

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

---

**Инженерная школа новых производственных технологий**  
**Научно-образовательный центр Н.М. Кижнера**  
Направление подготовки 18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии  
Профиль Машины и аппараты химических и нефтехимических производств

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Узел термостатирования реактора полимеризации пропилена с разработкой основного оборудования</b>

УДК 678.6'42.02:66.095.2.023.22

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ61	Колесников Андрей Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ Н.М. Кижнера	Семакина О.К.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент Отделения социально- гуманитарных наук	Креницына З.В.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор Отделения контроля и диагностики	Ахмеджанов Р. Р.	д.б.н.		

По разделу «Конструктивно-механический раздел»

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

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Краснокутская Е.А.	д.х.н., профессор		

Томск – 2018 г.

## Запланированные результаты обучения по ООП 18.04.02 в 2018 г.

Код результата	Формулировка цели
P1	способность к абстрактному мышлению, анализу, синтезу
P2	готовность действовать в нестандартных ситуациях, нести социальную и этическую ответственность за принятые решения
P3	готовность к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала
P4	готовность к коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач профессиональной деятельности
P5	готовность руководить коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
P6	способность к профессиональной эксплуатации современного оборудования и приборов в соответствии с направлением и профилем подготовки
P7	готовность к использованию методов математического моделирования материалов и технологических процессов, к теоретическому анализу и экспериментальной проверке теоретических гипотез
P8	готовность к защите объектов интеллектуальной собственности и коммерциализации прав на объекты интеллектуальной собственности
P9	способность формулировать научно-исследовательские задачи в области реализации энерго- и ресурсосбережения и решать их
P10	способность организовать самостоятельную и коллективную научно-исследовательскую работу
P11	готовность к поиску, обработке, анализу и систематизации научно-технической информации по теме исследования, выбору методик и средств решения задачи
P12	способность использовать современные методики и методы, в проведении экспериментов и испытаний, анализировать их результаты и осуществлять их корректную интерпретацию;
P13	способность составлять научно-технические отчеты и готовить публикации по результатам выполненных исследований
P14	готовность разрабатывать математические модели и осуществлять их экспериментальную проверку
P15	готовность к разработке мероприятий по энерго- и ресурсосбережению, выбору оборудования и технологической оснастки
P16	готовность к разработке технических заданий на проектирование и изготовление нестандартного оборудования
P17	способность к анализу технологических процессов с целью повышения показателей энерго-и ресурсосбережения, к оценке экономической эффективности технологических процессов, их экологической безопасности
P18	способность оценивать инновационный и технологический риски при внедрении новых технологий
P19	способность разрабатывать мероприятия по комплексному использованию сырья, по замене дефицитных материалов
P20	способность создавать технологии утилизации отходов и системы обеспечения экологической безопасности производства
P21	способность оценивать экономические и экологические последствия принимаемых организационно-управленческих решений

Код результата	Формулировка цели
P22	готовность к организации работы коллектива исполнителей, принятию решений и определению приоритетности выполняемых работ
P23	способность находить оптимальные решения при создании продукции с учетом требований качества, надежности, стоимости и экологической безопасности производств
P24	способность использовать современные системы управления качеством в конкретных условиях производства на основе международных стандартов
P25	готовность разрабатывать информационные системы планирования и управления предприятием
P26	способность к проектной деятельности в профессиональной сфере на основе системного подхода и использования моделей для описания и прогнозирования ситуаций, осуществления качественного и количественного анализа процессов в целом и отдельных технологических стадий
P27	способность формулировать задания на разработку проектных решений
P28	готовность к проведению патентных исследований с целью обеспечения патентной чистоты новых проектных решений и определения показателей технического уровня проекта
P29	способность проводить технические и технологические расчеты по проектам, технико-экономической, функционально-стоимостной и эколого-экономической эффективности проекта
P30	готовность к оценке инновационного потенциала проекта
P31	способность использовать пакеты прикладных программ при выполнении проектных работ
P32	способность разрабатывать методические и нормативные документы, техническую документацию, а также предложения и мероприятия по реализации разработанных проектов и программ
P33	готовность к разработке учебно-методической документации для обеспечения учебного процесса
P34	готовность к постановке новых лабораторных работ и проведению практических занятий

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

---

**Инженерная школа новых производственных технологий**

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

**Направление подготовки** 18.04.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии

**Профиль** Машины и аппараты химических и нефтехимических производств

**УТВЕРЖДАЮ:**

Руководитель НОЦ Н.М. Кижнера

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

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

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

Студенту:

Группа	ФИО
4КМ61	Колесников Андрею Евгеньевичу

Тема работы:

Узел термостатирования реактора полимеризации пропилена с разработкой основного оборудования

Утверждена приказом директора (дата, номер)

23.03.2018г. №2085/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

**Исходные данные к работе**

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Рассчитать реактор непрерывного действия для получения порошка полипропилена суспензионным методом. Исходные данные:

- давление в реакторе: 0.6 – 0.9 МПа;
- температура в реакторе: 60 °С;
- температура воды на входе в реактор : 20 °С;
- температура воды на выходе из реактор: 30 °С;
- для первичного разогрева реактора используется пар с давлением 0,4 МПа и температурой 135 °С;
- нагрузка реактора по пропилену - 4000 кг/ч.

По результатам расчёта теплового баланса подобрать рубашку реактора, мешалку.

По результатам расчёта реактора подобрать кожухотрубчатый теплообменник для охлаждения (деминерализованной) воды из реактора. Исходные данные:

	- начальная температура оборотной воды: 12 °С; -конечная температура оборотной воды: 25 °С; -рабочее давление в трубном пространстве: 0.25 МПа; -рабочее давление в межтрубном пространстве: 0,6 МПа;
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  (аналитический обзор по литературным источникам).	Глава 4. Гранулирование порошкообразных отходов полипропилена
<b>Перечень графического материала</b>  (с точным указанием обязательных чертежей)	Листов формата А1: 1. Реактор полимеризации ВО; 2. Выносные элементы реактора полимеризации ВО; 3. Торцевое уплотнение реактора ВО; 4. Кожухотрубчатый теплообменник ВО; 5. Выносные элементы теплообменника ВО; 6. Технологическая схема; 7. Результаты исследования по теме «Гранулирование порошкообразных отходов полипропилена»; 8. Техничко-экономические показатели.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  (с указанием разделов)	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Креницына З.В.
Социальная ответственность	Ахмеджанов Р. Р.
Конструктивно-механический раздел	Беляев В.М.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Приложение А – английский язык.	

