ 34233.7 – 2017 [36].

3.3.1 Расчёт толщины трубной решётки

Рассчитаем толщину трубной решётки для обеспечения надёжного крепления труб.

Исполнительную толщину трубной решётки можно определить по формуле [23] (расчётная схема представлена на рисунке 16):

$$s_{\text{реш}} \geq 0.5 \cdot D_E \cdot \sqrt{\frac{P}{\sigma_d}} + c$$

где $s_{\text{реш}}$ - исполнительная толщина трубной решетки, мм;

D_E - диаметр окружности, вписанной в максимально беструбную площадку, мм;

c - прибавка к расчетным толщинам, мм;

P - расчетное давление, действующее на решетку аппарата, МПа;

σ_d - допускаемое напряжение материала, МПа.

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Взам. инв. №
Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

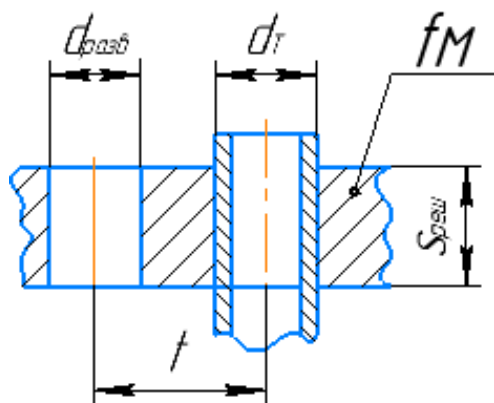


Рисунок 16 - Схема трубной решётки

Принимаем диаметр окружности, вписанный в максимально беструбную площадку, равным [26]:

$$D_E := 32 \text{ мм}$$

Прибавку к расчётным толщинам для трубной решётки примем:

$$c := 1 \text{ мм}$$

Расчётная толщина трубной решётки:

$$s_{гр} := \max \left(0.5 \cdot D_E \cdot \sqrt{\frac{P_{гр}}{\sigma_{гр}}} + c, 0.5 \cdot D_E \cdot \sqrt{\frac{P_{и}}{\sigma_{20гр}}} \right) = 1.21 \text{ мм}$$

По рекомендации [26] минимальная толщина трубной решётки для труб 25x2 составляет 20 мм, но дальнейший расчёт показал, что толщина трубной решётки должна быть не менее 37 мм, что определяется максимальным расчётным изгибающим моментом в перфорированной части трубной решётки. В таком случае принимаем толщину трубной решётки равной 37 мм:

$$s_{гр} := 37 \text{ мм}$$

3.3.2 Уточнение количества труб (Рисунок 12, позиция 2)

Наружный диаметр труб:

$$d_T := 25 \text{ мм}$$

Определим шаг расположения труб [26]:

$$t_{гр} := 1.2 \cdot d_T + 2 = 32 \text{ мм}$$

Изм. № подл.	Подп. и дата
Изм. № дубл.	Взам. инв. №
Изм. № инв.	Подп. и дата
Изм. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Вычислим число труб:

$$i := \left[3 \cdot \left[\frac{(D - d_T + 2 \cdot t_p)}{2 \cdot t_p} \right]^2 - 3 \cdot \frac{(D - d_T + 2 \cdot t_p)}{2 \cdot t_p} + 1 \right] = 1.892 \times 10^3$$

Принимаем число труб равное расчётному (1892).

Диаметр отверстий в трубной решётке принимаем по рекомендации [37]:

$$d_{\text{разв}} := 25.35 \text{ мм}$$

Площадь сечения простенка между соседними трубами [26]:

$$f_M := 4.35 \cdot d_T + 15 = 123.75 \text{ мм}^2$$

3.3.3 Расчёт вспомогательных величин

Целью данного расчёта является определение вспомогательных величин для последующих расчётов.

Внутренний радиус кожуха:

$$a := \frac{D}{2} = 800 \text{ мм}$$

Расстояние от оси кожуха до оси наиболее удалённой трубы:

$$a_1 := 0.525 \cdot t_p \cdot \sqrt{i} = 730.752 \text{ мм}$$

Относительная характеристика бесшовного края трубной решётки по формуле [37]:

$$m_n := \frac{a}{a_1} = 1.095$$

Принимаем гладкие теплообменные трубы 25x2 мм из материала 09Г2С с толщиной стенки 2 мм:

$$s_T := 2 \text{ мм}$$

Коэффициенты влияния давления на трубную решётку [36]:

- со стороны межтрубного пространства:

$$\eta_M := 1 - \frac{i \cdot d_T^2}{4 \cdot a_1^2} = 0.446$$

Инт. № подл.	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Инт. № дубл.
Взам. инв. №	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

- со стороны трубного пространства:

$$\eta_T := 1 - \frac{i \cdot (d_T - 2 \cdot s_T)^2}{4 \cdot a_1^2} = 0.609$$

3.3.4 Основные характеристики жёсткости элементов аппарата

Половина длины трубы теплообменного аппарата:

$$l_{\text{т}} := \frac{1510}{2} = 755 \text{ мм}$$

Модуль упругости стали 12Х18Н10Т при температуре 340 град [32]:

$$E_T := E_{12X18H10T} = 1.86 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Модуль упругости основания (системы труб) [36]:

$$K_y := \frac{E_T \cdot (\eta_T - \eta_M)}{l} = 40.152 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^3}$$

Модуль упругости стали 09Г2С при рабочей температуре (257 градусов) [36]:

$$E_K := E_{09G2C} = 1.75 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Приведённое отношение жёсткости труб к жёсткости кожуха [36]:

$$\rho := \frac{K_y \cdot a_1 \cdot l}{E_K \cdot s} = 8.439$$

Так как средняя разность температур в трубном и межтрубном пространствах выше 30°C (45,43°C) необходимо применение линзового компенсатора. Основные параметры компенсатора (Рисунок 12, позиция 5), необходимые для расчёта представлены ниже в таблице 16.

Таблица 16 - Параметры компенсатора [38]

Параметр	Значение
Толщина компенсатора ($s_{\text{ком}}$), мм	4
Внешний диаметр компенсатора ($D_{\text{ком}}$), мм	1768
Внутренний диаметр компенсатора ($d_{\text{ком}}$), мм	1760
Жёсткость компенсатора ($K_{\text{ком}}$), Н/мм	2160

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Коэффициент изменения жёсткости системы трубы-кожух при действии осевой силы [36]:

$$K_q := \frac{\pi \cdot a \cdot E_K \cdot s}{1 \cdot K_{\text{КОМ}}} + 1 = 4.046 \times 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^3}$$

Коэффициент изменения жёсткости системы трубы-кожух при действии давления [36]:

$$K_p := \frac{\pi \cdot (D_{\text{КОМ}}^2 - d_{\text{КОМ}}^2) \cdot E_K \cdot s}{4.8 \cdot a \cdot 1 \cdot K_{\text{КОМ}}} + 1 = 38.168 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^3}$$

Коэффициент жёсткости трубной решётки зависит от η_T [36]:

$$\eta_{T.\text{matrix}} := \begin{pmatrix} 0.6 \\ 0.65 \end{pmatrix} \quad \psi_0 := \begin{pmatrix} 0.3 \\ 0.37 \end{pmatrix}$$

$$\psi_0 := \text{linterp}(\eta_{T.\text{matrix}}, \psi_0, \eta_T)$$

$$\psi_0 = 0.313 \text{ МПа}$$

Диаметр отверстия в трубной решётке согласно ОСТ 26-02-1015-85 [37]:

$$d_0 := 25.35 \text{ мм}$$

Коэффициент ослабления трубной решётки [36]:

$$\varphi_p := 1 - \frac{d_0}{t_p} = 0.208$$

Эффективный диаметр отверстия с трубами, закреплёнными на всю толщину трубной решётки [36]:

$$d_E := d_0 - 2s_T = 21.35 \text{ мм}$$

Толщина стенки кожуха в месте соединения с фланцем и трубной решёткой такая же, как и в других частях обечайки:

$$s_1 := 15 \text{ мм}$$

Толщина крышки в месте соединения с фланцем:

$$s_2 := 16 \text{ мм}$$

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № инв.	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Коэффициент системы кожух-решётка [36]:

$$\beta_1 := \frac{1.3}{\sqrt{a \cdot s_1}} = 0.012 \quad \frac{1}{\text{мм}}$$

Коэффициент системы крышка-фланец распределительной камеры [36]:

$$\beta_2 := \frac{1.3}{\sqrt{a \cdot s_2}} = 0.011 \quad \frac{1}{\text{мм}}$$

Принимаем фланец согласно ГОСТ 28759 – 2 – 90 [30] (Таблица 17).

Таблица 17 – Фланец разрабатываемого аппарата согласно ГОСТ 28759 – 2 – 90 [30]

Параметр	Значение
Внутренний диаметр фланца (D), мм	1600
Наружный диаметр фланца (D _н), мм	1730
Диаметр болтовой окружности	1690
Диаметр отверстий под болты, мм	23
Количество отверстий под болты (n)	60
Толщина тарелки фланца (h ₁ , h ₂), мм	35
Материал фланца	09Г2С

Радиус центра тяжести тарелки фланца кожуха:

$$R_1 := \frac{D_n + D}{4} = 832.5 \text{ мм}$$

Коэффициент жёсткости втулки фланца кожуха при изгибе [36]:

$$K_1 := \frac{\beta_1 \cdot a \cdot E_K \cdot s_1^3}{5.5 \cdot R_1} = 1.225 \times 10^6 \quad \text{Н}\cdot\text{мм}$$

Коэффициент жёсткости втулки фланца камеры при изгибе:

$$K_2 := \frac{\beta_2 \cdot a \cdot E_K \cdot s_2^3}{5.5 \cdot R_2} = 1.439 \times 10^6 \quad \text{Н}\cdot\text{мм}$$

Выбираем прокладку согласно ГОСТ 28759 – 6 - 90 [39] (Таблица 18)

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Изм.	Подп. и дата
Ли	Изм.
№ докум.	Подп.
Дата	

Таблица 18 – Основные параметры прокладки

Параметр	Значение
Внутренний диаметр прокладки (d_n), мм	1615
Наружный диаметр прокладки (D_n), мм	1646
Толщина прокладки (s_n), мм	3
Материал прокладки	ПОН

Модули упругости фланцев как для стали 09Г2С при температуре 290°C [32]:

$$E_1 := 1.905 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

$$E_2 := E_1$$

Коэффициент жёсткости фланца кожуха при изгибе [36]:

$$B_1 := D_n$$

$$B_2 := D_n$$

$$K_{\phi 1} := \frac{E_1 \cdot h_1^3 \cdot B_1}{12 \cdot R_1^2} + K_1 \cdot \left(1 + \frac{\beta_1 \cdot h_1}{2} \right) = 3.095 \times 10^6 \text{ Н·мм}$$

Коэффициент жёсткости фланца камеры при изгибе [36]:

$$K_{\phi 2} := \frac{E_2 \cdot h_2^3 \cdot B_2}{12 \cdot R_2^2} + K_2 \cdot \left(1 + \frac{\beta_2 \cdot h_2}{2} \right) = 3.345 \times 10^6 \text{ Н·мм}$$

Модуль упругости для материала трубной решётки (сталь 12Х18Н10Т) определяем по температуре среды в межтрубном пространстве [32]:

$$E_p = 1.905 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент системы решётка-трубы [36]:

$$\beta := \frac{1.82}{s_p} \cdot \sqrt[4]{\frac{K_y \cdot s_p}{\psi_0 \cdot E_p}} = 0.02 \quad \frac{1}{\text{мм}}$$

Безразмерный параметр системы решётка-трубы [36]:

$$\omega := \beta \cdot a_1 = 14.28$$

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Взам. инв. №
Ивл. № инв.	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

3.3.5 Определение усилий в элементах аппарата

Исходные данные для расчёта

температура корпуса аппарата: $t_{кв} := 257$ °C

температура труб аппарата: $t_T := t_{cp} = 290.706$ °C

температура сборки аппарата: $t_{0v} := 20$ °C

расчётное давление в трубном пространстве: $p_T := 0.013$ МПа

расчётное давление в межтрубном пространстве: $p_M := 0$ МПа

Коэффициент влияния давления на продольную деформацию труб [36]:

$$m_{cp} := 0.15 \cdot \frac{i \cdot (d_T - s_T)^2}{a_1^2} = 0.281$$

Вычислим приведённое давление [36]

$$p_{11} := [\alpha_K \cdot (t_K - t_0) - \alpha_T \cdot (t_T - t_0)] \cdot K_y \cdot 1 = -53.597 \text{ МПа}$$

$$p_{22} := [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_n \cdot (m_n + 0.5 \cdot \rho \cdot K_q)] \cdot p_T = 243.042 \text{ МПа}$$

$$p_{33} := [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_n \cdot (m_n + 0.3 \cdot \rho \cdot K_p)] \cdot p_M = 0 \text{ МПа}$$

$$p_0 := p_{11} + p_{22} - p_{33} = 189.445 \text{ МПа}$$

Коэффициент жёсткости фланцевого соединения при изгибе:

$$K_\phi := K_{\phi 1} + K_{\phi 2} = 6.44 \times 10^6 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Приведённое отношение жёсткости труб к жёсткости фланцевого соединения [36]:

$$\rho_1 := \frac{K_y \cdot a \cdot a_1}{\beta^2 \cdot K_\phi \cdot R_1} = 11.465$$

Коэффициенты, учитывающие поддерживающее влияние труб, для случая, когда $\omega \geq 11$, определяются следующим образом [36]:

$$\omega = 14.28$$

$$\Phi_1 := \sqrt{2} \cdot \omega = 20.194$$

$$\Phi_2 := \omega = 14.28$$

$$\Phi_3 := \sqrt{2} \cdot \omega = 20.194$$

Изн. № подл.	Подп. и дата
Изн. № дубл.	Взам. инв. №
Изн. № инв.	Подп. и дата
Изн. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Определим значения коэффициентов влияния беструбного края и влияние труб [36]:

$$t_{6.п} := 1 + 1.4 \cdot \omega \cdot (1 - m_n) = -0.894$$

$$T_1 := \Phi_1 \cdot [m_n + 0.5 \cdot (1 + m_n \cdot t_{6.п}) \cdot (t_{6.п} - 1)] = 21.71$$

$$T_2 := \Phi_2 \cdot t_{6.п} = -12.772$$

$$T_3 := \Phi_2 \cdot m_n = 15.633$$

Коэффициент влияния давления на изгиб 1-го фланца [36]:

$$m_1 := \frac{1 + \beta_1 \cdot h_1}{2 \cdot \beta_1^2} = 5.025 \times 10^3 \text{ мм}^2$$

Коэффициент влияния давления на изгиб 2-го фланца [36]:

$$m_2 := \frac{1 + \beta_2 \cdot h_2}{2 \cdot \beta_2^2} = 5.31 \times 10^3 \text{ мм}^2$$

Приведённое давление на фланцы [36]:

$$p_1 := \frac{K_y}{\beta \cdot K_\phi} \cdot (m_1 \cdot p_M - m_2 \cdot p_T) = -0.022 \text{ МПа}$$

Рассчитаем изгибающий момент и перерезывающую силу, распределённые по краю трубной решётки [36]:

- для изгибающего момента:

$$M_n := \left(\frac{a_1}{\beta} \right) \cdot \frac{p_1 \cdot (T_1 + \rho \cdot K_q) - p_0 \cdot T_2}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} = 67.329 \frac{\text{Н} \cdot \text{мм}}{\text{мм}}$$

- для перерезывающей силы:

$$Q_n := a_1 \cdot \frac{p_0 \cdot (T_3 + \rho_1) - p_1 \cdot T_2}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} = 4.051 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

Изгибающий момент и перерезывающие силы, распределённые по периметру перфорированной зоны решётки [36]:

- для изгибающего момента:

$$M_a := M_n + (a - a_1) \cdot Q_n = 347.883 \frac{\text{Н} \cdot \text{мм}}{\text{мм}}$$

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Взам. инв. №
Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

- для перерезывающей силы:

$$Q_a := m_n \cdot Q_n = 4.435 \quad \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

Осевая сила и изгибающий момент, действующие на трубу для осевой силы [36]:

$$N_T := \frac{\pi \cdot a_1}{i} \cdot [(\eta_M \cdot p_M - \eta_T \cdot p_T) \cdot a_1 + \Phi_1 \cdot Q_a + \Phi_2 \cdot \beta \cdot M_a] = 219.446 \text{ Н}$$

Момент инерции поперечного сечения трубы:

$$d_{\text{внеш}} := 25 \text{ мм} \quad d_{\text{внутр}} := 21 \text{ мм}$$

$$J_T := \frac{\pi \cdot (d_{\text{внеш}}^4 - d_{\text{внутр}}^4)}{64} = 9.628 \times 10^3 \text{ мм}^4$$

Осевая сила и изгибающий момент, действующие на трубу для изгибающего момента [36]:

$$M_T := \frac{E_T \cdot J_T \cdot \beta}{K_y \cdot a_1 \cdot l_{\text{пр}}} \cdot (\Phi_2 \cdot Q_a + \Phi_3 \cdot \beta \cdot M_a) = 316.913 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Усилия в кожухе [36]:

- усилие, распределённое по периметру:

$$Q_K := \frac{a}{2} \cdot p_T - Q_n = 1.149 \quad \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

- изгибающий момент, распределённый по периметру кожуха:

$$M_K := \frac{K_1}{\rho \cdot K_\phi \cdot \beta} \cdot (T_2 \cdot Q_n + T_3 \cdot \beta \cdot M_n) - \frac{p_M}{2 \cdot \beta_1^2} = -35.95 \quad \frac{\text{Н}\cdot\text{мм}}{\text{мм}}$$

- суммарная осевая сила, действующая на кожух:

$$F_{\text{ww}} := \pi \cdot D \cdot Q_K - F_{\text{ТЖ}} = -5.939 \times 10^4 \text{ Н}$$

3.3.6 Расчётные напряжения в элементах конструкции

Целью данного расчёта является определение напряжения и максимального расчётного момента в перфорированной части трубной решётки.