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Семакина О.К.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4КМ61	Колесников Андрей Евгеньевич		

## Оглавление

<b>Реферат</b>	9
<b>Введение</b>	11
<b>1 Описание технологической схемы</b>	13
<b>2. Расчёт реактора полимеризации</b>	17
2.1 Материальный баланс	17
2.2 Технологический расчёт реактора полимеризации	20
2.2.1 Тепловой расчёт реактора	20
2.2.2 Расчёт поверхности теплообменных устройств	27
2.2.3 Подбор мешалки	34
2.3 Механический расчёт реактора	41
2.3.1 Расчётные параметры	44
2.3.2 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки	44
2.3.3 Расчёт толщины стенки эллиптических днищ	47
2.3.4 Расчёт толщины стенки рубашки	51
2.3.5 Расчёт вала на прочность, жёсткость и виброустойчивость	54
2.3.6 Расчёт и подбор штуцеров для реактора полимеризации	66
2.3.7 Расчёт необходимости укрепления отверстий	69
2.3.8 Подбор стандартной опоры аппарата	63
<b>3. Расчёт кожухотрубчатого теплообменника</b>	81
3.1 Технологический расчёт теплообменника	81
3.2 Конструктивный расчёт теплообменника	90
3.2.1 Подбор стандартного теплообменника	90
3.2.2 Подбор штуцеров для входа и выхода теплоносителей	93
3.3 Механический расчёт теплообменника	96
3.3.1 Расчётные параметры	96
3.3.2 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки	99
3.3.3 Расчёт толщины стенки эллиптического днища	102
3.3.4 Расчёт толщины стенки распределительной (входной) камеры	105
3.3.5 Расчёт температурных деформаций	107
3.3.6 Подбор фланцев и прокладок для обечаек и днищ	109
3.3.7 Подбор продольных и поперечных перегородок	110
3.3.8 Расчёт толщины трубной решётки	111
3.3.9 Расчёт развальцовочного соединения	113

3.3.10	Расчёт на прочность и герметичность фланцевых соединений	114
3.3.11	Расчет плоских круглых крышек с дополнительным краевым моментом	126
3.3.12	Расчёт необходимости укрепления отверстий	129
3.3.13	Расчёт стандартной опоры аппарата	136
3.4	Расчет тепловой изоляции	141
3.5	Гидравлический расчёт	142
<b>4.</b>	<b>Гранулирование порошкообразных отходов полипропилена</b>	<b>146</b>
4.1	Литературный обзор	146
4.2	Экспериментальная часть	148
<b>5.</b>	<b>Ресурсоэффективность и финансовый менеджмент</b>	<b>156</b>
5.1	Обоснование необходимых инвестиций для внедрения инженерных решений	156
5.2	Расчет затрат на производство продукции	159
5.2.1	Расчёт себестоимости продукции до модернизации	159
5.2.2	Расчёт себестоимости продукции после модернизации	162
5.3	Расчет экономической эффективности инвестиционных показателей в случае внедрения инновационного проекта	165
5.3.1	Расчет чистого денежного потока	165
5.3.2	Расчет чистого дисконтированного дохода, индекса доходности, внутренней ставки доходности и срока окупаемости проекта	166
5.3.3	- Определение технико-экономических показателей	169
<b>6.</b>	<b>Социальная ответственность</b>	<b>171</b>
6.1	Производственная безопасность	171
6.2	Анализ вредных выявленных факторов при эксплуатации проектируемого оборудования	173
6.2.1	Опасность поражения дыхательных путей и кожных покровов химическими реагентами	173
6.2.2	Производственный шум и вибрация	174
6.2.3	Производственное освещение	175
6.2.4	Микроклимат помещения	176
6.3	Анализ опасных выявленных факторов при эксплуатации проектируемого оборудования	177
6.3.1	Поражение электрическим током	177

6.3.2	Подвижные части производственного оборудования	179
6.3.3	Повышенная температура поверхности оборудования	180
6.4	Обоснование мероприятий по защите персонала от действия опасных и вредных факторов	180
6.4.1	Защита дыхательных путей и кожных покровов от воздействия химических реагентов	180
6.4.2	Защита от производственного шума и вибрации	181
6.4.3	Поддержание микроклимата помещения	182
6.4.4	Поражение электрическим током	183
6.4.5	Защита от подвижных части производственного оборудования	184
6.4.6	Повышенная температура поверхности оборудования	185
6.5	Экологическая безопасность	186
6.5.1	Анализ влияния объекта исследования на атмосферу	186
6.5.2	Анализ влияния объекта исследования на гидросферу	187
6.5.3	Анализ влияния объекта исследования на литосферу	188
6.6	Анализ «жизненного цикла» объекта исследования	188
6.7	Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	189
6.8	Безопасность в чрезвычайных ситуациях	190
6.8.1	Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	190
6.8.2	Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	193
6.9	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	195
	<b>Заключение</b>	197
	<b>Список научных трудов</b>	198
	<b>Список литературы</b>	199
	<b>Приложение А</b>	201
	<b>Приложение Б</b>	213



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки и 8 листов графического материала форма А1. Пояснительная записка содержит 212 с., 1 схемы, 46 рис., 74 табл., 42 источник и 2 приложения.

Ключевые слова: разработка, реактор полимеризации, кожухотрубчатый теплообменник.

Объектом исследования являются реактор полимеризации, кожухотрубчатый теплообменник.

Цель работы – рассчитать и подобрать реактор полимеризации и кожухотрубчатый теплообменник для производства полипропилена мощностью 4000 кг/ч по пропилену.

В процессе исследования проводилось изучение и расчёт оборудования для производства полипропилена.

В результате исследования был рассчитан реактор полимеризации и кожухотрубчатый теплообменник под заданную производительность.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: производительность по полипропилену – 4000 кг/ч; давление 0.6–0.9 МПа; температура реакции 60 °С; температура охлаждающей воды 12 °С.

Область применения: нефтехимическая промышленность.

## The Abstract

Graduation qualification work consists of an explanatory note and 8 sheets of graphic material form A1. The explanatory note contains 212 pages, 1 scheme, 46 images, 74 tables, 42 source and 2 annexes.

Keywords: development, polymerization reactor, shell-and-tube heat exchanger.

The object of the study is a polymerization reactor, a shell-and-tube heat exchanger.