Принимаем трубную решётку, сваренную во фланец (Рисунок 17).

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Ив. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

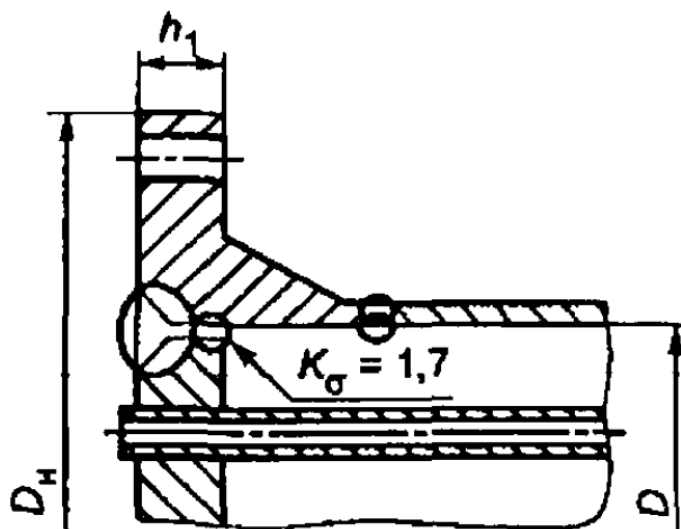


Рисунок 17 – Расчётная схема решётки, вваренной во фланец

Ширина фланца:

$$b_1 := \frac{D_H - D}{2} = 65 \text{ мм}$$

Принимаем толщину решётки в зоне кольцевой канавки:

$$s_{1p} := 31 \text{ мм}$$

Принимаем толщину втулки фланца, равной толщине кожуха, так как в разрабатываемом аппарате кожух будет непосредственно крепиться к фланцу:

$$s_1 = 15 \text{ мм}$$

3.37 Расчётные напряжения в трубных решётках (Рисунок 12, позиция 3)

Напряжения в трубной решётке в месте соединения с кожухом [36]:

- изгибные напряжения:

$$\sigma_{p1} := \frac{6 \cdot |M_n|}{(s_{1p} - c)^2} = 0.449 \text{ МПа}$$

- касательные напряжения:

$$\tau_{p1} := \frac{|Q_n|}{(s_{1p} - c)} = 0.135 \text{ МПа}$$

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Взам. инв. №
Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Определим максимальный расчётный изгибающий момент в перфорированной части трубной решётки по формуле [36]:

$$M_{\max} = B \cdot |M_a|$$

где B – коэффициент, который определяется в зависимости от ω и n_B [36].

$$n_B := \frac{Q_a}{\beta \cdot M_a} = 0.652$$

$$\omega = 14.28 \quad n_{B.\text{matrix}} := \begin{pmatrix} 0.6 \\ 0.7 \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} 0.990 \\ 1.020 \end{pmatrix}$$

$$B := \text{linterp}(n_{B.\text{matrix}}, B, n_B)$$

$$B = 1.006$$

$$M_{\max} := B \cdot |M_a| = 349.879 \frac{\text{Н} \cdot \text{мм}}{\text{мм}}$$

Проверка условия максимального расчётного изгибающего момента в перфорированной части [36]:

$$\text{пров} := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if } \frac{|M_a|}{M_{\max}} \leq 1 \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров = "Условие выполняется" $\frac{|M_a|}{M_{\max}} = 0.994$

Напряжения в перфорированной части трубной решётки [36]:

- изгибные

$$\sigma_{p2} := \frac{6 \cdot M_{\max}}{\varphi_p \cdot (s_{1p} - c)^2} = 11.224 \text{ МПа}$$

- касательные напряжения:

$$\tau_{p2} := \frac{|Q_a|}{\varphi_p \cdot (s_{1p} - c)} = 0.711 \text{ МПа}$$

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Меридиональные напряжения в кожухе в месте присоединения к трубной решетке [36]:

- мембранные напряжения:

$$\sigma_{Mx} := \frac{|Q_k|}{(s_1 - c)} = 0.082 \quad \text{МПа}$$

- изгибные напряжения:

$$\sigma_{ux} := \frac{6 \cdot |M_k|}{(s_1 - c)^2} = 1.1 \quad \text{МПа}$$

Окружные напряжения в кожухе в месте присоединения к трубной решётке [36]:

- мембранные напряжения:

$$\sigma_{M\varphi} := \frac{|p_M| \cdot a}{(s_1 - c)} = 0 \quad \text{МПа}$$

- изгибные напряжения:

$$\sigma_{u\varphi} := 0.3 \cdot \sigma_{ux} = 0.33 \quad \text{МПа}$$

Напряжение в трубах в осевом направлении [36]:

- мембранные напряжения:

$$\sigma_{1T} := \frac{|N_T|}{\pi \cdot (d_T - s_T) \cdot s_T} = 1.519 \quad \text{МПа}$$

- суммарные напряжения:

$$\sigma_1 := \sigma_{1T} + \frac{d_T \cdot |M_T|}{2 \cdot J_T} = 1.93 \quad \text{МПа}$$

Напряжения в трубах в окружном направлении [36]:

$$\sigma_{2T} := \frac{(d_T - s_T) \max(|p_T|, |p_M|, |p_T - p_M|)}{2 \cdot s_T} = 0.075 \quad \text{МПа}$$

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № инв.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Ив. № инв.
Ив. № дубл.	Ив. № инв.
Ив. № инв.	Ив. № инв.
Ив. № подл.	Ив. № инв.
Ив. № дубл.	Ив. № инв.
Ив. № инв.	Ив. № инв.
Ив. № подл.	Ив. № инв.
Ив. № дубл.	Ив. № инв.
Ив. № инв.	Ив. № инв.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

3.3.8 Проверка прочности трубных решёток (Рисунок 12, позиция 3)

Допускаемое напряжение для материала решетки 12X18Н10Т при температуре средней температуре среды в трубном пространстве (290,71°C) [36]:

$$\sigma_{др} := \begin{pmatrix} 154 \\ 148 \end{pmatrix} \text{ МПа} \quad t_{matrix} := \begin{pmatrix} 250 \\ 300 \end{pmatrix} \text{ } ^\circ\text{C} \quad t_{cp} = 290.706 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\sigma_{др} := \text{Floor}(\text{interp}(t, \sigma_{др}, t_{cp}), 0.1)$$

$$\sigma_{др} = 149.1 \text{ МПа}$$

Проверка статической прочности [36]:

$$\max(\tau_{p1}, \tau_{p2}) \leq 0.8 \cdot \sigma_{др}$$

$$\text{пров2} := \begin{cases} \text{"Условие статической прочности выполняется"} & \text{if } \frac{\max(\tau_{p1}, \tau_{p2})}{(0.8 \cdot \sigma_{др})} \leq 1 \\ \text{"Условие статической прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{пров2} = \text{"Условие статической прочности выполняется"} \quad \frac{\max(\tau_{p1}, \tau_{p2})}{(0.8 \cdot \sigma_{др})} = 5.964 \times 10^{-3}$$

3.3.9 Проверка трубной решётки и труб на малоцикловую прочность

Проверка труб и трубной решётки на малоцикловую прочность для данного аппарата допускается не проводить, так как число циклов нагружений не превышает 10^3 . В данном случае главный размах напряжений создаётся пуском технологической линии и её остановкой для проведения остановочного ремонта, и за 20 лет эксплуатации аппарата будет осуществлено 20 циклов пуска и остановки производства.

3.3.10 Расчёт труб на прочность, устойчивость и жёсткость и расчёт крепления труб в решётке

Допускаемое напряжение для материала труб 12X18Н10Т при температуре 340°C [36]:

$$\sigma_{тр} = 144.8 \text{ МПа}$$

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № инв.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Условие статической прочности труб

$$\text{пров2} := \begin{cases} \text{"Условие статической прочности труб выполняется"} & \text{if } \frac{\max(\sigma_{1T}, \sigma_{2T})}{\sigma_{\text{тр}}} \leq 1 \\ \text{"Условие статической прочности труб НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{пров2} = \text{"Условие статической прочности труб выполняется"} \quad \frac{\max(\sigma_{1T}, \sigma_{2T})}{\sigma_{\text{тр}}} = 0.01$$

Проверку труб на устойчивость проводят только в том случае, когда осевая сила оказывает сжимающее действие ($N_T < 0$). В разрабатываемом аппарате на трубы действует осевая растягивающая сила:

$$N_T = 219.438 \quad \text{Н}$$

Принимаем глубину развальцовки равную толщине трубной решётки:

$$l_B := 37 \quad \text{мм}$$

Для гладкоразвальцованных труб [34]:

$$[N]_{\text{тр}} := 0.5 \cdot \pi \cdot s_T \cdot (d_T - s_T) \cdot \min\left(\frac{l_B}{d_T}, 1.6\right) \cdot \min(\sigma_{\text{тр}}, \sigma_{\text{др}}) = 1.548 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

Проверка условия крепления труб в трубной решётке:

$$\text{пров2} := \begin{cases} \text{"Условие крепления выполняется"} & \text{if } \frac{|N_T|}{[N]_{\text{тр}}} \leq 1 \\ \text{"Условие крепления НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{пров2} = \text{"Условие крепления выполняется"} \quad \frac{|N_T|}{[N]_{\text{тр}}} = 0.014$$

3.4 Расчёт укреплений отверстий

3.4.1 Расчёт параметров цилиндрической оболочки и штуцера для ввода и вывода ДФС

Для ввода и вывода ДФС используются одинаковые штуцера, с внутренним диаметром 25 мм. Отверстия являются несовместными, т.к. из-за наличия компенсатора обечайка является составной, а отверстия находятся, как будто, на разных обечайках.

На рисунке 17 представлена расчётная схема отверстия с штуцером в цилиндрической обечайке.

Интв. № подл.	Подп. и дата
Интв. № дубл.	Взам. инв. №
Интв. № инв.	Подп. и дата
Интв. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

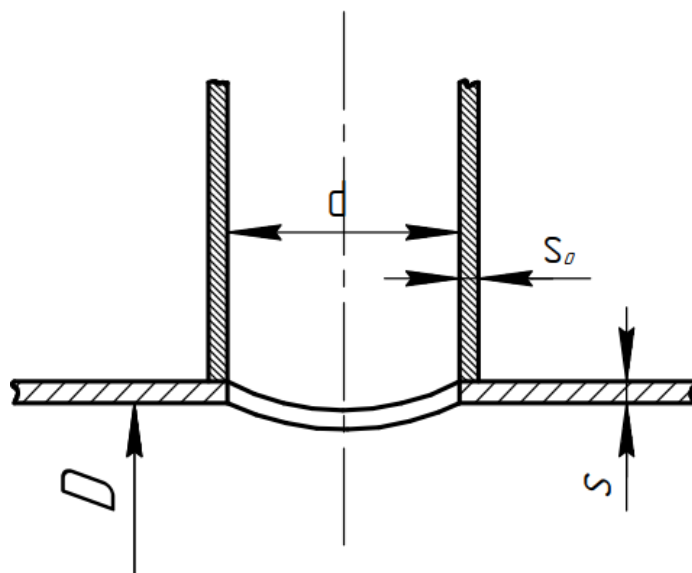


Рисунок 18 – Расчётная модель штуцера цилиндрической обечайки

Расчётные диаметры

Диаметр укрепляемых элементов для цилиндрической обечайки [40]:

$$D_p := D = 1.6 \times 10^3 \text{ мм}$$

Диаметр отверстия под штуцер ввода (вывода) ДФС (см. пункт 2.7.3):

$$d := 25 \text{ мм}$$

Прибавку к расчётной толщине для штуцеров межтрубного пространства принимаем как для односторонней атмосферной коррозии [21]:

$$c := 1 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр отверстия в стенке обечайки при наличии штуцера с круглым поперечным сечением, ось которого совпадает с нормалью к поверхности в центре отверстия (Рисунок 18):

$$d_p := d + 2 \cdot c = 27 \text{ мм}$$

Проверка применимости расчётных формул из ГОСТ 34233.3-2017 [40]:

$$\text{пров1} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_p - 2 \cdot c}{D} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s - c}{D} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров1 = "Условия применения формул выполняются"

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Ив. № дубл.
Ив. № инв. №	Взам. инв. №
Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Так, как ось стыкового сварного шва обечайки удалена от внешней поверхности штуцера более чем на 3 толщины обечайки, то коэффициент прочности сварных швов следует принять [32]:

$$\varphi := 1$$

Так как материал штуцеров для входа ДФС в межтрубное пространство – сталь 09Г2С, то допускаемое напряжение для штуцера такое же, как и для обечайки (см. пункт 3.1):

$$\sigma = 160.4 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 09Г2С в условиях гидравлических испытаний

$$\sigma_{\text{И}} = 272.5 \quad \text{МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера для ввода (вывода) ДФС [40]:

$$s_{\text{р.ш}} := \max \left[\frac{P \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma \cdot \varphi - P}, \frac{P_{\text{И}} \cdot (d + 2 \cdot c)}{1.8 \cdot \sigma_{\text{И}} \cdot \varphi - P_{\text{И}}} \right] = 0.011 \quad \text{мм}$$

Таким образом, толщина стенки штуцера взята с запасом даже с учётом прибавки на коррозию:

$$s_0 = 3.5 \quad \text{мм}$$

Определим расчётный диаметр одиночного отверстия не требующего укрепления при наличии избыточной толщины стенки [40]:

$$d_{0\text{р}} := \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_{\text{р}}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_{\text{р}} \cdot (s - c)}, D + 2 \cdot c \right] = 1.602 \times 10^3 \quad \text{мм}$$

Проверим условие необходимости укрепления отверстий [36]:

$$\text{пров3} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_0 \geq d_{\text{р}} \\ \text{"требуется"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad d_{\text{р}} = 27$$

пров3 = "НЕ требуется укрепление отверстий"

Таким образом отверстие не требует укрепления из-за наличия избыточной толщины стенки обечайки.

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Ив. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

3.4.2 Расчёт укреплён отверстия под люк-лаз (Рисунок 12, позиция д)

Под нижней трубной решёткой аппарата находится нижняя обечайка, в которой расположен люк-лаз по ОСТ 26-2001-83 [31]. Расчётная схема люка-лаза представлена ниже на рисунке 19.

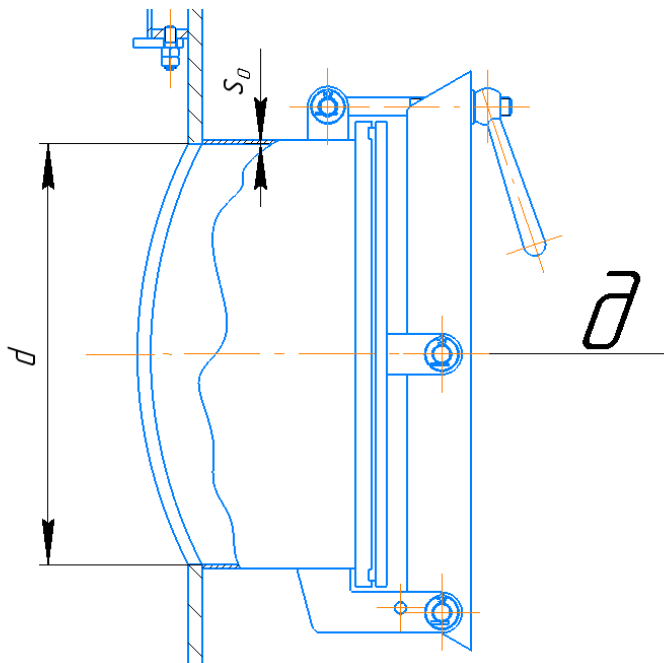


Рисунок 19 – Люк-лаз

В таблице 19 представлены основные параметры люка-лаза, необходимые для расчёта.

Таблица 19 – Основные параметры люка-лаза

Параметр	Значение
Внутренний диаметр (d), мм	450
Толщина стенки штуцера (s ₀), мм	4
Материал	09Г2С

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки, такой же, как и в предыдущем расчёте [40]:

$$D_p := D = 1.6 \times 10^3 \text{ мм}$$

Расчётная прибавка к толщинам как для двусторонней коррозии (кислородной и атмосферной):

$$c := 2 \text{ мм}$$

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № инв.	Подп. и дата
Ив. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Расчётный диаметр отверстия в стенке обечайки:

$$d_p := d + 2 \cdot c = 454 \quad \text{мм}$$

Проверка условия применения формул для расчёта укрепления отверстий [40]:

$$\text{пров1} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_p - 2 \cdot c}{D} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s - c}{D} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров1 = "Условия применения формул выполняются"

Допускаемое напряжение для люка-лаза принимаем таким же, как и для днища (см. пункт 3.2):

$$\sigma_{д.к} = 153 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение в условиях испытаний (см. пункт 3.2):

$$\sigma_{и.к} = 272.5 \quad \text{МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера [40]:

$$s_{шт.к} := \max \left[\frac{P_{гр} \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{д.к} \cdot \varphi - P}, \frac{P_{гри} \cdot (d + 2 \cdot c)}{1.8 \cdot \sigma_{и.к} \cdot \varphi - P_{и}} \right] = 0.037 \quad \text{мм}$$

Толщина стенки штуцера взята с запасом, так как толщина штуцера люка-лаза составляет 4 мм.

Расчётный диаметр одиночного отверстия не требующего укрепления при наличии избыточной толщины стенки обечайки [40]:

$$d_0 := \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)}, D + 2 \cdot c \right] = 1.604 \times 10^3 \quad \text{мм}$$

Проверим необходимость расчёта укрепления отверстия:

$$\text{пров3} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_0 \geq d_p \\ \text{"требуется"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad d_p = 454$$

пров3 = "НЕ требуется укрепление отверстий"

Инва. № дубл.	Инва. № инв. №	Подп. и дата
Инва. № подл	Подп. и дата	
Ли	Изм.	№ докум.
Подп.	Дата	

3.4.4 Расчёт укрепления отверстий на эллиптической крышке и днище (Рисунок 12, позиции а, б)

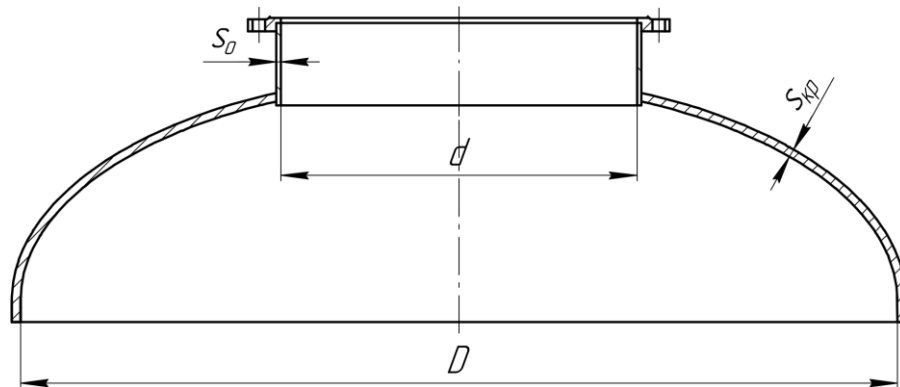


Рисунок 20 – Расчётная схема укрепления отверстия на эллиптической крышке

Толщина стенки штуцера:

$$s_{ш} := 8 \text{ мм}$$

Диаметр штуцера крышки и днища составляет 650 мм, тогда диаметр отверстия под штуцер:

$$d := 650 + 2 \cdot s_0 = 666 \text{ мм}$$

Высота эллиптической крышки (днища):

$$H := 0.25 \cdot D = 400 \text{ мм}$$

Расстояние от оси эллиптического днища до центра укрепляемого отверстия:

$$x := 0 \text{ мм}$$

Диаметры укрепляемых элементов для эллиптических днищ и крышек вычисляют следующим образом [40]:

$$D_{кр} := \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{(D^2 - 4 \cdot H^2)}{D^4} \cdot x} = 3.2 \times 10^3 \text{ мм}$$

Прибавка к расчётным толщинам как в расчёте отверстия штуцера под люк-лаз, тогда расчётный диаметр отверстия в стенке днища (крышки) [40]:

$$d_{кр} := d + 2 \cdot c = 670 \text{ мм}$$

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Проверка условия применения формул для расчёта укрепления отверстий:

$$\text{пров1} := \begin{cases} \text{"Отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{d_p - 2 \cdot c}{D} > 1 \right) \\ \text{"Отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \left(\frac{s_{кр} - c}{D} > 0.1 \right) \\ \text{"Условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров1 = "Условия применения формул выполняются"

Коэффициент прочности сварного шва принимаем таким же, как и в предыдущем расчёте [32]:

$$\varphi := 1$$

Допускаемое напряжение для люка-лаза принимаем таким же, как и в расчёте укрепления отверстия под люк-лаз (см. пункт 3.2):

$$\sigma_{д.к} = 153 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение в условиях испытаний (см. пункт 3.2):

$$\sigma_{и.к} = 272.5 \quad \text{МПа}$$

Расчётная толщина стенки штуцера [40]:

$$s_{расч} := \max \left[\frac{P_{тр} \cdot (d + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{д.к} \cdot \varphi - P}, \frac{P_{три} \cdot (d + 2 \cdot c)}{1.8 \cdot \sigma_{и.к} \cdot \varphi - P_{и}} \right] = 0.055 \quad \text{мм}$$

Полученное расчётное значение толщины стенки штуцера меньше принятой (8 мм):

Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления за счёт избыточной толщины стенки [40]:

$$d_0 := \min \left[2 \cdot \left[\left(\frac{s_1 - c}{s_{1p}} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D_p \cdot (s_1 - c)}, D + 2 \cdot c \right] = 1.604 \times 10^3 \quad \text{мм}$$

Проверим условие крепления отверстия [40]:

$$\text{пров3} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстий"} & \text{if } d_0 \geq d_p \\ \text{"требуется"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad d_p = 670$$

пров3 = "НЕ требуется укрепление отверстий"

Таким образом укрепление отверстия не требуется, т.к. прочность оболочки в зоне отверстия обеспечивает избыточная толщина стенки.

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № инв.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

3.5 Расчёт фланцевого соединения аппарата (Рисунок 12, позиция 6)

Принимаем фланец с гладкой уплотнительной поверхностью (Рисунок 21), так как смесь метанола и кислорода, которую подают в межтрубное пространство реактора, имеет невысокое давление и соотношение концентраций метанола и кислорода ниже пределов взрываемости.

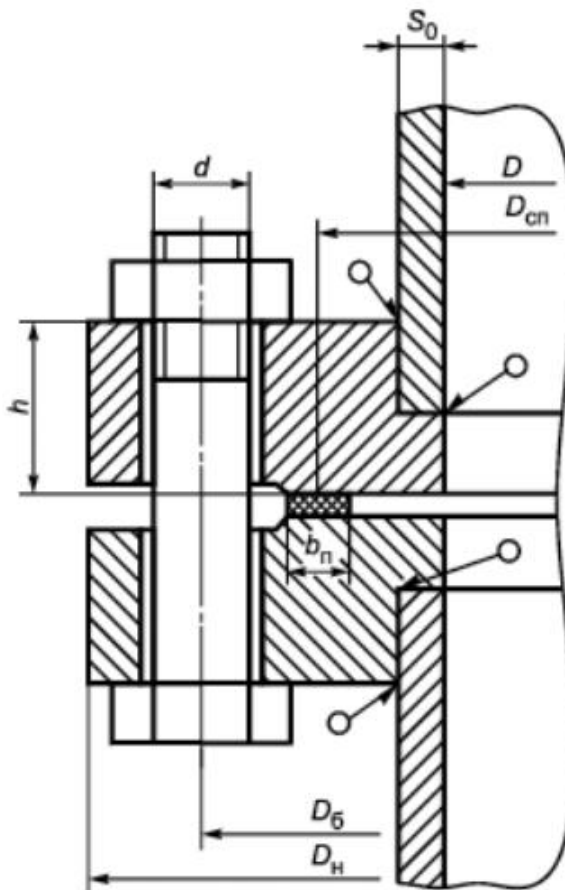


Рисунок 21 – Фланцевое соединение с гладкой уплотнительной поверхностью типа соединительный выступ

3.5.1 Основные расчётные значения

Расчётная температура фланцев, как средняя температура реакционного потока как для неизолированных плоских фланцев [41]:

$$t_{\phi} := 0.96 \cdot t_{\text{ср}} = 279.078 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Расчётная температура шпилек (такая же, как и у фланцев) [41]:

$$t_{\zeta} := 0.96 \cdot t_{\text{ср}} = 279.078 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Инва. № дубл.	Инва. № инв. №	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата	Инва. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Допускаемые напряжения для шпилек из стали 35Х [41] при температуре t_6 :

$$\sigma_6 := 222 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для стали 35Х при температуре t_6 [41]:

$$E_6 = 2.02 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для материала шпилек при температуре 20°C:

$$\sigma_{206} := 230 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для материала шпилек при температуре 20°C [41]:

$$E_{206} := 2.18 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 35Х в температурном диапазоне 20-300°C [41]:

$$\alpha_6 := 14 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$$

Допускаемые напряжения для фланцев и обечайки из стали 09Г2С при температуре t_ϕ [41]:

$$\sigma_{д.ф} = 153.3 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для фланцев из стали 09Г2С при расчётной температуре t_ϕ [32]:

$$E = 1.73 \times 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 09Г2С при температуре 20°C [32]:

$$\sigma_{д20} = 196 \text{ МПа}$$

Модуль упругости стали 09Г2С при температуре 20°C [32]:

$$E_{20} := 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 09Г2С в диапазоне температур 20-300°C [32]:

$$\alpha_\phi := 13.1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$$

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Коэффициент увеличения допускаемых напряжений при затяжке фланцевых соединений [41]:

$$\xi := 1.2$$

Коэффициенты условия работы [41]:

- для рабочих условий $K_{у.р.р} := 1$

- для условий испытания $K_{у.р.и} := 1.35$

Коэффициент условий затяжки при обычной неконтролируемой затяжке [41]:

$$K_{у.з} := 1$$

Коэффициент учёта нагрузки от температурных деформаций при расчёте фланцев [41]:

$$K_{у.т} := 1.3$$

Допускаемое напряжение для болтов в условиях затяжки [41]:

$$\sigma_{дбм} := \xi \cdot K_{у.р.р} \cdot K_{у.з} \cdot K_{у.т} \cdot \sigma_6 = 346.32 \quad \text{МПа}$$

Допускаемое напряжение для болтов в рабочих условиях [41]:

$$\sigma_{дбр} := \xi \cdot K_{у.р.и} \cdot K_{у.з} \cdot K_{у.т} \cdot \sigma_{206} = 484.38 \quad \text{МПа}$$

3.5.2 Усилия, необходимые для смятия прокладки и обеспечения герметичности фланцевого соединения

Эффективная ширина плоской прокладки [41]:

$$b_0 := 3.8 \cdot \sqrt{b_{п}} = 23.731 \quad \text{мм}$$

Расчётный диаметр плоской прокладки [41]:

$$D_{сп} := D_{нп} - b_0 = 1.674 \times 10^3 \quad \text{мм}$$

Характеристика прокладки по Таблице И.1 ГОСТ 34233.4-2017 [41] как для прокладки из паронита толщиной не более 3 мм:

$m := 2.5$ - прокладочный коэффициент;

$q_{обж} := 20 \quad \text{МПа}$ - удельное давление обжатия прокладки, МПа

Изм. № подл.	Подп. и дата
Изм. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Изм. № подл.	Подп. и дата
Изм. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Изм. № подл.	Подп. и дата
Изм. № дубл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Усилие необходимое для смятия прокладки при затяжке [41]:

$$P_{обж} := 0.5 \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot q_{обж} = 1.248 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности фланцевого соединения [41]:

$$R_{п} := \pi \cdot D_{сп} \cdot b_0 \cdot m \cdot P_{тр} = 7.801 \times 10^3 \quad \text{Н}$$

3.5.3 Усилия в шпильках фланцевого соединения при затяжке и в рабочих условиях

Площадь поперечного сечения шпилек М20 [41]

$$f_6 := 225 \quad \text{мм}^2$$

Суммарная площадь сечения шпилек по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра [41]:

$$A_6 := n \cdot f_6 = 1.35 \times 10^4 \quad \text{мм}^2$$

Равнодействующая нагрузка от давления [41]:

$$Q_d := \frac{\pi}{4} \cdot D_{сп}^2 \cdot P_{тр} = 5.504 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

3.5.3.1 Податливость прокладки и шпилек

Условный модуль сжатия прокладки [41]:

$$E_{п} := 0.02 \cdot 10^5 \quad \text{МПа}$$

Коэффициент обжатия прокладки [41]:

$$K_{обж} := 0.90$$

Податливость прокладки [41]:

$$y_{п} := \frac{h_{п} \cdot K_{обж}}{E_{п} \cdot \pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}} = 6.581 \times 10^{-9} \quad \text{мм/Н}$$

Расстояние между опорными поверхностями гаек [41]:

$$L_{60} := 3 \cdot 2 + h_{п} + 2 \cdot h = 79 \quad \text{мм}$$

Эффективная длина шпильки при определении податливости [41]:

$$L_6 := L_{60} + 0.56 \cdot d = 91.88 \quad \text{мм}$$

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Взам. инв. №
Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Податливость шпилек [41]:

$$y_6 := \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_6} = 3.122 \times 10^{-8} \text{ мм/Н}$$

3.5.3.2 Расчётные параметры и угловая податливость фланцев

Параметры длины обечайки [41]:

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0} = 154.919 \text{ мм}$$

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру [41]:

$$K := \frac{D_H}{D} = 1.081$$

Коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца [41]:

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = 1.882$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = 27.198$$

$$\beta_Y := \frac{1}{(K - 1)} \left[0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] = 25.005$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = 12.827$$

Коэффициенты для фланцевых соединений с плоскими фланцами:

$$\beta_F := 0.91 \quad \beta_V := 0.55 \quad f := 1$$

Коэффициент λ [41]:

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 0.666$$

Угловая податливость фланца при затяжке [41]:

$$y_\phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} = 1.084 \times 10^{-10} \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{мм}}$$

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками [41]:

$$C_F := \max \left(1, \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_6}{n}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5}}} \right) = 1$$

Приведённый диаметр приварного встык плоского фланца [41]:

$$D = 1.6 \times 10^3 \text{ мм}$$

$$f = 1$$

$$D_{\text{пр}} := D = 1.6 \times 10^3 \text{ мм}$$

3.5.3.3 Плечи действия сил и коэффициенты жёсткости

Плечо действия усилий в шпильках для приварных встык и плоских фланцев [41]:

$$b_{\text{ш}} := 0.5(D_6 - D_{\text{сп}}) = 7.865 \text{ мм}$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев [41]:

$$S_э := S_0 = 35 \text{ мм}$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев:

$$e_{\text{ш}} := 0.5(D_{\text{сп}} - D - S_э) = 29.635 \text{ мм}$$

Коэффициент жёсткости фланцевого соединения для плоских фланцев [41]:

$$\gamma_{\text{ш}} := \frac{1}{y_{\text{п}} + y_6 \frac{E_{206}}{E_6} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}} \cdot \frac{E_{20}}{E}} = 1.795 \times 10^7 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$$

Коэффициент жёсткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для приварных встык фланцев с плоскими прокладкой [41]:

$$\alpha := 1 - \frac{y_{\text{п}} - 2 \cdot e \cdot y_{\text{ф}} \cdot b}{y_{\text{п}} + y_6 + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}}} = 1.858$$

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № инв.	Подп. и дата
Ив. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Нагрузка, вызванная стеснённой температурных деформаций, в соединениях с плоскими фланцами [41]:

$$Q_t := \gamma \cdot [2\alpha_\phi \cdot h \cdot (t_\phi - 20) - 2\alpha_\delta \cdot h \cdot (t_\delta - 20)] = -2.93 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

Расчётная нагрузка на шпильки при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения [41]:

$$P_{\delta 1} := \max \left[\begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\Pi} - Q_t \end{array} \right] = 2.927 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

Расчётная нагрузка на шпильки при затяжке, необходимая для обжатия прокладки и минимального начального натяжения шпилек [41]:

$$P_{\delta 2} := \max [(P_{\text{обж}}), 0.4 \cdot A_\delta \cdot \sigma_{20\delta}] = 1.248 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

Расчётная нагрузка на шпильки фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения [41]:

$$P_{\delta \text{м}} := \max (P_{\delta 1}, P_{\delta 2}) = 1.248 \times 10^6 \quad \text{Н}$$

Расчётная нагрузка на шпильки фланцевых соединений в рабочих условиях [41]:

$$P_{\delta \text{р}} := P_{\delta \text{м}} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t = 9.589 \times 10^5 \quad \text{Н}$$

3.5.4 Проверка прочности шпилек и прокладки

Расчётные напряжения в шпильках [41]:

- при затяжке

$$\sigma_{\delta 1} := \frac{P_{\delta \text{м}}}{A_\delta} = 92.461 \quad \text{МПа}$$

в рабочих условиях [41]:

$$\sigma_{\delta 2} := \frac{P_{\delta \text{р}}}{A_\delta} = 71.033 \quad \text{МПа}$$

Интв. № подл.	Подп. и дата
Интв. № дубл.	Взам. инв. №
Интв. № подл.	Подп. и дата
Интв. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Проверка условий прочности шпилек при затяжке и в рабочих условиях [41]:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{61} > \sigma_{д6м} \\ \text{"Условия в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{62} > \sigma_{д6р} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl_1 = "Условия прочности выполняются"

Удельное давление на прокладку [41]:

$$q := \frac{\max(P_{6м}, P_{6р})}{\pi \cdot D_{сп} \cdot b_{п}} = 6.085 \text{ МПа}$$

Допускаемое удельное давление на прокладку [41]:

$$q_{д} := 130 \text{ МПа}$$

Проверка условия прочности прокладки [41]:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности прокладки НЕ выполняются"} & \text{if } q > q_{д} \\ \text{"Условия прочности прокладки выполняются"} & \end{cases}$$

Usl_1 = "Условия прочности прокладки выполняются"

3.5.5 Расчёт фланцев на статическую прочность

Расчётный изгибающий момент, действующий на плоский фланец [41]:

$$M_{мм} := C_F \cdot P_{6м} \cdot b = 9.818 \times 10^6 \text{ Н*мм}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях [41]:

$$M_p := C_F \cdot \max[P_{6р} \cdot b + (Q_{д}) \cdot e, |Q_{д}| \cdot e] = 9.174 \times 10^6 \text{ Н*мм}$$

3.5.5.1 Расчётные напряжения во фланце при затяжке

Меридиональные изгибные напряжения в обечайке плоского фланца:

$$\sigma_{1м} := \frac{M_{м}}{\lambda \cdot (S_0 - c_0)^2 \cdot D_{гр}} = 54.557 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{0м} := \sigma_{1м} = 54.557 \text{ МПа}$$

Напряжения в тарелке плоского фланца в условиях затяжки [41]:

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	
Взам. инв. №	
Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