Purpose - calculate and select a polymerization reactor and a shell-and-tube heat exchanger for the production of polypropylene with a capacity of 4000 kg / h by propylene.

In the process of research, the study and calculation of equipment for the production of polypropylene was carried out.

As a result of the study, a polymerization reactor and a shell-and-tube heat exchanger were calculated for a given productivity.

The basic design, technological and technical-operational characteristics: productivity on polypropylene – 3000 kg / h; pressure 6–9 kgf / cm<sup>2</sup>; reaction temperature 60 °C; cooling water temperature 12 °C.

Scope: petrochemical industry.

## Введение

ООО «Томскнефтехим» – нефтехимическое предприятие в городе Томске, входит в состав ОАО «СИБУР Холдинг». Предприятие выпускает полипропилен, полиэтилен высокого давления (ПЭВД), а также бутилен-бутадиеновую фракцию, тяжёлую смолу пиролиза, жидкие продукты пиролиза. Продукция предприятия имеет широкий спрос в России и за рубежом. Остановимся на получении полипропилена.

В настоящее время получение порошка полипропилена (сополимера пропилена с этиленом) ведётся суспензионным методом. Сущность метода заключается в том, что в реактор полимеризации подаются реагенты (пропилен, этилен, водород, донор, триэтилалюминий и катализатор), которые в среде растворителя нефрас – С вступают в химическую реакцию и образуют суспензию полипропилена в растворителе.

Реакция полимеризации является экзотермической, т.е. проходит с выделением тепла. Для отвода избыточного тепла из зоны реакции полимеризации или для первоначального разогрева, реакторы снабжены замкнутой системой термостатирования, в которой циркулирует деминерализованная вода. Нагретая после реактора деминерализованная вода проходит через пластинчатый теплообменник, где охлаждается оборотной водой, и снова поступает в рубашку реактора. Эта система поддерживает заданную температуру в реакторе, что обеспечивает высокое качество полимера и бесперебойную работу установки.

На производительность реактора полимеризации влияет количество подаваемого катализатора, чем больше подаётся катализатора, тем больше образуется порошка полипропилена, однако и температура в реакторе также начинает увеличиваться. Неконтролируемое повышение температуры в реакторе может привести к образованию конгломерата – затвердевшего пласта полимера. А это является аварийной ситуацией и влечёт за собой долгосрочный ремонт.

Выявлено, что существующая система термостатирования не способна удерживать температуру в заданных рамках при повышенных нагрузках. Одним из путей решения сложившейся проблемы является модернизация узла термостатирования. А именно необходима замена пластинчатого теплообменника на кожухотрубчатый теплообменник большей мощности и модернизация рубашки реактора.

Задачей дипломной работы являться расчёт реактора полимеризации при повышении производительности на 25 %, а также расчёт кожухотрубчатого теплообменника для замены существующего. В качестве ожидаемого результата модернизация узла позволит увеличить производительность реактора без ущерба качеству продукта.

## 1. Описание технологической схемы

Узел полимеризации пропилена предназначен для наработки порошка полипропилена (гомополимера и сополимеров пропилена с этиленом (рис. 1.1).

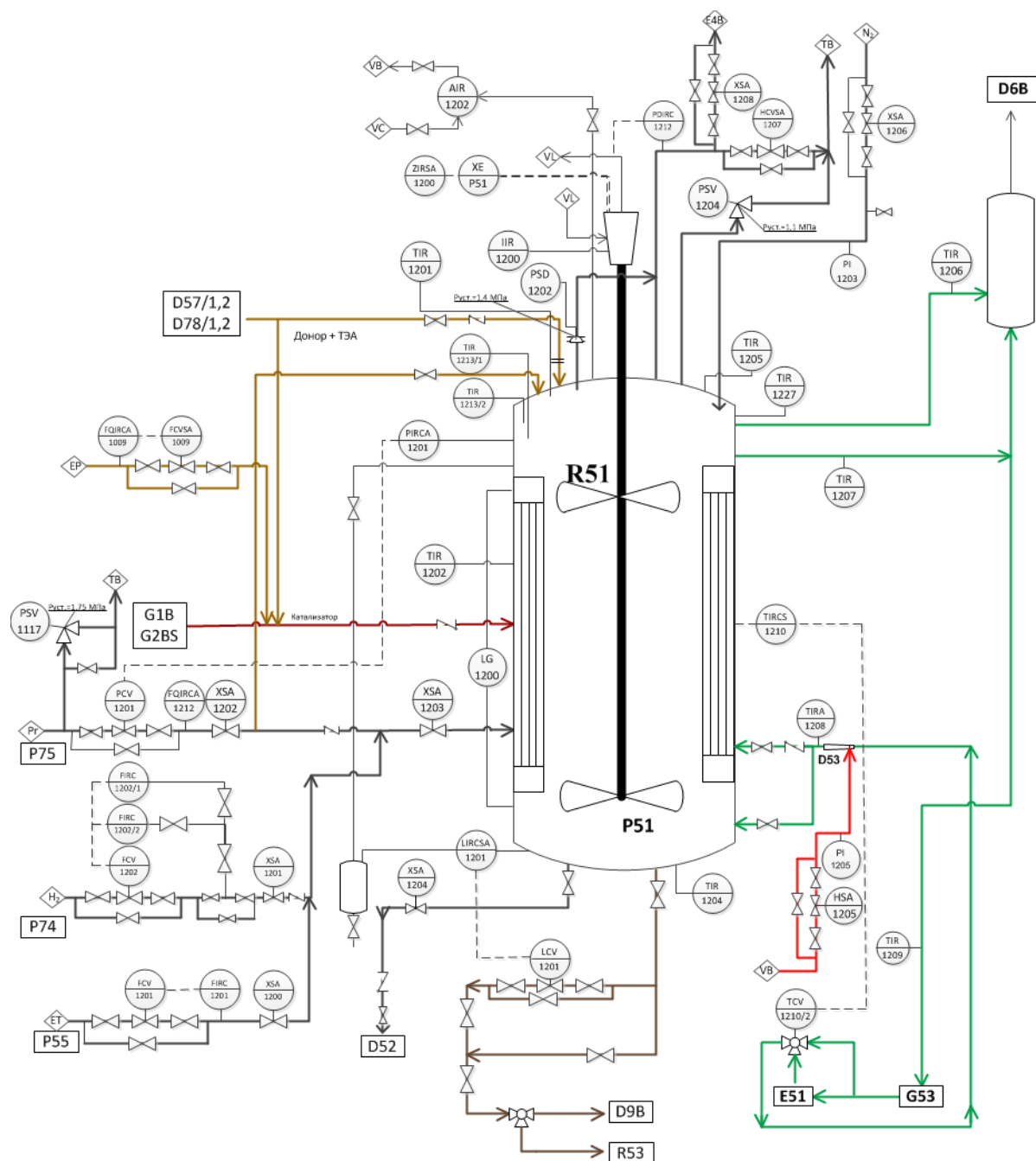


Рисунок 1.1. Технологическая схема узла полимеризации полипропилена.

Реакция полимеризации пропилена ведется непрерывно в реакторах в среде растворителя - нефраса. В качестве регулятора молекулярной массы используется водород. Катализатором реакции служит каталитический

комплекс, состоящий из титаномагниевого катализатора, триэтилалюминия и донора (используемого в качестве стерео-регулятора)

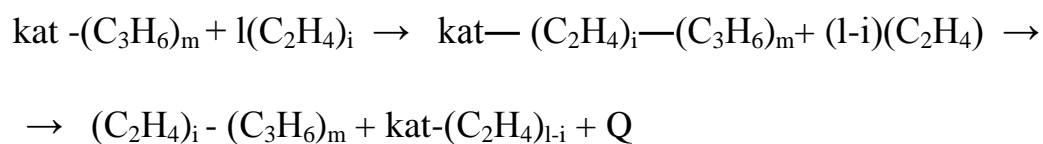
В состав узла входят:

- реактор R51;
- фильтры P55/55S, P75/75S, P73S, P74/74S, P76/76S, P78/78S/79;
- насосы G-53/53S, G-1B, G-2BS;
- теплообменник E51,
- расширительный бак D6A;
- смеситель D53;
- мешалка P51;
- трубопроводы и коммуникации, связывающие вышеперечисленное оборудование, запорная арматура, предохранительные устройства, контрольно-измерительные приборы, а также помещения, где расположено оборудование.

Реактор R51 - цилиндрическая вертикальная емкость, вместимостью 42,9 м<sup>3</sup>, с рубашкой и волнорезами, где циркулирует деминерализованная вода.

В реакторе полимеризации происходит химическая реакция образования полипропилена на металлоорганических (Al-Ti-Mg) катализаторах Циглера-Натта. Титанмагниевый катализатор – основной компонент каталитической системы полимеризации пропилена. Данный тип реактора позволяет получать полипропилен различных марок, а также получать порошок гомополимера пропилена и сополимеров пропилена с этиленом.

Реакция полимеризации и сополимеризации имеет экзотермический эффект и протекает по следующему уравнению:



Процесс сополимеризации пропилена и этилена в реакторе ведётся непрерывно при температуре не более 80 °С и давлении 4-7) кгс/см<sup>2</sup>.

Для отведения теплоты из реакционной массы реактор снабжён рубашкой и волнарезами, где циркулирует деминерализованная вода. Также реактор снабжён мешалкой. На валу мешалки закреплены 2 типа мешалок. Первый тип мешалки – лопастная - находится в газовой фазе и способствует её перемешиванию. Второй тип мешалки – турбинная - находится в суспензии фазе и способствует её перемешиванию суспензии и теплообмену с рубашкой и волнарезами. Волнорезы необходимы для интенсификации перемешивания и теплообмена.

Для отвода избыточного тепла из зоны реакции полимеризации или для первоначального разогрева реакторы снабжены замкнутой системой термостатирования, в которой циркулирует деминерализованная вода.

Система термостатирования каждого реактора состоит из теплообменника, охлаждаемого обратной водой, основного и резервного насоса термостатирования, 3-х ходового регулирующего клапана, парожектора и расширительной ёмкости.

В зависимости от температуры суспензии в реакторе регулирующийся клапан меняет расход деминерализованной воды через теплообменник.

В настоящий момент используется разборный пластинчатый теплообменник с поверхностью теплообмена  $S_{т/о} = 262,6 \text{ м}^2$ . В него поступает деминерализованная вода из реактора с температурой 20-40 °С и обратная вода с температурой 10-25 °С в зависимости от времени года. На трубопроводе обратной воды установлен фильтр грубой очистки для защиты теплообменника от попадания частиц, уносимых с градирни охлаждения.

Для предварительного разогрева реакторов на трубопроводе деминерализованной воды установлен парожектор, в который подается пар при давлении 0,4 МПа и температурой 135 °С.

Циркуляция деминерализованной воды по контуру термостатирования осуществляется насосами.

Для компенсации температурных расширений, во избежание утечек воды из цикла имеется расширительная ёмкость D-6A.



## 2. Расчёт реактора полимеризации

### 2.1 Материальный баланс

Материальный баланс химических процессов составляют для определения количества перерабатываемых и получаемых веществ. Расчёт материального баланса ведётся согласно методике, изложенной в [1].

В ходе научно-производственной практики была изучена технология получения полипропилена. Были выявлены химические вещества, участвующие в полимеризации, а также соотношение реагентов для получения товарной марки полипропилена. Результаты представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Вещества участвующие в полимеризации и их соотношение

№, п/п	Компонент	Обозначение	Соотношение (вещество/вещество)	Соотношение (значение)
1	Нефрас	G(ne)	нефрас/пропилен	1,12
2	ТЭА	G(tea)	ТЭА/гептан	0,008
3	Катализатор	G(kat)	-	-
4	Пропилен	G(pr)	-	-
5	Этилен	G(et)	этилен/пропилен	0,028
6	Водород	G(hyd)	водород/пропилен	0,0000065
7	Фугат	G(fug)	фугат/нефрас	0,1
8	Донор	G(don)	донор/ТЭА	0,205

В соответствии с представленными соотношениями задаём расход основного мономера - пропилен. На данный момент рабочая нагрузка по пропилену составляет 3000 кг/ч на 1 реактор. Увеличиваем нагрузку до 4000 кг/ч и составляем материальный баланс.

В табл. 2.2 обозначим входящие в реактор полимеризации вещества и их количество.