1010

- радиальное напряжение

$$\sigma_{RМ} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M = 9.585 \quad \text{МПа}$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{ТМ} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{RМ} = 2.307 \quad \text{МПа}$$

3.5.5.2 Расчётные напряжения во фланцах в рабочих условиях

Рассчитаем меридиональные изгибные напряжения в обечайке для приварных встык фланцев с прямой втулкой [41]:

$$\sigma_{1p} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_0 - c_o)^2 \cdot D_{пр}} = 50.977 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_{0p} := \sigma_{1p} = 50.977 \quad \text{МПа}$$

Рассчитаем меридиональные мембранные напряжения в обечайке, приваренной к плоскому фланцу [41]:

$$\sigma_{P0MM} := \max \left[\frac{Q_d + F + \frac{4 |M_p|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_o)}, \frac{Q_d + F - \frac{4 |M_p|}{D_{сп}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_o)} \right] = 0.266 \quad \text{МПа}$$

Окружные мембранные напряжения от действия обечайки плоского фланца [41]:

$$\sigma_{POMO} := \frac{P \cdot D}{2 \cdot (S_0 - c_o)} = 0.778 \quad \text{МПа}$$

Напряжения в тарелке приварного встык фланца или плоского фланца в рабочих условиях [41]:

- радиальное напряжение

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p = 8.956 \quad \text{МПа}$$

- окружное напряжение

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rp} = 2.156 \quad \text{МПа}$$

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	
Взам. инв. №	
Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

3.5.5.3 Проверка условий статической прочности фланцев

Так как расчёт проводился с учётом стеснённости температурных деформаций, то коэффициент увеличения допускаемых напряжений с учётом стеснённости температурных деформаций принимает следующее значение [41]:

$$K_T := 1.3$$

Допускаемое значение мембранных и изгибных напряжений и допускаемое значение суммарных общих и местных условных упругих мембранных и изгибных напряжений в соответствии с ГОСТ 34233.1-2017 [32]:

$$\sigma_{д.м} := 1.5 \cdot \sigma_{д.ф} = 229.95 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{д.Р} := 3 \cdot \sigma_{д.ф} = 459.9 \text{ МПа}$$

Условие статической прочности для плоских фланцев [41]:

$$\sigma_{Рmax} := \max \left(\left(\begin{array}{l} |\sigma_{0p} - \sigma_{P0mm} + \sigma_{Rp}| \\ |\sigma_{0p} - \sigma_{P0mm} + \sigma_{Tp}| \\ |\sigma_{0p} + \sigma_{P0mm}| \end{array} \right) \right)$$

Проверка условий прочности в рабочих условиях в сечении S_0 [41]:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{if } \sigma_{Pmax} \leq K_T \cdot \sigma_{д.м} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_1 = \text{"Условия прочности выполняются"}$$

Проверка условия прочности в сечении S_0 в условиях затяжки [41]:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{if } \sigma_{3max} \leq K_T \cdot \sigma_{д.м} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_1 = \text{"Условия прочности выполняются"}$$

Для фланцев всех типов в сечении S_0 должно выполняться следующее условие [41]:

$$Usl_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{if } \max(|\sigma_{P0mo}|, |\sigma_{P0mm}|) \leq \sigma_{д.ф} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl_1 = \text{"Условия прочности выполняются"}$$

Изм. № подл.	Подп. и дата
Изм. № дубл.	Взам. инв. №
Изм. № инв.	Подп. и дата
Изм. № подл.	Подп. и дата

Проверим выполнение условий прочности для тарелок плоских фланцев [41]:

- при затяжке по формуле:

$$U_{sl_1} := \begin{cases} \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{if } \max(|\sigma_{RМ}|, |\sigma_{ТМ}|) \leq K_T \cdot \sigma_{д.ф} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$U_{sl_1} = \text{"Условия прочности выполняются"}$

- в рабочих условиях по формуле:

$$U_{sl_1} := \begin{cases} \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{if } \max(|\sigma_{RП}|, |\sigma_{ТП}|) \leq K_T \cdot \sigma_{д.ф} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$U_{sl_1} = \text{"Условия прочности выполняются"}$

Таким образом, для фланцевого соединения выполняются условия статической прочности согласно ГОСТ 34233.4-2017 как в рабочих условиях, так и в условиях затяжки

3.5.6 Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота плоского фланца [41]:

$$\Theta := M_p \cdot y_{\phi} \cdot \frac{E_{20}}{E} = 1.144 \times 10^{-3} \text{ рад}$$

Допустимый угол поворота плоского фланца [41]:

$$\Theta_{д} := 0.013 \text{ рад}$$

$$U_{sl_P} := \begin{cases} \text{"Условие при испытаниях НЕ выполняется"} & \text{if } \Theta > 1.3 \cdot \Theta_{д} \\ \text{"Условие в рабочих условиях НЕ выполняется"} & \text{if } \Theta > \Theta_{д} \\ \text{"Условие поворота фланца выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$U_{sl_P} = \text{"Условие поворота фланца выполняется"}$

Таким образом, расчётный угол поворота не превышает допускаемый как для условий гидравлических испытаний, так и для условий испытаний.

Инт. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Инт. № подл.	Изм.	Дата
Инт. № инв.	Ли	Изм.

Инт. № подл.	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
--------------	------	----------	-------	------

3.5.7 Проверка малоцикловой прочности элементов фланцевого соединения

Так как срок эксплуатации реактора 20 лет, то и циклов пуска-остановки должно быть 20, а также циклов сборки-разборки должно быть около 21 (в том случае, если производится сборка аппарата на предприятии-изготовителе, а во время остановочного ремонта осуществляется только один цикл сборки-разборки).

3.6 Расчёт элементов конструкции, поддерживающей насадку катализатора

Решётка поддерживающая насадку катализатора состоит из двух частей: цилиндрическая часть и перфорированная часть по типу круглой пластины.

Рассчитаем часть в виде перфорированной пластины как плоскую жёстко зажатую круглую пластину.

Вес всей насадки:

$$F_H = i \cdot 1.51 \cdot \frac{\pi \cdot d_{int}^2}{4} \cdot \frac{\rho_{н.п.} \cdot 9.81}{1000} = 7.766 \times 10^3 \text{ Н}$$

Рассчитаем давление насадки на пластину (диаметр пластины $D_{пл} = 1,52 \text{ м}$):

$$P_H = \frac{4 \cdot F_H}{\pi \cdot D_{пл}^2} = 4.28 \times 10^3 \text{ Па}$$

Поддерживающая конструкция была рассчитана методом конечных элементов в системе Inventor Professional с граничными условиями в виде жёсткой опоры для нижней части обечайки, давления P_H , распределённого по пластине, и силы тяжести (Рисунок 22).

После нескольких итераций был разработан каркас из швеллера 5У ГОСТ 8240 – 97.

На рисунке 22 и 23 представлено распределение напряжений по опорной конструкции. Максимальное напряжение составляет 50,74 МПа, возникает оно в месте изгиба решётки.

Инт. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Инт. № подл.	Подп. и дата	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

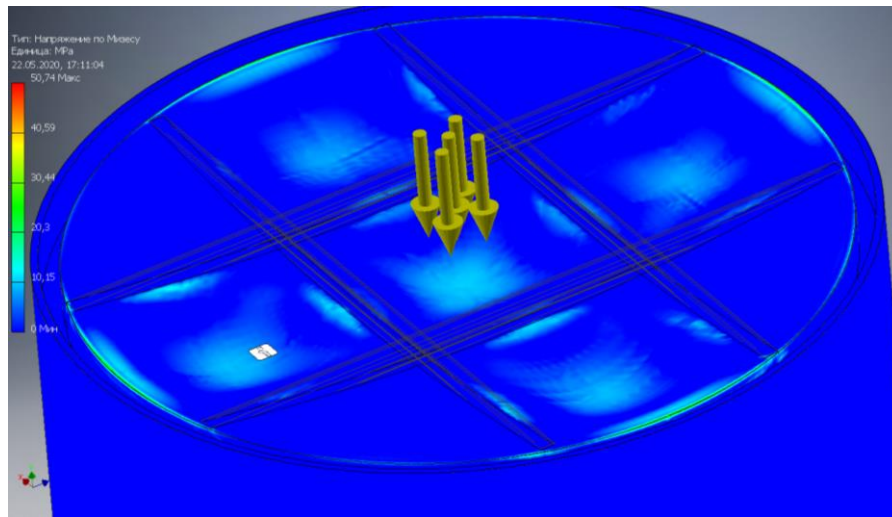


Рисунок 22 – Деформации поддерживающей решётки

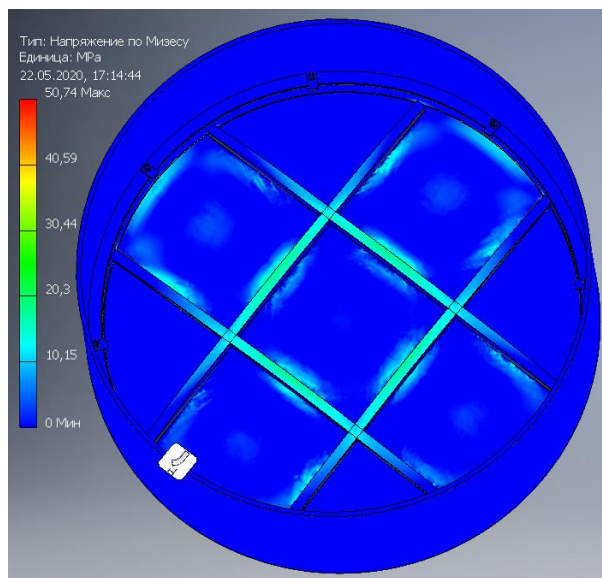


Рисунок 23 – Деформации поддерживающей решётки и каркаса

В связи с техническими ограничениями не удалось смоделировать решётку с отверстиями.

Есть возможность грубо оценить ослабление пластинки за счёт отверстий с введением коэффициента ослабления коэффициента ослабления.

Отверстия в поддерживающей решётке расположены по правильным треугольникам (Рисунок 24), таким образом, один элементарный треугольник содержит $3/6$ площади отверстия ($S_{отв}$).

Ивл. № подл	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Ивл. № дубл.
Взам. инв. №	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

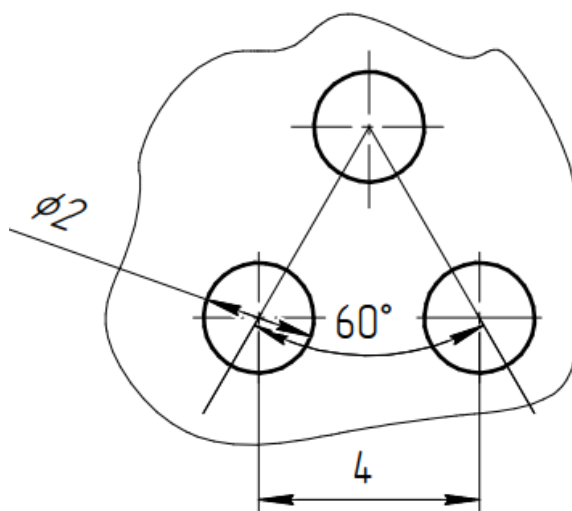


Рисунок 24 – Расположение отверстий в поддерживающей решётке

Запишем коэффициент ослабления, как долю объёма (площади) круглой пластины, которую занимает металл от объёма пластины без перфорации. Предположим, что вся поверхность круглой пластины поддерживающей решётки разбивается на элементарные треугольники такие как на рисунке 3, тогда:

$$k_{oc} = 1 - \frac{3 S_{отв}}{S_{тр}} \leq 1 - \frac{\frac{3}{6} \cdot \pi \cdot 1^2}{\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4^2} = 0,8866$$

Максимальное напряжение, возникающее в перфорированной пластине может быть приблизительно оценено:

$$[\sigma]'_{max} = \frac{[\sigma]_{max}}{k_{oc}} = \frac{50,74}{0,8866} = 57,23 \text{ МПа}$$

Что не превышает допускаемого значения ($[\sigma] = 153,60$ при 288°C).

Обеспечение жёсткости решётки необходимо для предотвращения высыпания катализатора из трубок. Расчёт показал, что максимальный прогиб пластины составляет 1,07 мм (Рисунок 25), что допустимо для разрабатываемой конструкции. Кольца катализатора не смогут проникнуть сквозь образовавшийся зазор, т.к. они имеют высоту и внешний диаметр равные 4,5 мм.

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № инв.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

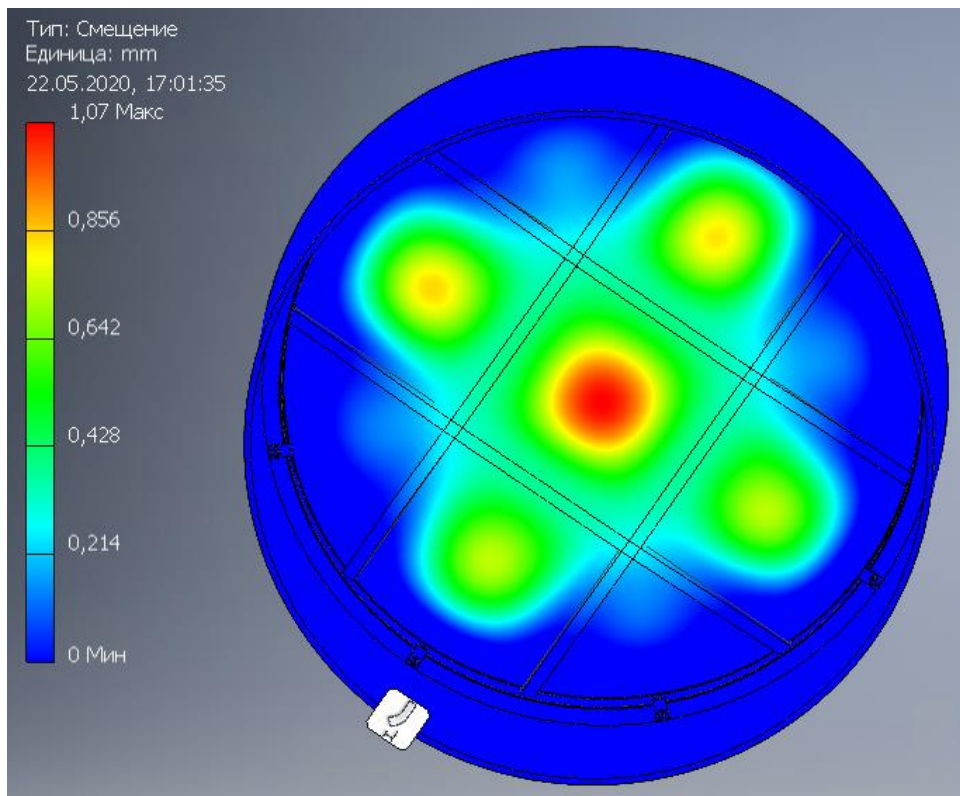


Рисунок 25 – Перемещения поддерживающей конструкции

На рисунке 26 представлены напряжения, в болтовом соединении, возникающие от веса решётки и насадки – значения напряжений не превышают 1,789 МПа, что не превышает допусковое значение ($[\sigma]_{35X} = 222$ МПа для температуры 288°C [41])

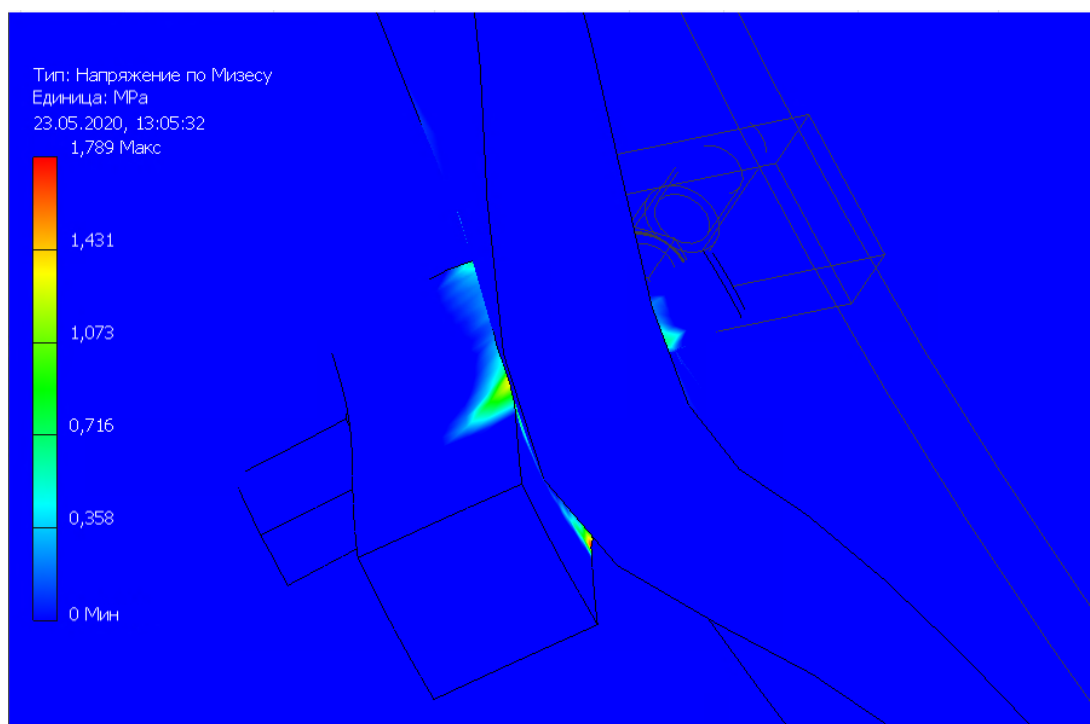


Рисунок 26 – Напряжения в болтовом соединении

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Взам. инв. №
Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

На рисунке 27 представлен характер и значения перемещений косынки и болтового соединения под действием нагрузки.