Таблица 2.2 – Приход веществ в реактор полимеризации

Приход				
№, п/п	Компонент	Обозначение	кг/ч	% масс
1	Нефрас	G(ne)	4480	48,78467
2	ТЭА	G(tea)	35,84	0,390277
3	Катализатор	G(kat)	100	1,088943
4	Пропилен	G(pr)	4000	43,55774
5	Этилен	G(et)	112	1,219617
6	Водород	G(hy)	0,026	0,000283
7	Фугат	G(fg)	448	4,878467
8	Донор	G(dn)	7,3472	0,080007
<b>Итого:</b>			<b>9183,213</b>	<b>100</b>

Согласно таблице зададим значения расходов входящих в реактор веществ. Реагенты связаны между собой соотношением (вещество/вещество) по табл.2.1.

Количество пропилена, подаваемого в реактор, кг/ч:

$$G_{PR} := 4000$$

Количество нефраса (растворителя) подаваемого в реактор, кг/ч:

$$G_{NE} := 1.12 \cdot G_{PR} = 4.48 \times 10^3$$

Количество этилена подаваемого в реактор, кг/ч:

$$G_{ET} := 28 \cdot 10^{-3} \cdot G_{PR} = 112$$

Количество водорода подаваемого в реактор, кг/ч:

$$G_{HYD} := 0.65 \cdot 10^{-5} \cdot G_{PR} = 0.026$$

Количество триэтилалюминия (ТЭА) подаваемого в реактор, кг/ч:

$$G_{TEA} := 8 \cdot 10^{-3} \cdot G_{NE} = 35.84$$

Количество фугата подаваемого в реактор, кг/ч:

$$G_{FUG} := 0.1 \cdot G_{NE} = 448$$

Количество донора подаваемого в реактор, кг/ч:

$$G_{DON} := 0.205 \cdot G_{TEA} = 7.347$$

Количество катализатора подаваемого в реактор, кг/ч:

$$G_{\text{КАТ}} := 100$$

Непосредственно в химическую реакцию вступают: пропилен, этилен, водород и катализатор. Нефрас (гептан) является средой, где происходит химическая реакция. Донор и триэтилалюминий являются сокатализаторами.

Расход основных реактивов, кг/ч:

$$G_{\text{реакт.}} := G_{\text{PP}} + G_{\text{ET}} + G_{\text{HYD}} + G_{\text{КАТ}} = 4.212 \times 10^3$$

При проведении производственного процесса масса готового продукта получается меньше теоретической заданной. Это объясняется тем, что реакции могут идти не до конца, образуются побочные продукты, не все реагенты вступают в реакцию, есть механические потери и так далее.

Отношением количества фактически полученного готового продукта к теоретическому выходу готового продукта называется выходом или степенью превращения [1, стр. 181].

На основании данных режимных листов на действующем предприятии (расход реагентов, выход готового полипропилена, количества смолистого нефраса, объёмы «сдувок» непрореагировавшего газа) была выявлена закономерность, что степень превращения пропилена составляет 73–78 %.

Зададим степень превращения:

$$X_{\text{ПП}} := 0.70$$

В таблице обозначим выходящие из реактора полимеризации вещества и их количество.

Таблица 2.3 - Расход веществ из реактора полимеризации

Расход				
№, п/п	Компонент	Обозначение	кг/ч	% масс
1	Полипропилен	G(PP)	3121,028	33,98623
2	Смолистый нефрас	G(SN)	5071,187	55,22236
3	Непрореагировавший газ	G(NG)	990,9983	10,79141
<b>Итого:</b>			<b>9183,213</b>	<b>100</b>

Согласно таблице 2.3 зададим значения расходов выходящих из реактора веществ.

Количество полипропилена, полученного в реакторе, кг/ч:

$$G_{PP} := 3121.02$$

Количество смолистого нефраса, выходящего из реактора, кг/ч:

$$G_{SN} := 5071.18$$

Количество непрореагировавшего газа, выходящего из реактора, кг/ч:

$$G_{NG} := 990.998$$

Таким образом, количество веществ входящих в реактор полимеризации совпадает с количеством веществ выходящих из реактора, а это значит, что материальный баланс составлен верно.

## **2.2 Технологический расчёт реактора полимеризации**

### **2.2.1 Тепловой расчёт реактора**

Тепловой расчёт реактора (рис. 2.1) заключается в определении поверхности теплообмена выбранного теплообменного устройства. Методика теплового расчёта реактора определяется конструктивным оформлением теплообменного устройства и принципами организации процесса, а также зависит от производительности, времени и теплового эффекта реакции, реологических и теплофизических свойств среды, допустимой разности температур и требований к качеству продукта. Расчёт теплового баланса ведётся согласно методике, указанной в [1, стр. 183].

Все промышленные химические процессы должны проводиться при строго определённых заданных температурных условиях и в большинстве случаев требуют подвода и отвода теплоты. Тепловой расчёт сводится в основном к составлению теплового баланса процесса, определению количества подводимой или отводимой теплоты, определению расхода теплоносителей или хладагентов и вычисления площади поверхности теплообмена.

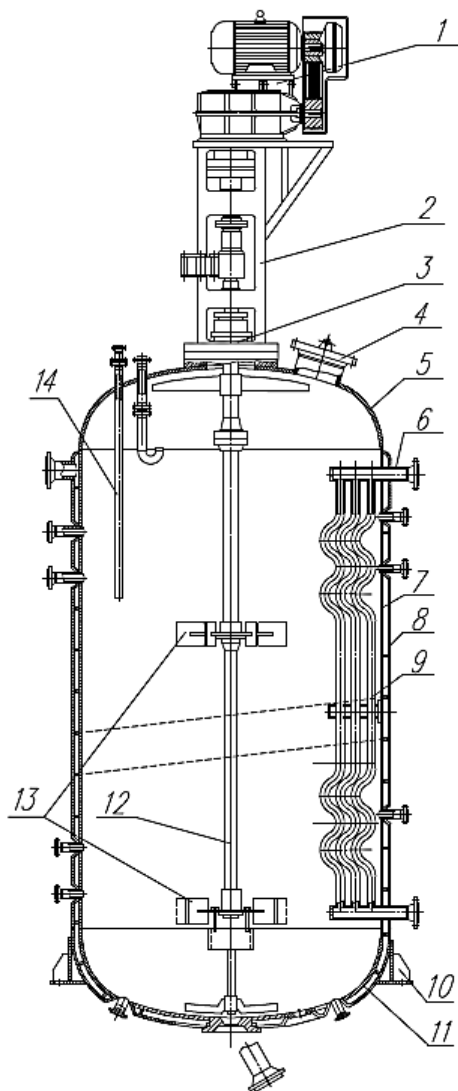


Рисунок 2.1. Реактор для синтеза сополимера этилена с пропиленом:

- 1–мотор-редуктор; 2–стойка;
- 3–торцевое уплотнение; 4–люк;
- 5–крышка; 6–штуцер; 7–обечайка;
- 8–рубашка; 9–волнорез; 10–опора;
- 11–днище; 12–вал; 13–мешалка;
- 14–гильза.