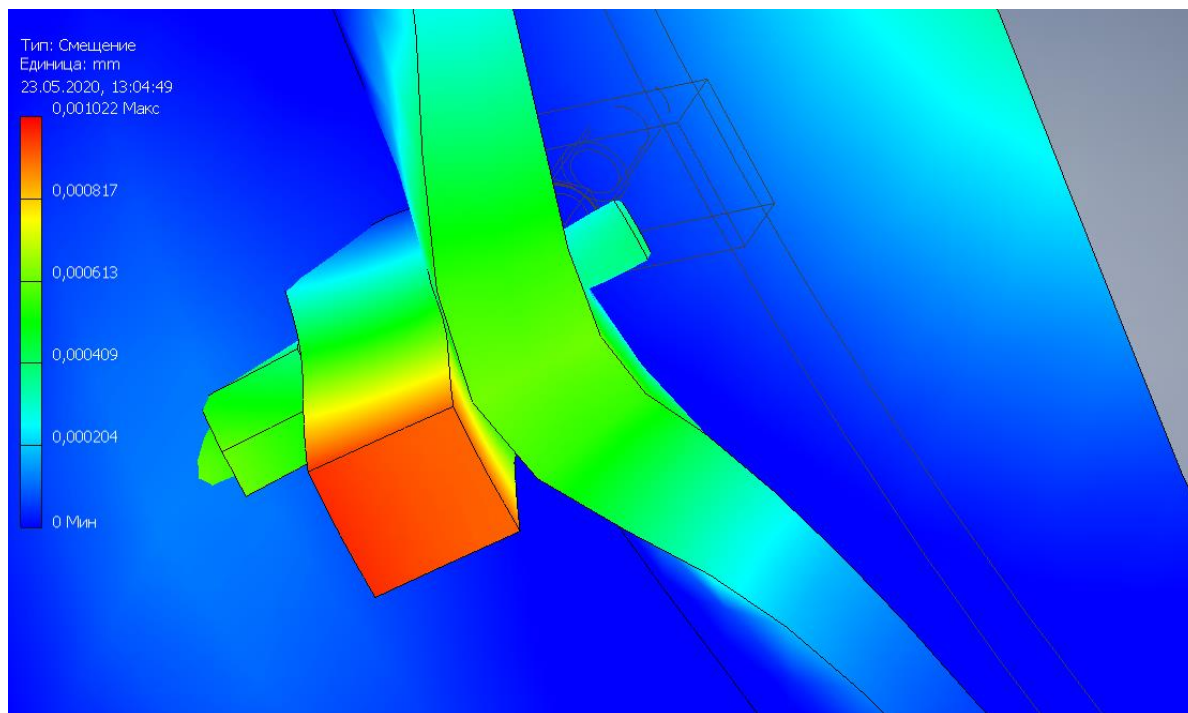


Рисунок 27 - Перемещения в болтовом соединении

С помощью статического анализа МКЭ в Inventor Professional была разработана опорная конструкция для поддержки насадки катализатора (Таблица 20).

Таблица 20 – Параметры опорной конструкции

Параметр	Значение параметра
Поддерживающая решётка	
Материал	09Г2С
Толщина, мм	3
Внешний диаметр, мм	1520
Высота, мм	99
Каркас	
Профиль балок	5У ГОСТ 8240 – 97
Материал	09Г2С
Косынка	
Внутренний диаметр, мм	1520
Толщина, мм	20
Материал	09Г2С

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № инв.	Подп. и дата
Ив. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Продолжение таблицы 20

Бруски	
Размеры, мм	60x30x20
Материал	09Г2С
Шпильки ГОСТ 15526-70	
Размер	M12x1,5
Материал	35Х

3.7 Определение массы аппарата и расчёт обечайки от воздействия опорных нагрузок

3.7.1 Определение массы аппарата

Исходные данные для определения массы аппарата:

Наружный диаметр корпуса: $D_H = 1,63$ м

Внутренний диаметр аппарата: $D_{BK} = 1,6$ м

Внутренний диаметр трубы: $d_{BK} = 0,021$ м

Наружный диаметр трубы: $d_{HT} = 0,025$ м

Плотность воды: $\rho_c = 1000 \frac{кг}{м^3}$

Толщина стенки трубы: $s_T = 0,002$ м

Толщина стенки корпуса: $s_{корп} = 0,015$ м

Высота обечайки межтрубного пространства: $L_{корп} = 1,5$ м

Высота труб: $L_{труб} = 1,5$ м

Высота нижней обечайки: $L_{о.н.} = 0,935$ м

Количество труб: $n_{тр} = 1892$

Ускорение свободного падения: $g = 9,81 \frac{м}{с^2}$

Ускорение свободного падения: $\rho_{мет} = 7860 \frac{кг}{м^3}$

Толщина трубной решётки: $s_{тр} = 0,037$ м

Диаметр трубной решётки: $D_{т.р1} = 1,6$ м

Инт. № подл.	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Инт. № дубл.
Инт. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Рассчитаем вес обечайки межтрубного пространства:

$$G_{\text{корп}} := \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{Н}}^2 - D_{\text{ВК}}^2}{4} \right) \cdot L_{\text{корп}} \cdot \rho_{\text{мет}} \cdot g = 8.802 \times 10^3 \text{ Н}$$

Рассчитаем вес нижней обечайки аппарата:

$$G_{\text{о.н.}} := \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{Н}}^2 - D_{\text{ВК}}^2}{4} \right) \cdot L_{\text{о.н.}} \cdot \rho_{\text{мет}} \cdot g = 5.487 \times 10^3 \text{ Н}$$

Вес трубного пучка:

$$G_{\text{труб.п}} := \pi \cdot \left(\frac{d_{\text{НГ}}^2 - d_{\text{ВГ}}^2}{4} \right) \cdot L_{\text{труб}} \cdot \rho_{\text{мет}} \cdot g \cdot n_{\text{тр}} = 3.183 \times 10^4 \text{ Н}$$

Вес трубной решётки:

$$G_{\text{труб.р}} := \pi \cdot \left(\frac{D_{\text{т.р1}}^2}{4} \right) \cdot s_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{мет}} \cdot g = 5.736 \times 10^3 \text{ Н}$$

Согласно ГОСТ 6533-78 [35] вес крышки аппарата:

$$G_{\text{э.к.}} := 382.6 \cdot g = 3.753 \times 10^3 \text{ кг}$$

Принимаем, что фланцы, патрубки и пр. составляют 30% массы аппарата, тогда вес пустого аппарата:

$$G_{\text{ап1}} := (2G_{\text{э.к.}} + 2G_{\text{труб.р}} + G_{\text{корп}} + G_{\text{о.н.}} + G_{\text{труб.п}}) \cdot 1.3 = 8.463 \times 10^4 \text{ Н}$$

Объём днища согласно ГОСТ 6533-78 [35]:

$$V_{\text{дн}} := 614.1 \cdot 10^{-3} = 0.614 \text{ м}^3$$

Вес жидкости в аппарате:

$$G_{\text{жид1}} := \left[\pi \cdot \frac{D_{\text{ВК}}^2}{4} \cdot (L_{\text{труб}} + L_{\text{о.н.}}) + 2 \cdot V_{\text{дн}} \right] \cdot \rho_{\text{с}} \cdot g = 6.027 \times 10^4 \text{ Н}$$

Так, как в рабочих условиях в межтрубном пространстве находится ДФС, плотность которого ниже плотности воды, а в трубном смесь газов, то наибольший вес аппарат будет иметь во время гидравлических испытаний:

$$G_{\text{ап2}} := G_{\text{ап1}} + G_{\text{жид1}} = 1.449 \times 10^5 \text{ Н}$$

Вес верхней трубной решётки, крышки, корпуса и трубного пучка для расчёта обечайки на устойчивость (см. раздел 3.1.1):

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № инв.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Ив. № инв.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ	Лист
						111

$$G_{\text{апз}} := (G_{\text{э.к.}} + G_{\text{труб.р}} + G_{\text{корп}} + G_{\text{труб.п}}) \cdot 1.3 = 6.516 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

3.7.2 Расчёт опор аппарата (Рисунок 12, позиция 8)

В качестве опор аппарата принимаем опорные лапы по ГОСТ 26296-84 [42], с помощью которых аппарат будет установлен на межэтажном перекрытии или на металлической раме.

Примем коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки между опорами:

$$K_{\text{н}} := 2$$

Примем количество опорных лап равное 4 ($Z = 4$), тогда вес, приходящийся на одну опору:

$$F_{\text{л}} := \frac{G_{\text{апз}} \cdot K_{\text{н}}}{Z} = 7.245 \times 10^4 \quad \text{Н}$$

Принимаем опорную лапу с допускаемой нагрузкой 100000 по ГОСТ 26296-84 с обозначением «Опорная лапа 2-100000 ГОСТ 26296-84». Также приме опору без подкладного листа. Основные размеры опорной лапы представлены на в таблице 21.

Таблица 21 – Геометрические размеры опорной лапы [42]

Допускаемая нагрузка на опорную лапу	l_1 , мм	b , мм	b_1 , мм	h_1 , мм	K , мм	l_F , мм	S_1 , мм	d , мм
100000	250	240	270	460	30	70	10	42

Также на рисунке 28 приведена схема опоры.

Изм. № подл.	Подп. и дата
Изм. № дубл.	Взам. инв. №
Изм. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

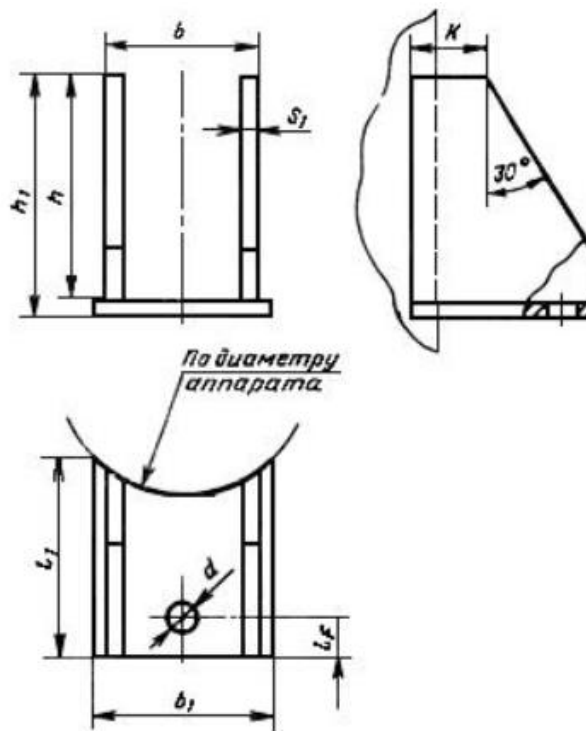


Рисунок 28 – Схема опоры аппарата

Расчётная прибавка к толщине для обечайки межтрубного пространства (см. пункт 3.1):

$$c = 1 \text{ мм}$$

Расчётный диаметр цилиндрической обечайки [43]:

Проверим условия применимости расчётных формул по ГОСТ 34233.5-2017 [43]:

$$\text{проверка}_1 := \begin{cases} \text{"Условие выполняется"} & \text{if} \\ \frac{s - c}{D} \leq 0.05 \\ b - s_1 \geq 0.2 \cdot h_1 \\ 0.04 \leq \frac{h_1}{D_p} \leq 0.5 \\ 0.04 \leq \frac{b_1}{D_p} \leq 0.5 \\ \text{"Условие НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{проверка}_1 = \text{"Условие выполняется"}$$

Так как условия применимости расчётных формул выполняются, расчёт по формулам ГОСТ 34233.5-2017 [43] проводить допускается.

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Коэффициент прочности принимаем как для углового двустороннего шва с полным проплавлением таврового соединения и с полным контролем сварного шва [43]:

3.7.3 Расчёт несущей способности для рабочих условий

Для рабочих условий коэффициент K_2 [43]:

$$K_2 := 1.25$$

Общее меридиональное напряжение в цилиндрической обечайке в рабочих условиях [43]:

$$\sigma_{m,y} := \frac{P \cdot D_p}{4 \cdot (s - c)} = 0.361 \text{ МПа}$$

Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба [43]:

$$\theta_1 := 0.3$$

Коэффициент, учитывающий степень общих мембранных напряжений [43]:

$$\theta_2 := \frac{\sigma_{m,y}}{K_2 \cdot \sigma \cdot \varphi} = 1.801 \times 10^{-3}$$

Коэффициент K_7 [43]:

$$K_1 := \frac{1 - \theta_2^2}{(1 + \theta_1 \cdot \theta_2) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \theta_1 \cdot \theta_2\right) + (1 - \theta_2^2) \cdot \theta_1^2}} = 0.605$$

Предельное напряжение изгиба в месте крепления опор [43]:

$$[\sigma_i] := K_1 \cdot K_2 \cdot \sigma = 121.397 \text{ МПа}$$

Параметры для определения коэффициента K_7 [43]:

$$x := \ln \left[\frac{D_{BK}}{2(s - c)} \right] = -2.862 \quad y := \ln \left(\frac{h_1}{D_p} \right) = -1.247$$

Коэффициент K_7 для выбранной опорной лапы [43]:

$$K_7 := \exp \left(-5.964 - 11.395 \cdot x - 18.984 \cdot y - 2.413 \cdot x^2 - 7.286 \cdot x \cdot y - 2.042 \cdot y^2 \dots \right) = 8.092 \times 10^{-5}$$

Инва. № подл.	Подл. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № подл.	Подл. и дата
Инва. № подл.	Подл. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Плечо действия нагрузки [43]:

$$e_1 := l_1 - l_F = 180 \quad \text{мм}$$

Допускаемая нагрузка на обечайку в месте приварки опорной лапы без подкладного листа [43]:

$$[F] := \frac{[\sigma] \cdot h_1 \cdot (s - c)^2}{K_7 \cdot e_1} = 7.514 \times 10^8 \quad \text{Н}$$

Проверка несущей способности обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа для рабочих условий [43]:

$$\text{пров}_2 := \begin{cases} \text{"Несущая способность обечайки в месте приварки достаточна"} & \text{if } F_1 \leq [F] \\ \text{"Несущая способность обечайки в месте приварки НЕ достаточна"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{пров}_2 = \text{"Несущая способность обечайки в месте приварки достаточна"}$$

Таким образом условие несущей способности обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа выполняется для рабочих условий.

3.7.4 Расчёт несущей способности для условий испытаний

Для условий испытаний [43]:

$$K_2 := 1.05$$

Общее мембранное меридиональное напряжение в цилиндрической обечайке в рабочих условиях [43]:

$$\sigma_{\text{м.у.и}} := \frac{P_{\text{и}} \cdot D_p}{4 \cdot (s - c)} = 0.552 \quad \text{МПа}$$

Коэффициент, представляющий отношение местных мембранных напряжений к местным напряжениям изгиба [43]:

$$\theta_1 := 0.3$$

Коэффициент, учитывающий степень общих мембранных напряжений [43]:

$$\theta_2 := \frac{\sigma_{\text{м.у.и}}}{K_2 \cdot \sigma \cdot \varphi} = 3.276 \times 10^{-3}$$

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № инв.	Подп. и дата
Инва. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Коэффициент K_7 [43]:

$$K_7 := \frac{1 - \theta_2^2}{(1 + \theta_1 \cdot \theta_2) + \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \theta_1 \cdot \theta_2\right) + (1 - \theta_2^2) \cdot \theta_1^2}} = 0.605$$

Предельное напряжение изгиба в месте крепления опор [43]:

$$[\sigma]_{\text{И}} := K_1 \cdot K_2 \cdot \sigma_{\text{И}} = 173.158 \quad \text{МПа}$$

Допускаемая нагрузка на обечайку в месте приварки опорной лапы без подкладного листа [43]:

$$[F]_{\text{И}} := \frac{[\sigma]_{\text{И}} \cdot h_1 \cdot (s - c)^2}{K_7 \cdot e_1} = 1.072 \times 10^9 \text{ Н}$$

Проверка несущей способности обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа для рабочих условий [43]:

$$\text{пров2} := \begin{cases} \text{"Несущая способность обечайки в месте приварки достаточна"} & \text{if } F_1 \leq [F]_{\text{И}} \\ \text{"Несущая способность обечайки в месте приварки НЕ достаточна"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

пров2 = "Несущая способность обечайки в месте приварки достаточна"

Таким образом условие несущей способности обечайки в месте приварки опорной лапы без подкладного листа выполняется для условий испытаний.

Инв. № подл	Подп. и дата	Изн. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата					
					Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
					ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ				
					Лист 116				

4 РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ

Согласно пункту 3.7.1 масса реактора окисления метанола составит:

$$m_{\text{ап}} = \frac{G_{\text{ап1}}}{g} = \frac{84630}{9,81} = 8627 \text{ кг} \approx 8600 \text{ кг}$$

Масса реактора, установленного на данный момент на производстве формалина составляет 25000 кг [16]. Это значит, что в результате расчёта удалось снизить металлоёмкость конструкции реактора в 2,9 раза. Таким образом, основная цель проекта была достигнута. Была разработана конструкция с меньшей металлоёмкостью и, как следствие, меньшими габаритными размерами (внутренний диаметр разработанного 1600 мм против 3600 мм у существующей модели).

Уменьшение металлоёмкости аппарата должно привести к снижению капитальных затрат на производство формалина.

Разработанный реактор теоретически может заменить существующий производства формалина предприятия ООО «Сибметакхим» при модернизации производства, кроме того, реактор может быть установлен на новом производстве с похожей мощностью.