Уравнение, выражающее тепловой баланс химического процесса, может быть представлено общей формулой:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6$$

Здесь  $Q_1$ -теплота, подводимая в аппарат с перерабатываемыми веществами;  $Q_2$ -теплота, отводимая теплоносителем перерабатываемыми веществами или отводимое охлаждающими агентами;  $Q_3$ -тепловой эффект химического процесса;  $Q_4$ -теплота, уносимая из аппарата с продуктами реакции;  $Q_5$ -теплота, расходуемая на нагревание аппарата (при проведении непрерывных процессов  $Q_5$  не учитывается);  $Q_6$ -тепловые потери в окружающую среду.

Тепловой эффект химического процесса представляет собой суммарное количество теплоты, которая выделяется или поглощается при протекании химических реакций и сопровождающих их физико-химических процессов:

$$Q_3 = Q_p + Q_{ф.п.}$$

Здесь  $Q_p$ -тепловой эффект химического процесса, кДж;  $Q_{ф.п.}$ -тепловой эффект физического процесса, кДж.

Тепловой эффект химической реакции определяют по теплотам образования из элементов реагирующих и образующихся соединений.

$$Q_p = \Delta H_0 \cdot \eta$$

$\Delta H_0$  -теплота образование полипропилена, кДж/моль [2, стр. 46]:

$$\Delta H_0 := 75.2$$

Принимаем ориентировочный объем реактора равным  $50\text{ м}^3$ :

$$V_{\text{теор.апп}} := 50$$

Коэффициент заполнения реактора принимаем 80%.

По правилу аддитивности вычисляем плотность смеси реагентов и заносим в табл. 2.4. Справочные данные взяты из справочника [3].

Таблица 2.4 – Физико-химические свойства веществ

Компонент	Плотность, кг/ м3	Массовая доля	Молекулярная масса
Пропилен	609	0,972756495	42,08
Этилен	1,178	0,027237182	28,05
Водород	0,0898	6,32292E-06	2
<b>Среднее значение</b>	<b>592,44</b>	<b>-</b>	<b>41,64468</b>

Принимаем плотность реагентов, кг/м3:

$$\rho_{\text{реаг.}} := (\rho_{\text{пр}} \cdot \chi_{\text{пр}}) + (\rho_{\text{эт}} \cdot \chi_{\text{эт}}) + (\rho_{\text{вод}} \cdot \chi_{\text{вод}}) = 592.441$$

Масса реагентов в аппарате, кг:

$\chi_{\text{реаг.}} := 0.4355 + 0.0122 + 2.83 \cdot 10^{-6} = 0.448$  -доля реагентов в массе веществ в реакторе (пропилен+этилен+водород).

$$m_{\Sigma \text{вещ.}} := (0.8V_{\text{теор. апп.}} \cdot \rho_{\text{реаг.}} \cdot X_{\text{реаг.}}) \cdot 1000 = 1.089 \times 10^7$$

Суммарная молекулярная масса реагентов, г:

$$M_{\Sigma \text{вещ.}} := 42.08 + 28.05 + 2 = 72.13$$

Количество моль вещества, г/г:

$$\eta := \frac{m_{\Sigma \text{вещ.}}}{M_{\Sigma \text{вещ.}}} = 1.509 \times 10^5$$

Тепловой эффект химической реакции, кДж:

$$Q_p := \Delta H_0 \cdot \eta = 1.135 \times 10^7$$

Теплоты физического процесса испарения определяем по справочнику [3] и заносим в табл. 2.5.

Таблица 2.5 - Теплоты физического процесса испарения

Вещество	Удельная теплота испарения, кДж/кг	Обозначение
Пропилен	440	q.i.пр.
Этилен	482	q.i.эт.
Водород	455	q.i.вод.

Тепловой эффект физического процесса, кДж:

$$Q_{\text{ф.п.}} := \left( \frac{m_{\Sigma \text{вещ.}}}{1000} \cdot \chi_{\text{пр}} \right) \cdot q_{\text{i.пр.}} + \left( \frac{m_{\Sigma \text{вещ.}}}{1000} \cdot \chi_{\text{эт}} \right) \cdot q_{\text{i.эт.}} + \left( \frac{m_{\Sigma \text{вещ.}}}{1000} \cdot \chi_{\text{вод}} \right) \cdot q_{\text{i.вод.}} = 4.802 \times 10^6$$

При испарении тепло поглощается, поэтому:

$$Q_{\text{ф.п.}} := -Q_{\text{ф.п.}}$$

Тепловой эффект химического процесса, кДж:

$$Q_3 := Q_p + Q_{\text{ф.п.}} = 6.547 \times 10^6$$

По справочным данным [3] составляем таблицу удельных теплоёмкостей веществ, входящих в реактор полимеризации.

Таблица 2.6 - Удельные теплоёмкости веществ, входящих в реактор полимеризации.

Вещество	Расход, кг/ч	Расход, кг/с	Удельная теплоемкость, кДж/кг·К	Обозначение теплоёмкости вещества
Нефрас	4480	1,244444444	2,226	с.не
Раствор ТЭА	35,84	0,009955556	2,220	с.р.тэа
Катализатор+нефрас	100	0,027777778	2,200	с.к.не
Пропилен	4000	1,111111111	1,930	с.пр
Этилен	112	0,031111111	1,528	с.эт
Водород	0,026	7,22222E-06	14,270	с.вод
Фугат	448	0,124444444	2,226	с.фуг
раствор Донора	7,3472	0,002040889	2,220	с.р.дон