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	Лист
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ	

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

Студенту:

Группа	ФИО
4Г6Б	Хайров Марк Альбертович

Школа	Новых производственных технологий	Отделение школы (НОЦ)	Н.М. Кижнера
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	18.03.01 «Химическая технология»

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

1. Стоимость ресурсов исследовательского проекта: материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования.
3. Составление бюджета исследовательского проекта (ИП)	Расчет бюджетной стоимости ИП по разработке программного обеспечения
4. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности НИИП
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИИП
5. Основные показатели эффективности НИИП

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук Ирина Вадимовна	к.т.н, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Г6Б	Хайров Марк Альбертович		

Введение

Раздел предназначен для оценки конкурентоспособности исследовательского проекта с позиции как технических решений, так и финансовой и ресурсной эффективности. При помощи такого анализа можно получить информацию о сильных и слабых сторонах проекта и о целесообразности разработки вообще.

В ходе анализа необходимо решить следующие задачи:

- оценка коммерческого потенциала и перспективности исследовательского проекта;
- определение возможных альтернатив исследовательскому проекту, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- планирование работ по исследовательскому проекту;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности проекта.

Цель ВКР: модернизация конструкции реактора окисления метанола с использованием современных САПР для автоматизации расчётно-конструкторской работы, с целью оптимизации параметров конструкции реактора и снижения его металлоёмкости.

Инв. № подл.	Подл. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подл. и дата	Инв. № подл.	Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ	Лист
												119

5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

5.1.1 Анализ конкурентных технических решений

На данный момент есть три основных процесса получения формалина в промышленности [5]:

- 1 полная конверсия метанола в присутствии кристаллов серебра, водяного пара, при избытке метанола при температурах 680-720°C;
- 2 частичная конверсия метанола в присутствии кристаллического серебра или серебряной сетки, водяного пара, при избытке метанола при температурах 600-650°C, с последующей дистилляцией;
- 3 окисление в избытке кислорода на окисидном катализаторе при температурах 250-400°C.

Для того, чтобы оценить конкурентоспособность выбранного технологического решения и определить направление его развития, воспользуемся оценочной картой, представленной ниже (Таблица 22).

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале. где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Конкурентоспособность разработки рассчитывается по формуле:

$$K = \sum V_i \cdot B_i, \quad (1)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

V_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Интв. № подл.	Подп. и дата
Интв. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Интв. № подл.
Интв. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Таблица 22 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б ₁	Б ₂	Б ₃	К ₁	К ₂	К ₃
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Конверсия метанола	0,17	4,8	3,9	5	0,82	0,66	0,85
2. Селективность процесса	0,20	3,9	5	5	0,78	1,00	1,00
3. Производительность	0,13	5	5	3,8	0,65	0,65	0,49
4. Энергоэффективность	0,17	5	4,1	4	0,85	0,70	0,68
5. Металлоёмкость	0,05	5	3,3	4	0,25	0,17	0,20
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Капитальные вложения	0,14	5	4	3,3	0,70	0,56	0,46
2. Конкурентоспособность разработки	0,14	3,7	4,5	5	0,53	0,63	0,70
Итого	1	32,5	29,8	30,1	4,58	4,37	4,39

Сильная сторона технологии формалина с окислением метанола на оксидном катализаторе заключается в чистоте получаемого формалина, что даёт этой технологии преимущество на рынке по сравнению с технологией, в основе которой лежит полная конверсия метанола на серебряном катализаторе, за счёт качества продукта.

Формалин получаемый в технологии с неполной конверсией метанола также имеет высокую чистоту, но себестоимость такого производства выше, что делает процесс на оксидном катализаторе предпочтительней.

Продукт рассматриваемой технологии может занять те области потребления, где особенно важно качество продукта.

5.1.2 SWOT-анализ

Для выявления сильных и слабых сторон рассматриваемого производства, а также возможностей и угроз, возникающих из внешней среды, воспользуемся матрицей SWOT (Таблица 23).

Ивл. № дубл.	Ивл. № дубл.
Взам. инв. №	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Ивл. № подл.

Таблица 23 – Матрица SWOT

	<p>Сильные стороны исследовательского проекта: С1. Высокая конверсия метанола. С2. Высокая селективность процесса. С3. Относительная безопасность технологии С4. Простота охлаждения</p>	<p>Слабые стороны исследовательского проекта: Сл1. Высокая энергоёмкость Сл2. Сложность конструкции реактора Сл3. Высокая металлоёмкость Сл4. Сложность эксплуатации и ремонта реактора Сл5. Необходимость в каталитическом дожиге абгазов</p>
<p>Возможности: В1. Удовлетворение потребности в качественном формалине В2. Повышение энергетической эффективности процесса В3. Появление дополнительного спроса на качественный формалин В4. Рекуперация тепла за счёт производства пара</p>	<p>В1.В3.С2. Увеличение прибыли за счёт повышения цены на качественный продукт</p>	<p>В2.Сл1. Повышение энергетической эффективности установки с применением теплового насоса для охлаждения реактора В4.Сл5. Дополнительное использование греющего пара</p>
<p>Угрозы: У1. Развитие конкурирующих технологий У2. Несвоевременное финансирование проекта</p>	<p>У1.С1.С2.С3.С4 В случае значительного превосходства конкурирующей технологии следует производить продукт по конкурирующей технологии.</p>	<p>У1.Сл1.Сл2.Сл3.Сл4.Сл5. Оптимизация процессов и оборудования технологии, доработка слабых сторон.</p>

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

5.2 Планирование научно-исследовательских работ

5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований

Выполнением работ по данному проекту займётся группа из руководителя исследовательским проектом и инженера. Задача руководителя принимать ответственные решения по поводу направления развития проекта, задача инженера – проведение расчётов, испытаний и составление конструкторской документации. Ниже в таблице 24 представлен перечень работ и распределение обязанностей.

Таблица 24 – Перечень этапов работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Проведение патентных исследований	Инженер
	4	Выбор направления исследований	Руководитель, инженер
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические экспериментальные исследования	6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер
	7	Построение модели и проведение экспериментов	Инженер
	8	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	Инженер
	9	Внесение поправок в расчёты	Инженер
Обобщение и оценка результатов	10	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель, инженер

Инва. № дубл.	Инва. № дубл.	Инва. № дубл.	Инва. № дубл.	Инва. № дубл.
Взам. инв. №	Взам. инв. №	Взам. инв. №	Взам. инв. №	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата
Инва. № подл.	Инва. № подл.	Инва. № подл.	Инва. № подл.	Инва. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Продолжение таблицы 24

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технической документации и проектирование	11	Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	Инженер
	12	Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	Руководитель, инженер
	13	Составление пояснительной записки и чертежей	Инженер

5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

Трудовые затраты образуют значительную часть стоимости разработки, поэтому необходимо определение трудоёмкости каждого из участников исследовательского проекта.

Трудоёмкость оценивается в человеко-днях и имеет вероятностный характер, так как зависит от большого количества факторов, которые сложно учесть. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (2)$$

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

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

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

Инва. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата	Инва. № подл.
Ли	Изм.	№ докум.
Подп.	Дата	

Исходя из ожидаемой трудоёмкости работ, рассчитывается продолжительность каждой работы в рабочих днях:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}, \quad (3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожi}$ – ожидаемая трудоёмкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Рассчитаем ожидаемую трудоёмкость и продолжительность работы по составлению и утверждению технического задания для руководителя.

В случае минимальной трудоёмкости у руководителя есть шаблон, по которому он может заполнить техническое задание, это займёт всего несколько минут ($t_{min 1} = 0$).

В случае с максимальной трудоёмкостью утверждение ТЗ может занять один человеко-день ($t_{max 1} = 1$).

Тогда ожидаемая трудоёмкость и продолжительность составления и утверждения ТЗ:

$$t_{ож1} = \frac{3t_{min 1} + 2t_{max 1}}{5} = \frac{3 \cdot 0 + 2 \cdot 1}{5} = 0,4 \text{ человеко} - \text{дня}$$

$$T_{p1} = \frac{t_{ож1}}{Ч} = \frac{0,4}{1} = 0,4 \text{ дня}$$

5.2.3 Разработка графика исследовательского проекта

Продолжительность а также даты начала и окончания работ по исследовательскому проекту будет удобнее всего представить в виде диаграммы Ганта.

Для удобства построения графика длительность работ необходимо перевести в календарные дни:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4)$$

Где $k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Интв. № дубл.	Интв. № дубл.	Интв. № дубл.	Интв. № дубл.	Интв. № дубл.
Взам. инв. №	Взам. инв. №	Взам. инв. №	Взам. инв. №	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата
Интв. № подл	Интв. № подл	Интв. № подл	Интв. № подл	Интв. № подл

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

Коэффициент календарности рассчитывается по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году; $T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году; $T_{\text{пр}}$ – количество праздничных дней в году.

Расчёт календарного коэффициента для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя) [44]:

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал.рук}}}{T_{\text{кал.рук}} - T_{\text{вых.рук}} - T_{\text{пр}}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48$$

Расчёт календарного коэффициента для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера) [45]:

$$k_{\text{кал.рук}} = \frac{T_{\text{кал.рук}}}{T_{\text{кал.рук}} - T_{\text{вых.рук}} - T_{\text{пр}}} = \frac{366}{366 - 52 - 14} = 1,22$$

Перевод рабочих дней в календарные для составления и утверждения технического задания:

$$T_{\text{к.рук } 1} = k_{\text{кал.рук}} \cdot T_{\text{р}1} = 1,48 \cdot 0,4 \approx 1 \text{ кал. д.}$$

Все полученные значения округляются до целого числа. Результаты расчётов календарных дней по всем видам работ, присутствующим в исследовательском проекте, представлены в таблице 25.

Таблица 25 – Временные показатели проектирования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях $T_{\text{р}i}$	Длительность работ в календарных днях $T_{\text{к}i}$		
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{\text{ож}}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Составление и утверждение технического задания	0	-	1	-	0,4	-	0,4	-	1	-

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Взам. инв. №
Ивл. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Продолжение таблицы 25

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}		Длительность работ в календарных днях T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ож}$, чел-дни					
	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер	Руководитель	Инженер
Подбор и изучение материалов по теме	-	7	-	14	-	9,8	-	9,8	-	12
Проведение патентных исследований	-	3	-	4	-	3,4	-	3,4	-	4
Выбор направления исследований	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2	-
Календарное планирование работ по теме	-	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2
Проведение теоретических расчетов и обоснований	-	21	-	28	-	23,8	-	23,8	-	29
Построение модели и проведение экспериментов	-	8	-	14	-	10,4	-	10,4	-	13
Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	1	1	3	3	1,8	1,8	0,9	0,9	1	1
Внесение поправок в расчёты	-	6	-	14	-	9,2	-	9,2	-	11
Оценка эффективности полученных результатов	1	1	4	4	2,2	2,2	1,1	1,1	2	1
Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	-	2	-	4	-	1,4	-	1,4	-	2
Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	1	1	3	3	1,8	1,8	0,9	0,9	1	1
Составление пояснительной записки и чертежей	-	11	-	20	0	14	0	14	-	18

Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № дубл.	Взам. инв. №
Ивл. № подл.	Подп. и дата
Ивл. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

На основе таблицы составлен план-график работ по исследовательскому проекту с разбивкой по декадам и месяц (Таблица 26).

Таблица 26 – Календарный план-график

№ работ	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр.		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1														
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	5	■													
3	Проведение патентных исследований	Инженер	4		■												
4	Выбор направления исследований	Руководитель	2		▨												
5	Календарное планирование работ по теме	Инженер	2			■											
6	Проведение теоретических расчетов и обоснований	Инженер	29			■	■	■	■								
7	Построение модели и проведение экспериментов	инж	13						■	■	■						
8	Сопоставление результатов экспериментов с теоретическими исследованиями	рук., инж.	1 1								▨	■					
9	Внесение поправок в расчёты	инж	11								■	■					
10	Оценка эффективности полученных результатов	Рук инж	2 1									▨	■				
11	Разработка блок-схемы, принципиальной схемы	инж	2										■				

Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № дубл.	Взам. инв. №
Ив. № подл.	Подп. и дата
Ив. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Продолжение таблицы 26

№ раб от	Вид работ	Исполнители	T _{кi} , кал · дн.	Продолжительность выполнения работ													
				февр		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
12	Оценка эффективности производства и применения проектируемого изделия	рук., инж.	1 1														
13	Составление пояснительной записки и чертежей	Инженер															

▨ – руководитель ■ – инженер

В таблице 27 представлена сводная информация по количеству календарных дней, необходимых для выполнения проекта.

Таблица 27 – Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	102
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	97
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	8

В результате данного подраздела было подсчитано количество календарных дней, необходимых на выполнение проекта, также был составлен календарный план-график и подсчитано общее количество календарных дней, необходимых на выполнение проекта.

5.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;

Инва. № подл. Подл. и дата
Инва. № дубл. Подл. и дата
Взам. инв. № Подл. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

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

5.3.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Расчёт материальных затрат исследовательского проекта производится с учётом транспортных расходов, которые принимаются в размере 20% для данного проекта.

Расчёт материальных затрат на проектирование представлен в таблице 28. Таблица 28 – Материальные затраты на проведение исследовательского проекта

Наименование	Цена за ед., руб.	Количество, ед.	Суммарная стоимость, руб.
Бумага для принтера техники [46]	390	3 шт.	1170
Картридж для лазерного принтера [47]	4390	1 шт.	4390
Всего за материалы, руб.			5560

5.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Основное оборудование, которое используется для производства всех видов работ (от поиска литературы до производства расчётов и составления чертежей) – это ноутбук Lenovo, приобретённый в марте 2016 года, и принтер HP, которому более 5 лет. Считается, что амортизационный период ноутбука находится быть в пределах 25-36 месяцев [48], такой же амортизационный период и для принтеров [49]. Так как амортизационный период ноутбука и принтера исполнителя истёк, то и нет необходимости производить амортизационный расчёт.

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

130

5.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата исполнителей – руководителя и инженера.

Среднедневная зарплата исполнителя:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (6)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя;

при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 29).

Рассчитаем среднедневную зарплату для инженера из расчёта, что оклад инженера составляет 17000 руб:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} M}{F_{\text{д}}} = \frac{17000 \cdot 10,4}{247} = 715,79 \text{ руб}$$

Среднедневная заработная плата для руководителя (оклад руководителя 26300):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} M}{F_{\text{д}}} = \frac{26300 \cdot 11,2}{214} = 1376,45 \text{ руб}$$

Таблица 29 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	366	366
Количество нерабочих дней		
- выходные дни	52/14	104/14
- праздничные дни		
Потери рабочего времени		
- отпуск	48/5	24/10
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	247	214

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

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{р}}, \quad (7)$$

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

Инд. № инв. №	Подп. и дата
Инд. № дубл.	
Инд. № подл.	Подп. и дата
Инд. № инв. №	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (Таблица 23);

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

Рассчитаем основную заработную плату ($Z_{осн}$) для инженера:

$$Z_{осн} = Z_{дн} T_p = 715,79 \cdot 79,3 = 56762,15 \text{ руб}$$

Рассчитаем основную заработную плату ($Z_{осн}$) для руководителя:

$$Z_{осн} = Z_{дн} T_p = 1376,45 \cdot 5,4 = 7432,83 \text{ руб}$$

Зарботная плата исполнителя с учётом дополнительных выплат (включая премии и доплаты):

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (8)$$

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

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12 % от $Z_{осн}$).

Зарботная плата инженера с учётом дополнительных выплат:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} = 1,12 \cdot 56762,15 = 63573,60 \text{ р}$$

Зарботная плата руководителя с учётом дополнительных выплат:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп} = 1,12 \cdot 7432,83 = 8324,77 \text{ р}$$

Месячный должностной оклад для исполнителя проекта:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (9)$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб. (17000 руб. для инженера и 26300 руб для руководителя);

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент, равный 0,3;

k_d – коэффициент доплат и надбавок (составляет 0,15 для инженера и 0,25 для руководителя);

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

Месячный должностной оклад инженера:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,15) \cdot 1,3 = 32045 \text{ руб}$$

Месячный должностной оклад руководитель:

$$Z_m = Z_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,25) \cdot 1,3 = 52994,5 \text{ руб}$$

В таблице 30 представлен результат расчёта основной заработной платы.

Интв. № дубл.	Интв. № инв. №	Подп. и дата
Интв. № подл	Подп. и дата	Интв. № подл

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Таблица 30 - Расчёт основной заработной платы

Исполнители	З _{тс} , руб.	k _{пр}	k _д	k _р	З _м , руб	З _{дн} , руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , руб.
Инженер	17000	0,3	0,15	1,3	32045,00	715,79	79,3	63573,60
Руководитель	26300		0,25		52 994,50	1376,45	5,4	7432,83
Итого З _{осн}								71006,43

5.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} \quad (10)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

Рассчитаем дополнительную заработную плату для исполнителей проекта:

– для инженера:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 63573,60 = 9536,04 \text{ руб.} \quad (11)$$

– для руководителя:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 0,15 \cdot 7432,83 = 1114,92, \quad (12)$$

5.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

На 2020 год общая ставка отчислений во внебюджетный фонд составляет 30%, из них 22% - обязательное пенсионное страхование, 5,9% - обязательное медицинское страхование, и 2,2% - оплата пособий по временному нетрудоустройству или материнству.

Величина отчислений во внебюджетные фонды

Ив. № подл.	Подп. и дата					Ив. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
	Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата			
ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ								Лист
								133

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (13)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Рассчитаем величину отчислений во внебюджетные фонды:

- для инженера:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (63573,60 + 9536,04) = 21932,89 \text{ руб}$$

- для руководителя:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) = 0,3 \cdot (7432,83 + 1114,92) = 2564,33 \text{ руб}$$

5.3.6 Накладные расходы

Накладными расходами учитываются прочие затраты организации, такие как: печать и ксерокопирование проектировочных документов, оплата услуг связи.

Примем величину накладных расходов примем равной 16% от суммы расходов по всем другим статьям.

5.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Бюджет исследовательского проекта, рассчитанный в предыдущем подразделе является минимальным, так как не происходит закупка техники или программного обеспечения необходимого для исследований, а используются только ресурсы, имеющиеся в организации.

Процесс разработки стал бы более удобным при покупке нового принтера или многофункционального устройства.

Специальные программы, которые используются для расчётов, моделирования и составления чертежей используются программные комплексы, имеются в доступе на серверах НИ ТПУ. А для работы этих программ не требуются высокие вычислительные мощности.

Всё же, к программам, работающим с удалённого доступа НИ ТПУ, нельзя установить расширения, к тому же в удалённом доступе имеются далеко не все программы для моделирования тепловых, гидродинамических или механических процессов. В этом случае возникает необходимость приобретения ПК для моделирования процессов и осуществления всех расчётов.

Интв. № подл	Подп. и дата
Интв. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	<i>ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ</i>

Ниже (Таблица 31) представлено сравнение трёх вариантов бюджета проекта: без закупки техники (текущий проект), с покупкой принтера (исполнение 2) и с покупкой ПК (исполнение 3).

Таблица 31 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
	Текущий проект	Исп.2	Исп.3	
1. Материальные затраты НТИ	6672,00	6672,00	6672,00	Пункт 2.4.1
2. Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ	0	10990,00	39990,00	Пункт 2.4.2
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	71006,43	71006,43	71006,43	Пункт 2.4.3
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	10650,96	10650,96	10650,96	Пункт 2.4.4
5. Отчисления во внебюджетные фонды	24497,22	24497,22	24497,22	Пункт 2.4.5
6. Накладные расходы	18052,26	19810,66	24450,66	16 % от суммы ст. 1-5
7. Бюджет затрат ИП	130878,87	143627,27	177267,27	Сумма ст. 1-6

Интв. № подл.	Подп. и дата
Интв. № дубл.	Взам. инв. №
Интв. № подл.	Подп. и дата
Интв. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

135

5.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получен в процессе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{ri}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (14)$$

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

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

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Таким образом, стоимость проектов в различных исполнениях:

$$\Phi_{\text{тек.пр.}} = 130878,87 \text{ руб}$$

$$\Phi_{\text{исп.2}} = 143627,27 \text{ руб}$$

$$\Phi_{\text{исп.3}} = 177267,27 \text{ руб}$$

Итак, наибольший бюджет у третьего исполнения проекта:

$$\Phi_{\text{max}} = \Phi_{\text{исп.3}} = 177267,27 \text{ руб}$$

Тогда, интегральные показатель разработки в различных исполнениях:

$$I_{\text{финр}}^{\text{тек.пр.}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{130878,87}{177267,27} = 0,74$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{143627,27}{177267,27} = 0,81$$

Исп. № подл.
Подп. и дата
Исп. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Исп. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	<i>ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ</i>
----	------	----------	-------	------	-----------------------------

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.3}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{177267,27}{177267,27} = 1$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования определяется по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (15)$$

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

a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;

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

n – число параметров сравнения.

В таблице 32 приведён расчёт интегральных показателей ресурсоэффективности.

Таблица 32 – Расчёт интегральных показателей ресурсоэффективности

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Энергосбережение	0,25	5	4	3
2. Устойчивость к сбоям	0,25	4	5	3
3. Возможность устанавливать плагины и приложения для САПР	0,25	3	3	4
4. Производительность	0,25	5	5	5
ИТОГО	1	4,25	4,25	3,75

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{\text{исп.}i}$) основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.тек.пр}} = \frac{I_{\text{р.тек.пр}}}{I_{\text{финр}}^{\text{тек.пр}}} = \frac{4,25}{0,74} = 5,74$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{I_{\text{р.исп.2}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}}} = \frac{4,25}{0,81} = 5,25$$

$$I_{\text{исп.3}} = \frac{I_{\text{р.исп.3}}}{I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}}} = \frac{3,75}{1} = 3,75$$

Исп. № дубл.	Исп. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Подп. и дата
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Сравнение интегральных показателей эффективности разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный из предложенных проектов. Сравнительная эффективность определяется как отношение интегральных показателей эффективности вариантов исполнения разработки.

Сравнительную эффективность определим относительно текущего проекта:

$$\mathcal{E}_{ср.i} = \frac{I_{р.исп.i}}{I_{исп.тек.пр}} \quad (16)$$

Сравнение эффективности вариантов исполнения разработки представлено в таблице 33.

Таблица 33 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,74	0,81	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,25	4,25	3,75
3	Интегральный показатель эффективности	5,74	5,25	3,75
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,91	0,65

Из сравнения интегральных показателей эффективности можно сделать вывод, что текущий проект является наиболее целесообразным исполнением проекта исходя из финансовой и ресурсной эффективности.

Исп. № подл.	Подп. и дата
Исп. № дубл.	Взам. инв. №
Исп. № подл.	Подп. и дата
Исп. № подл.	Исп. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Вывод по разделу

В результате выполнения сформулированных задач раздела, можно сделать следующие выводы:

1. в результате проведённого анализа конкурентных технических решений выяснилось, что разрабатываемый проект является менее конкурентоспособным в сравнении с процессом с полным окислением метанола на серебряном катализаторе, текущий проект уступает аналогу в энергоэффективности, производительности и материалоёмкости; но при этом, процесс на оксидном катализаторе даёт более чистый продукт, что позволяет удовлетворить потребность в качественном формалине;
2. в ходе планирования был разработан календарный план-график работ по проекту, также было определено общее количество календарных дней, необходимых на выполнение проекта – всего 102, при этом инженер должен отработать 97 календарных дней, а руководитель - 7 дней;
3. составлен бюджет исследовательского проекта – всего на проектирование необходимо 130878,87 руб;
4. были рассмотрены различные варианты технического оформления проекта и проведён анализ их финансовой и ресурсной эффективности, в результате чего можно сделать следующие выводы:
 - значение интегрального финансового показателя ИП составляет 0,74, что является показателем того, что проект является более финансово выгодным в сравнении с аналогом;
 - значение интегрального показателя ресурсоэффективности исследовательского проекта составляет 4,25, что не уступает другим исполнениям с показателями 4,25 и 3,75;
 - значение интегрального показателя эффективности ИП составляет 5,74, что превосходит значение для других вариантов оформления (5,25 и 3,75)

Инт. № подл.	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
4Г6Б	Хайров Марк Альбертович

Школа	Новых производственных технологий	Отделение (НОЦ)	Н.М. Кижнера
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	18.03.01 «Химическая технология»

Тема ВКР:

Проектирование реактора окисления метанола в формальдегид	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Объект исследования: каталитический реактор окисления метанола в формальдегид Область применения: производство формалина</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<i>ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования ГОСТ 23000-78. Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования ГОСТ 12.2.049-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие эргономические требования</i>
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<i>Вредные факторы: - превышение уровня шума - воздействие материальных объектов, имеющих высокую температуру Опасные факторы: - воздействие токсичных и мутагенных химических веществ - поражение электрическим током</i>

3. Экологическая безопасность:	<i>Атмосфера: выброс CO₂, выброс АХОВ Гидросфера: загрязнение подземных вод химическими веществами Литосфера: загрязнение почв химическими веществами</i>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<i>Возможные ЧС: пожар, взрыв, выброс АХОВ Наиболее типичное ЧС: выброс АХОВ</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4Г6Б	Хайров Марк Альбертович		

Введение

ВКР направлена на разработку модернизации конструкции реактора окисления метанола с использованием современных САПР для автоматизации расчётно-конструкторской работы, с целью оптимизации параметров конструкции реактора и снижения его металлоёмкости. Потенциальным потребителем данной разработки может выступить предприятие ООО «Сибметакхим» (или «Сибирская метанольная компания») города Томска при модернизации производства формалина.

На рассматриваемом химическом производстве в качестве сырья используется метанол – токсичное и пожаровзрывоопасное вещество, процесс окисления метанола происходит при температурах 260-400 °С [8] и на этом список опасных и вредных факторов не окончен. Таким образом, необходимо разработать мероприятия по снижению вредного воздействия на окружающую среду и сотрудников предприятия, а также по предотвращению ЧС.

Инв. № подл.	Подл. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ					Лист
										142
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата						

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Условия труда на производстве формалина можно приравнять к вредным и опасным. Таким образом, в соответствии с статьёй 92 ТК РФ для работающих во вредных или опасных условиях труда, предусмотрен сокращённый рабочий день – не более 36 часов в неделю. В соответствии с 94 статьёй ТК РФ для таких работников предусмотрен сокращённый рабочий день: не более 8 часов в день при 36-часовой неделе и не более 6 часов в день при 30-часовой рабочей неделе [50].

Отраслевым (межотраслевым) соглашением и коллективным договором, при наличии письменного согласия работника возможно увеличение продолжительности рабочей смены с в пределах еженедельной продолжительности рабочей недели: не более 12 часов в смену при 36-часовой неделе и не более 8 часов в смену при 30-часовой рабочей неделе [50].

Также по статье 147 ТК РФ для лиц, работающих во вредных и (или) опасных условиях труда предусмотрена повышенная оплата труда в размере не менее 4% от оклада [50].

При трудоустройстве работников может возникнуть необходимость сбора и обработки их персональных данных. В этом случае работодатель должен получить письменное согласие работника на обработку персональных данных и согласие на получения этой информации [50].

Так как мы рассматриваем современное автоматизированное производство, то технологическим процессом будут управлять операторы, сидя за креслом пульта управления. Таким образом важно обеспечить эргономичное рабочее место в положении сидя. Высота рабочей поверхности, сидений, параметры пространства для ног и расположение органов управления на рабочей поверхности регламентируются по ГОСТ 12.2.032-78 [51] и определяются для среднего роста мужчины (из расчёта на то, что на рабочие специальности устроены только мужчины). Оптимальная рабочая поза для работающего более низкого роста может создаваться за счёт регулирующегося кресла и подставки для ног.

Инт. № подл.	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	
Инт. № подл.	

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

143

Стол оператора должен обладать достаточным пространством для расположения ног в соответствии с ГОСТ 12.2.032-78 [51].

Поверхность пультов управления не должна создавать бликов, панели пультов управления не должны иметь посторонних элементов, затрудняющих работу оператора [52].

Конструкция производственного оборудования должна обеспечить оптимальное распределение функций между человеком и производственным оборудованием, а также минимальную монотонность труда [53].

6.2 Производственная безопасность

Вредные и опасные условия труда, возникающие на этапе разработки, изготовления и эксплуатации оборудования в соответствии с ГОСТ 12.0.003-2015 [54] представлены ниже в таблице 34.

Таблица 34 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работы		Нормативные документы
	Изготов- ление	Эксп- луатация	
1 Повышенный уровень шума	+	+	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки [55]
2 Воздействие материальных объектов, имеющих высокие температуры	+	+	СНиП 2.04.14-88. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов [56]
3 Воздействие токсичных и мутагенных веществ		+	ГН 2.2.5.3532-18 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны" [57]

Инд. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Инд. № подл.	Инд. № подл.	Подп. и дата
Инд. № подл.	Инд. № подл.	Инд. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

144

Продолжение таблицы 34

4	Поражение электрическим током		+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов [58] ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты [59]
---	-------------------------------	--	---	--

6.3 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Рассмотрим каждый фактор, представленный в таблице 1.

6.3.1 Превышение уровня шума

Повышенный уровень шума на производстве вызывает работа насосов и газодувки.

Шум воздействует на нервную и сердечно-сосудистую систему. Длительное воздействие шума снижает остроту зрения и слуха, приводит к повышенному давлению и снижению концентрации внимания, что может инициировать аварию или несчастный случай [60].

Предельно допустимый уровень звука и эквивалентный уровень звука определяются характером работ (напряжённостью и тяжестью труда). Предельно допустимый уровень звукового давления в рабочей зоне также зависит ещё и от частоты звуковых колебаний. В таблице 35 приведены нормативные показатели для работы оператора технологической установки.

Инт. № подл.	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Взам. инв. №
Инт. № дубл.	Подп. и дата
Инт. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Таблица 35 - Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для работы оператора технологической установки [56]

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
93	79	70	68	58	55	52	52	49	60

На производстве формалина предприятия ООО «Сибметакхим» технологическая установка находится в непосредственной близости от здания, где находятся рабочие места операторов. В этом случае необходима шумоизоляция стен, оконных и дверных проёмов.

На этапе изготовления или во время обслуживания оборудования и обходов технологической установки необходимо использование индивидуальных средств защиты – наушников и затычек по типу беруши.

6.3.2 Воздействие материальных объектов, имеющих высокие температуры

На производстве есть опасность оказаться под воздействием материальных объектов, имеющих высокие температуры. Источниками высокой температуры может быть реактор окисления метанола, химическое превращение здесь происходит при температурах 260-400 °С, дифенильная смесь, охлаждающая реактор, имеет температуру около 257 °С, каталитическое дожигание абгазов в дожигателе происходит при температурах 350-500 °С [8], отходящие газы, прошедшие каталитическое обезвреживание, а затем охлаждение, имеют температуру 130-250 °С [8].

От тепла сосудов материальных потоков, сосудов, аппаратов и трубопроводов человека и окружающую среду должна защитить спецодежда тепловая изоляция, ограждения и знаки. Максимальная допустимая температура внешней

Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Взам. инв. №
Инва. № подл.	Подп. и дата
Инва. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Лист

146

поверхности тепловой изоляции для вещества температурой выше 100°C составляет 45°C [57].

6.3.3 Мероприятия по снижению воздействия токсичных веществ

Утечки токсичных веществ могут происходить через неплотности фланцев, арматуры, уплотнений и машин.

Для предотвращения аварий и несчастных случаев, связанных с утечкой АХОВ необходимо обеспечить герметичность трубопроводов и сосудов перед запуском производства. Также для оповещения сотрудников об утечке необходимо установить датчики контроля воздуха

С целью защиты рабочих от выбросов или утечек необходимо обеспечить их портативными дыхательными устройствами или противогазами.

6.3.4 Поражение электрическим током

В случае работы электроустановки в нормальном (неаварийном) режиме напряжение не должно превышать 2 В, а сила тока не должна превышать 0,3 мА при частоте тока 50 Гц [59].

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме производственных электроустановок напряжением до 1000 В с глухозаземленной или изолированной нейтралью и выше 1000 В с изолированной нейтралью не должны превышать значений, указанных в таблице 36 [59].

Таблица 36 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме [59]

Род тока	Нормируемая величина	Предельно допустимые значения, не более, при продолжительности воздействия тока t, с											
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	Св. 1,0
Переменный 50 Гц	U, В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60	20
	I, мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50	6

Интв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Интв. № подл.	Подп. и дата	
Интв. № подл.		

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

6.4 Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работающего

Для предотвращения происшествий любых видов необходимо информирование сотрудников предприятия, для чего нужно проводить все виды инструктажей инструктаж (вводный, первичный, повторный, внеплановый и целевой). Необходимо развивать культуру техники безопасности среди сотрудников.

Совершенно естественно, что кроме информирования нужно проводить.

6.4.1 Превышение уровня шума

В случае, когда здание, где находятся рабочие места управления технологическим процессом находится в непосредственной близости от технологической линии, необходимы меры по изоляции самого здания как заделка стыков несущих конструкций и соблюдение целостности стен [56].

Повышение изоляции воздушного шума дверями и воротами может быть достигнуто за счет увеличения поверхностной плотности их полотна, за счет плотной пригонки полотна к коробке, за счет устранения щели между дверью (воротами) и полом при помощи порога с уплотняющими прокладками или фартука из прорезиненной ткани или резины, а также за счет применения уплотняющих прокладок в притворах дверей (ворот). Щели и неплотности между коробкой двери или ворот и ограждением, к которому она примыкает, должны быть плотно заделаны безусадочным раствором, упругим материалом. Необходимо также предусматривать запорные устройства, обеспечивающие плотный прижим двери (ворот) к коробке, замочные скважины должны быть закрыты [56].

Для обеспечения повышенной звукоизоляции следует предусматривать проектирование двойных дверей (ворот) с тамбуром, стенки которого облицованы звукопоглощающим материалом [56].

Повышение звукоизоляции окон может быть достигнуто увеличением толщины стекол, увеличением толщины воздушного промежутка между

Интв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Интв. № подл.	Подп. и дата	Интв. № подл.

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

стеклами, уплотнением притворов переплетов, закреплением стекол в переплетах с помощью упругих прокладок, применением запорных устройств, обеспечивающих плотное закрывание окон [56].

В настоящее время наиболее целесообразным является применение готовых конструкций шумозащитных окон, снабженных вентиляционными элементами с глушителями шума или вентиляционными элементами, встроенными в стены или откосы проемов окон [56].

На производстве формалина предприятия ООО «Сибметахим» воплощены все вышеперечисленные меры.

6.4.2 Меры по предотвращению воздействию материальных объектов имеющих, высокие температуры

На сосудах, аппаратах и трубопроводах должна стоять тепловая изоляция, которая покрывает большую часть нагретых поверхностей. У наиболее нагретого оборудования необходимо поставить ограждения. Также необходимо обеспечить герметичность фланцевых соединений.

В качестве одной из основных мер защиты людей от горячих частей оборудования и горячих материальных потоков необходима спецодежда – комбинезоны, перчатки, специальная обувь [62].

Чтобы не допустить поражения работников отходящими каталитически обезвреженными газами, необходима обустроить компоновку таким образом, чтобы контакт работников с отходящими газами было маловероятно.

6.4.3 Мероприятия по снижению воздействия токсичных веществ

С целью ограничения контакта рабочих с токсичными веществами на производстве организовано применение прогрессивной технологии производства, которая включает в себя замкнутый цикл, автоматизацию, комплексную механизацию, дистанционное управление, непрерывность процессов производства, автоматический контроль процессов и операций.