Температура исходной смеси, °С:

$$t_{\text{исх.см}} := 20$$

Температура реакции, °С:

$$t_{\text{реакц}} := 60$$

Разность температур, °С:

$$\Delta t_{\text{реакц}} := t_{\text{реакц}} - t_{\text{исх.см}} = 40$$

Теплота, вносимая в аппарат перерабатываемыми веществами, кДж:

$$Q_{11} := \left( \frac{G_{\text{NE}}}{3600} \cdot c_{\text{не}} \cdot t_{\text{исх.см}} \right) + \left( \frac{G_{\text{ТЕА}}}{3600} \cdot c_{\text{р.тэа}} \cdot t_{\text{исх.см}} \right) + \left( \frac{G_{\text{КАТ}}}{3600} \cdot c_{\text{к.не}} \cdot t_{\text{исх.см}} \right) = 57.067$$

$$Q_{12} := \left( \frac{G_{\text{PR}}}{3600} \cdot c_{\text{пр}} \cdot t_{\text{исх.см}} \right) + \left( \frac{G_{\text{ЕТ}}}{3600} \cdot c_{\text{эт}} \cdot t_{\text{исх.см}} \right) + \left( \frac{G_{\text{HYD}}}{3600} \cdot c_{\text{вод}} \cdot t_{\text{исх.см}} \right) = 43.837$$

$$Q_{13} := \left( \frac{G_{\text{FUG}}}{3600} \cdot c_{\text{фуг}} \cdot t_{\text{исх.см}} \right) + \left( \frac{G_{\text{DON}}}{3600} \cdot c_{\text{р.дон}} \cdot t_{\text{исх.см}} \right) = 5.631 \quad Q_1 := Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} = 106.535$$

По справочным данным [3] составляем таблицу удельных теплоёмкостей веществ, выходящих из реактора полимеризации.



Таблица 2.7 – Удельные теплоёмкости веществ, выходящих из реактора полимеризации.

Вещество	Расход, кг/ч	Расход, кг/с	Удельная теплоёмкость, кДж/кг·К;	Обозначение теплоёмкости вещества
Полипропилен	3121,027734	0,866952	2,0934	с.пп
Смолистый нефрас	5071,1872	1,408663	2,35	с.сн
Непрореагировавший газ	990,998266	0,275277	1,93	с.нг

Теплота, уносимая из аппарата с продуктами реакции, кДж:

$$Q_4 := \left( \frac{G_{PP}}{3600} \cdot c_{пп} \cdot t_{реакц} \right) + \left( \frac{G_{SN}}{3600} \cdot c_{сн} \cdot t_{реакц} \right) + \left( \frac{G_{NG}}{3600} \cdot c_{нг} \cdot t_{реакц} \right) = 339.391$$

Полученные части уравнения, выражающие тепловой баланс химического процесса, кДж:

$$Q_1 = 106.535$$

$$Q_3 = 6.547 \times 10^6$$

$$Q_4 = 339.391$$

$Q_5 := 0$  - т.к. реактор непрерывного действия

$$Q_6 := Q_1 \cdot 0.05 = 5.327 - 5 \% \text{ тепловых потерь}$$

Теплота, отдаваемая перерабатываемыми веществами, кДж:

$$Q_2 := Q_4 + Q_5 + Q_6 - Q_1 - Q_3 = -6.546 \times 10^6$$

$$Q_2 := |Q_2| = 6.546 \times 10^6$$

Теплота, которую необходимо отвести из зоны реакции, кВт:

$$Q_{отв} := \frac{Q_2}{3600} = 1.818 \times 10^3$$

Производительность аппарата по целевому веществу, кг/с:

$$G_{пп} := \frac{G_{PP}}{3600} = 0.867$$

Время реакции, с:

По экспериментальным данным было выявлено, что время реакции составляет примерно 2.5 часа.

$$t_p := 2.4 \text{ часа}$$

$$\tau_p := t_p \cdot 60 \cdot 60 = 9 \times 10^3$$

По справочным данным, [3] составляем таблицу плотностей и удельных теплоёмкостей веществ, входящих в реактор полимеризации.

Таблица 2.8 – Плотности веществ, входящих в реактор полимеризации.

Компонент	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Массовая доля	Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	Молекулярная масса
Нефрас	698	0,487847	2226	100,21
раствор ТЭА	710	0,003903	2216	100
Катализатор+нефрас	600	0,010889	2213	100
Пропилен	609	0,435577	1930	42,08
Этилен	566	0,012196	1528	28,05
Водород	70,8	2,83E-06	14270	2
Фугат	698	0,048785	2226	100,21
раство Донор	710	0,0008	2220	100,21

Плотность смеси реагентов, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{см} := 656.611$$

Массовая концентрация исходного компонента в подаваемой на реакцию смеси:

$$\omega_p := 0.43557$$

Объем реактора, м<sup>3</sup>:

$$V_p := \frac{G_{пп} \cdot \tau_p}{\rho_{см} \cdot \omega_p \cdot X_{пп}} = 35.896 \text{ } \delta\text{-резерв мощности аппаратуры. Для обычных условий}$$

принимается равным 10и 15%,в особых случаях и при серьезных об основаниях он может быть значительно увеличен.

$$\delta := 10 \text{ \%}$$

В процессе полимеризации пропилена суспензионным методом, особую роль играет газовая фаза в реакторе, она занимает примерно 15-20% объёма всего реактора. Зададим  $\varphi$ -значение степени заполнения аппарата.

$$\varphi := 0.80$$

Общий объём всего аппарата, м<sup>3</sup>:

$$V_p := \frac{V_p \cdot (1 + 0.018)}{\varphi} = 49.358$$

Определяем условный коэффициент скорости отвода тепла:

$$K_{yc} := \frac{Q_{отв} \cdot 10^3}{V_p \cdot (t_{реакц} - t_{исх.см})} = 921.061$$

При  $K_{yc} < 900 \text{ Вт/м}^3 \cdot \text{К}$  - не требуется дополнительных мер по теплообмену кроме рубашки.

При  $K_{yc} >$  или  $= 900 \text{ Вт/м}^3 \cdot \text{К}$  - необходим змеевик, внутренние теплообменные устройства или рубашка в виде полутруб или каналов. По значению  $K_{yc}$  выявлено, что для реактора необходимо меры для увеличения теплосъёма.

## 2.2.2 Расчёт поверхности теплообменных устройств

Согласно [4] принимаем основные габаритные размеры аппарата (ТИП-1):

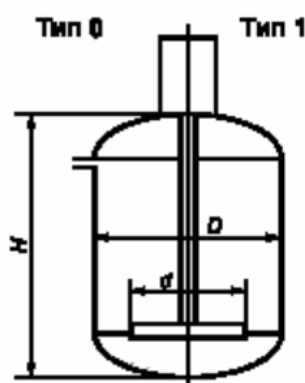


Рисунок 2.2. Ёмкостной аппарат

Таблица 2.9 - Основные габаритные размеры аппарата

Номинальный объем, м <sup>3</sup>	Внутренний диаметр D, мм	Высота корпуса H, мм, для аппаратов типа 1 (с гладкой рубашкой)	Внутренний диаметр рубашки D1, мм
50	3200	6800	3400

Зададим параметры:

$$V_{\text{реакт}} := 50 \text{ м}^3 \quad D := 3.200 \text{ м} \quad H_{\text{реакт}} := 6.800 \text{ м} \quad D_1 := 3.400 \text{ м}$$

Критерием выбора теплообменного устройства (обычной рубашки или рубашки из полутруб или каналов) служит критерий Рейнольдса, характеризующий интенсивность теплообмена. В случае ламинарного режима движения потока теплоносителя в обычной рубашке применяют рубашку из полутруб или каналов [5].