Инт. № дубл.	Инт. № инв. №	Подп. и дата
Инт. № подл.	Инт. № инв. №	Подп. и дата
Инт. № подл.	Инт. № инв. №	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

Кроме того, на производстве осуществляется утилизация абгазов, рекуперация непрореагировавшего метанола и каталитическая очистку газовых выбросов [63].

Также рабочие, находящиеся на производственных площадках должны быть оснащены спецодеждой. Перед допуском к производственным площадкам и к определённым видам работ должны проводиться инструктажи [63].

Для сотрудников предприятия, подверженных вредному и опасному воздействию, необходимо проведение предварительных и периодических медосмотров [63].

6.4.4 Меры по снижению риска поражения электрическим током

Для обеспечения защиты от прямого прикосновения необходимо применять следующие технические способы и средства защиты:

- основная изоляция;
- защитные оболочки;
- защитные ограждения (временные или стационарные);
- защитные барьеры;
- безопасное расположение токоведущих частей, размещение их вне зоны досягаемости частями тела, конечностями;
- ограничение напряжения, применение сверхнизкого (малого) напряжения;
- выравнивание потенциалов;
- защитное отключение;
- ограничение установившегося тока прикосновения и электрического заряда;
- электрическое разделение;
- предупредительная световая, звуковая сигнализации, блокировки безопасности, знаки безопасности;
- электрозащитные средства и другие средства индивидуальной защиты;
- другие способы и средства защиты, которые соответствуют требованиям [60].

Инт. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата
Инт. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

6.5 Экологическая безопасность

При каталитическом обезвреживании части абгазов в атмосферу выделяется CO_2 и пары воды, первый оказывает неблагоприятное воздействие на экологию, внося свой вклад в общий «парниковый» эффект, второе во многих случаях можно отнести к разряду ЧС. Всё же, выброс углекислого газа в атмосферу предпочтительней, чем выброс метанола или формальдегида в атмосферу.

Возможно загрязнение подземных вод и почв в местах хранения и отгрузки сырья и продуктов производства.

В соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 [64] санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов производство формалина на окисном катализаторе, объёмом до 200 тыс. тонн в год относится к классу III по санитарной классификации промышленных объектов и требует санитарно-защитную зону шириной 300 м.

Целостность и герметичность всех элементов оборудования проверяется гидравлическими или пневматическими испытаниями.

Токсичные вещества, присутствующие на производстве представлены ниже (Таблица 37).

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Инв. № подл.	Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата	ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ	Лист
												151

Таблица 37 – Токсичные вещества, присутствующие в производстве формалина [9]

Наименование опасного вещества	Класс опас- ности веществ а	Характеристика токсичности (воздействие на организм человека)	ПДК, опасного вещества мг/м ³	
			макси- мальна я разовая	среднесу- точная
Метанол технический	3	Обладает политропным действием с преимущественным воздействием на нервную систему, печень, почки. Обладает выраженным кумулятивным эффектом. Опасен, вплоть до смертельного исхода, при поступлении через желудочно – кишечный тракт. Слабовыраженное местное действие на кожу, может проникать через неповрежденные кожные покровы	15	5
формальдегид	2	Формальдегид –раздражающий газ, вызывает дегенеративные процессы в паренхиматорных органах, сенсibiliзирует кожу, действует на центральную нервную систему, особенно на зрительные бугры, инактивирует ряд ферментов в органах и тканях, угнетает синтез нуклеиновых кислот, нарушает обмен витамина С, обладает мутагенными свойствами	0.05	0.01
Формалин (37 % мас. по формальдегиду)	2	Токсичность формалина определяется присутствием в нем формальдегида	-	0.5

Интв. № подл.	Подп. и дата
Интв. № дубл.	Взам. инв. №
Интв. № подл.	Подп. и дата
Интв. № подл.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

Для предотвращения загрязнения подземных вод необходимо провести следующие мероприятия [65]:

- необходимо обеспечить водонепроницаемость аккумулирующих емкостей;
- мероприятия по охране вод от загрязнений должны быть основаны на данных инженерно-геологических изысканий, фильтрационных расчетах и прогнозах миграции загрязняющих веществ в подземных водах с учетом особенностей загрязняющих веществ;
- не допускается сооружение аккумулирующих емкостей в зонах питания подземных вод в начале делювиальных или пролювиальных конусов выноса или шлейфов, на нижних речных террасах, сильнотрещиноватых участках, особенно если подземные воды в этих отложениях используются для питьевого водоснабжения.

6.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Во время эксплуатации оборудования производства формалина с окислением метанола на оксидном катализаторе могут возникнуть такие основные виды ЧС, как пожар, взрыв или выброс АХОВ.

Наиболее типичный вид ЧС – выброс АХОВ. Происходит при значительной разгерметизации и быстром выходе метанола или формальдегида из сосудов, аппаратов или трубопроводов.

Для предотвращения ЧС связанных с выбросом АХОВ необходимо убедиться в надёжности и герметичности всех сосудов, аппаратов, трубопроводов и запорной арматуры путём испытаний в соответствии с техническими условиями.

Для предотвращения ЧС прежде всего необходимо, чтобы персонал, обслуживающий технологическую установку, имел достаточную квалификацию и мог своевременно принимать меры по предотвращению аварий.

Рабочие места технологического персонала должны быть укомплектованы технологическими регламентами, планами ликвидации и локализации аварий

Интв. № подл.	Подп. и дата
Интв. № дубл.	Взам. инв. №
Интв. № инв.	Подп. и дата
Интв. № инв.	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

(ПЛА), а также инструкциями согласно перечню для каждого рабочего места, утвержденного главным инженером предприятия.

Для контроля качества воздуха производственной зоны необходима установка датчиков контроля воздуха производственной зоны.

Во время выброса АХОВ персоналу необходимо надеть противогазы или портативные дыхательные устройства перекрыть все вентили и задвижки, прекратить подачу кислорода, метанола, из сети предприятия; абгазы необходимо направить в блок каталитического обезвреживания. Персонал эвакуируется из опасной зоны.

Далее следует локализация места, где произошла утечка, и устранение неполадки.

Выводы по разделу

В разделе проведён анализ основных вредных и опасных факторов производства формалина ООО «Сибметахим», разработаны мероприятия по снижению влияния этих факторов. Также был проведён анализ влияния производства на экологию и рассмотрены мероприятия по предотвращению ЧС, действия во время ЧС и ликвидации ЧС.

Большинство из рассмотренных в данном разделе мер по снижению влияния опасных и вредных факторов, снижению загрязнения окружающей среды, а также и предотвращению и ликвидации ЧС уже введены на производстве формалина предприятия ООО «Сибметахим».

Интв. № подл	Подп. и дата
Интв. № дубл.	Взам. инв. №
Подп. и дата	Подп. и дата

Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата
----	------	----------	-------	------

ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы была проведена оптимизация конструкции реактора окисления метанола в формальдегид производства формалина ООО «Сибметахим», удалось уменьшить массу аппарата почти в три раза, при этом результаты механического расчёта свидетельствуют о надёжности эксплуатации разработанного реактора.

В результате раздела «финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» была обоснована экономическая целесообразность разработки, а также оценена минимальная стоимость проектирования.

В результате раздела «социальная ответственность» были выявлены основные опасные и вредные факторы производства формалина, были разработаны мероприятия по снижению их влияния

Инв. № подл.	Подп. и дата	Инв. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	ФЮРА РОМ 00.00.00 ПЗ					Лист
										155
Ли	Изм.	№ докум.	Подп.	Дата						

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Розанов В. Н. Формальдегид // Химическая энциклопедия: в 5 т. / Н. С. Зефирова (гл. ред.). — М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. — Т. 5: Триптофан—Ятрохимия. — С. 115–116. — 783 с.
- 2 Анализ способов интенсификации абсорбции формальдегида в производстве формалина / Т.А. Сайфутдинов [и др.] // Вестник технологического университета – 2015. Т.18, №24
- 3 Огородников С.К. Формальдегид. – Л.: Химия 1984. – 280 с., ил.
- 4 Анализ закономерностей процесса полимеризации формальдегида для решения экологических проблем в производстве формалина / К.А. Павлова [и др.] // Вестник технологического университета – 2015. Т.18, №24
- 5 Franz A. W., Kronemayer H., Pfeiffer D., Pilz R. D., Reuss G., Disteldorf W., Gamer A. O., Hilt A. Formaldehyde // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. — Wiley, 2016.
- 6 Анализ способа получения формальдегида на железомолибденовых катализаторах и пути его интенсификации / Р.А. Мамадиев [и др.] // Вестник технологического университета – 2015. Т.18, №24
- 7 Исследование влияния параметров процесса на температурные режимы и производительность трубчатого реактора окисления метанола в формальдегид / Е.В. Овчинникова, В.А. Чумаченко, Н.Н. Валуйских – Институт катализа СО РАН // Катализ в промышленности. – 2013 г. - № 4 – 17с.
- 8 Временный технологический регламент производства карбамидоформальдегидного концентрата КФК-85 и формалина марки ФМ, 2015 – 349с.
- 9 Therminol VP-1 [Электронный ресурс]: <http://www.rosma.ru> [сайт]. Режим доступа: http://www.rosma.ru/catalogue/thermofors/Therminol_VP.html., свободный (дата обращения 20.12.2019)
- 10 Окисление метанола для формальдегида. Fe-Mo катализаторы и установки / Süd-Chemie – 43 с.
- 11 Fellah M.F. // J. Catal. 282(1) (2011) p. 191
- 12 Payne W.A., Charleston W.Va. Pat. USA 2519788, 1950.
- 13 Diakov V., Varma A. // Chem. Eng. Sci. 58 (2003) p.801.
- 14 "ПЕРСТОРП ФОРМОКС": процесс получения формальдегида [Электронный ресурс]: <http://newchemistry.ru> [сайт]. Режим доступа: http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=807., свободный (дата обращения 05.06.2020)
- 15 Технология. Производство КФК и формалина [Электронный ресурс]: <https://formalin.ru> [сайт]. Режим доступа: <https://formalin.ru/technology.html>., свободный (дата обращения 23.04.2020)

- 16 Паспорт сосуда, работающего под давлением ЛИМЦ 3146.00.00.000К / ЗАО «Безопасные Технологии» - 45 с.
- 17 Бибин В.Н., Попов Б.И. // Кинетика и катализ. 1969.№ 6. С. 1826.
- 18 Бибин В.Н. Дисс. Институт катализа СО РАН, Новосибирск, 1976. 200 с.
- 19 Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/ Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др. Под ред. Ю. И. Дытнерского, 2-е изд., перераб. и дополн. - М.:Химия, 1991. — 496 с.
- 20 Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – Л: Химия, 1987. - 572с
- 21 Лашинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: Справочник — 3-е изд., стереотипное. -М.: ООО ИД «Альянс», 2008. — 752 с.
- 22 Беляев В.М. Расчет и конструирование основного оборудования отрасли: учебное пособие / В.М. Беляев, В.М. Миронов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 292 с.
- 23 Беляев В.М. Расчет и конструирование основного оборудования отрасли: учебное пособие / В.М. Беляев, В.М. Миронов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 292 с.
- 24 Ульянов В.М. Физико-химические характеристики веществ. Справочник проектировщика химического оборудования: учебное справочное пособие / В.М. Ульянов. – Н.Новгород: Нижегород. Гос. Техн. Ун-т им. Р.Е.Алексеева, 2009. – 309 с.
- 25 Н. В. Верниковская, Ю. В. Малоземов, С. А. Покровская Каталитические процессы в реакторах с неподвижным слоем: Учебно-методическое пособие для компьютерного курса по инженерной химии каталитических процессов / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2008. 68с.
- 26 Машины и аппараты химических, нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств [Электронный ресурс] : учебное пособие / О. К. Семакина; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). — 1 компьютерный файл (pdf; 2.8 МВ). — Томск: Изд-во ТПУ, 2016. — Заглавие с титульного экрана. — Доступ из корпоративной сети ТПУ. Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2016/m096.pdf>
- 27 Хижняков С.В. Практические расчёты тепловой изоляции (для промышленного оборудования и трубопроводов). Изд.3-е.перераб. - М.: Энергия, 1976. 200с.
- 28 Ветра в Томской области [Э. 157 й ресурс]: <http://energywind.ru> [сайт]. Режим доступа: <http://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii/sibir/tomskaya-oblast.>, свободный (дата обращения 20.12.2019).

- 29 АТК 24.218.06-90. Штуцера для сосудов и аппаратов стальных сварных. Типы, основные параметры, размеры и общие технические требования. - Введ. 20.09.90. - М.: Изд-во стандартов, 1990. – 46 с.
- 30 ГОСТ 28759.2-90. Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные. Конструкция и размеры. введ. 01.01.1992. - М.: Стандартиформ, 2005. - 13 с.
- 31 ОСТ 26-2001-83 Люки со скобой стальных сварных сосудов и аппаратов. Конструкция.
- 32 ГОСТ 34233.1 – 2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 2018.-26 с.
- 33 ГОСТ 34233.2 – 2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Расчёт цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. – М.: Изд-во стандартов, 2018.-44 с.
- 34 ГОСТ 19903-2015 Прокат листовой горячекатаный. Сортамент – М.: Стандартиформ, 2016.-15 с.
- 35 ГОСТ 6533-78 Днища эллиптические отбортованные стальные для сосудов, аппаратов и котлов. Основные размеры (с Изменениями N 1, 2).
- 36 ГОСТ 34233.7 – 2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Теплообменные аппараты. – М.: Изд-во стандартов, 2018.-52 с.
- 37 ОСТ 26-02-1015-85. Крепление труб в трубных решётках.
- 38 ОСТ 34-10-569-93. Компенсатор осевой однолинзовый.
- 39 ГОСТ 28759.6-90 Прокладки из неметаллических материалов. Конструкция и размеры. Технические требования.
- 40 ГОСТ 34233.3 – 2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлениях. – М.: Изд-во стандартов, 2018.-41 с.
- 41 ГОСТ 34233.4 – 2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Расчёт на прочность и герметичность фланцевых соединений. – М.: Стандартиформ, 2018.-38 с.
- 42 ГОСТ 26296-84. Лапы опорные подвесных вертикальных сосудов и аппаратов. Основные размеры (с Изменением N 1). - М.: Издательство стандартов, 1984-15 с.
- 43 ГОСТ 34233.5 -2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет обечаек и днищ от воздействия опорных нагрузок. – М.: Стандартиформ, 2018.-35 с.
- 44 Производственный календарь 158 год [Электронный ресурс] [сайт]. URL: <http://www.consultant.ru/law/ref/calendar/proizvodstvennyye/2020/> (дата обращения: 10.05.2020).
- 45 Производственный календарь 2020 при 6-дневной рабочей неделе [Электронный ресурс] [сайт]. URL: <https://www.26-2.ru/art/355088-proizvodstvennyu-kalendar-2020-pri-6-dnevnoy-rabochey-nedele> (дата обращения: 10.05.2020).

- 46 Лазерное МФУ HP LaserJet Pro MFP M28a - Аксессуары [Электронный ресурс] [сайт]. URL: https://www.mvideo.ru/products/lazernoe-mfu-hp-laserjet-pro-mfp-m28a-30032665/accessories?cityId=CityCZ_1638&reff=ggl_tov&gclid=CjwKCAjw7-P1BRA2EiwAXoPWA_kWvB2MkvnC-yBAdpGoUEnYDs4hlulEaFxDgB8sensTMSTs8rXnBBoCH2wQAvD_BwE (дата обращения: 11.05.2020).
- 47 Бумага для принтера A4 Canon Black Label Plus A4 80g 500л [Электронный ресурс] [сайт]. URL: <https://www.mvideo.ru/products/bumaga-dlya-printera-a4-canon-black-label-plus-a4-80g-500l-30028226> (дата обращения: 12.05.2020).
- 48 К какой амортизационной группе отнести ноутбук? [Электронный ресурс] [сайт]. URL: <https://www.klerk.ru/buh/articles/194684/> (дата обращения: 12.05.2020).
- 49 Принтер (амортизационная группа, ОКОФ) [Электронный ресурс] [сайт]. URL: <https://taxslov.ru/ag/ag3.htm> (дата обращения: 12.05.2020).
- 50 Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения: 02.05.2020).
- 51 ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 9 с.
- 52 ГОСТ 23000-78. Система «человек-машина». Пульты управления. Общие эргономические требования – М.: Издательство стандартов, 1987. – 12 с.
- 53 ГОСТ 12.2.049-80 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование производственное. Общие эргономические требования – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 15 с.
- 54 ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация – М.: Стандартинформ, 2016. – 16 с.
- 56 СН 2.2.4/2.1.8.562-96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 18 с.
- 57 СНиП 2.04.14-88. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов/Госстрой России. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1998. - 28 с.
- 58 ГН 2.2.5.3532-18 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны" // Гигиенические нормативы
- 59 ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 7 с.

- 60 ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты – М.: Стандартинформ, 2019. – 15 с.
- 61 Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств. Охрана труда: учебное пособие для вузов / П.П. Кукин и др. - 5-е изд., стер. - М.: Высшая школа, 2009. - 335 с.
- 62 "Правила техники безопасности при эксплуатации тепломеханического оборудования электростанций и тепловых сетей. РД 34.03.201-97" (утв. Минтопэнерго России 03.04.1997) (по состоянию на 03.04.2000) (ред. от 22.02.2000) [Электронный ресурс] [сайт]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_256310/ (дата обращения: 03.05.2020).
- 63 ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2007. – 7 с.
- 64 Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 25 сентября 2007 г. N 74 "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" [Электронный ресурс] [сайт]. URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/12158477/paragraph/41638:0> (дата обращения: 04.05.2020).
- 65 ГОСТ 17.1.3.06-82 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к охране подземных вод // Контроль качества воды: Сб. ГОСТов. - М.: Стандартинформ, 2010.