Так как скорость течения теплоносителя (деминерализованной воды) в канале между корпусом аппарата и рубашкой и критерия Рейнольдса весьма малы, то приведёт к низкому коэффициенту теплоотдачи со стороны воды, примем в качестве поверхности теплообмена каналы, приваренные к рубашке реактора. Рассчитаем коэффициент теплоотдачи для рубашки с каналами, согласно методике, указанной в пособии [6]

Габаритные размеры канала, м:

$$a := 0.1$$

$$b := 0.2$$

Эквивалентный диаметр для канала, м:

$$d_{\text{э}} := \frac{2 \cdot a \cdot b}{a + b} = 0.133$$

Площадь поперечного сечения потока теплоносителя в канале, м<sup>2</sup>:

$$F_{\text{п.с.}} := a \cdot b = 0.02$$

Теплофизические параметры деминерализованной воды (теплоносителя):

Начальная температура воды, °С:

$$t_{н.теп.} := 20$$

Конечная температура воды, °С:

$$t_{к.теп.} := 30$$

Удельная теплоемкость воды, Дж/кг\*К: [6]

$$C_{теп.} := 4.1769 \cdot 10^3$$

Плотность охлаждающей воды, кг/м<sup>3</sup>: [3]

$$\rho_{теп.} := 995.4$$

Вязкость охлаждающей воды, Па\*с: [3]

$$\mu_{теп.} := 0.8683 \cdot 10^{-3}$$

Коэффициент теплопроводности воды, Вт/м\*К: [6]

$$\lambda_{д.в.} := 0.5 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{С}}$$

$$\lambda_{теп.} := 1.163 \cdot \lambda_{д.в.} = 0.593$$

Расход деминерализованной воды, кг/с:

$$G_{теп.} := \frac{Q_{отв.} \cdot 10^3}{C_{теп.} \cdot (t_{к.теп.} - t_{н.теп.})} = 43.536$$

Скорость движения деминерализованной воды в рубашке, м/с:

$$w_{теп.} := \frac{G_{теп.}}{\rho_{теп.} \cdot F_{п.с.}} = 2.187$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re := \frac{w_{теп.} \cdot d_{э.} \cdot \rho_{теп.}}{\mu_{теп.}} = 3.343 \times 10^5$$

Критерий Прандтля для деминерализованной воды:

$$Pr := \frac{C_{теп.} \cdot \mu_{теп.}}{\lambda_{теп.}} = 6.115$$

Критерий Нуссельта определяем в зависимости от величины критерия Рейнольдса. Принимаем температуру стенки, как среднюю температуру

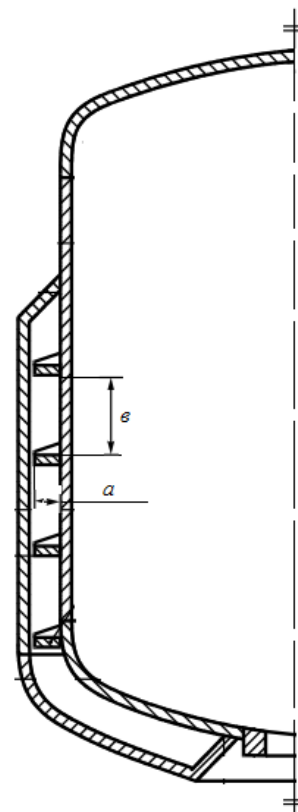


Рисунок 2.3. Аппарат с рубашкой с каналами

между температурой химической реакции и температурой охлаждающей жидкости, °С:

$$t_{\text{тепл.н}} := 20$$

$$t_{\text{реакт}} := 60$$

$$t_{\text{ст}} := t_{\text{реакт}} - t_{\text{тепл.н}} = 40$$

По [5,рис.ХIII] находим значения критерия Прандтля ( $Pr_{\text{ст}}$ ) для охлаждающей воды при температуре стенки:

$$Pr_{\text{ст}} := 6.11$$

Коэффициент, учитывающий искривлённость каналов, определяется по формуле:

$$\xi := 1 + 3.54 \cdot \left( \frac{d_3}{D_1} \right) = 1.145$$

Определяем критерий Нуссельта:

$$Nu := 0.021 \cdot \xi \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}} \right)^{0.25} = 1.201 \times 10^3$$

Коэффициент теплоотдачи для рубашки с каналами, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_{\text{руб}} := \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{теп.}}}{d_3} = 5.235 \times 10^3$$

Рассчитаем коэффициент теплоотдачи для стенки реактора, согласно методике, указанной в пособии [1, стр. 197].

Таблица 2.10 - Теплофизические параметры смеси реагентов

Компонент	Масс. доля	Плотность, кг/ м <sup>3</sup>	Динамическая вязкость реакционной смеси, Па* с	Коэффициент теплопроводности реакционной смеси, Вт/м <sup>2</sup> ·К	Удельная теплоёмкость реакционной смеси. Дж/кг·К
Нефрас	0,487847	698	0,001793	0,115	2226
раствор ТЭА	0,003903	710	0,001794	0,117	2216
Катализатор+ нефрас	0,010889	600	0,001794	0,116	2213
Пропилен	0,435577	609	0,00000952	0,225	1930
Этилен	0,012196	566	0,0000103	0,267	1528
Водород	2,83E-06	70,8	0,00000944	0,001868	14270
Фугат	0,048785	698	0,001793	0,115	2226

раство Донор	0,0008	710	0,001794	0,117	2220
<b>средняя</b>	-	<b>656,6112</b>	<b>0,00099442</b>	<b>0,164787</b>	<b>2088,405</b>

По таблице 2.10 зададим средние значения для компонентов:

$$\rho_{\text{см}} = 656.611$$

$$\mu_{\text{см}} := 0.00099442$$

$$\lambda_{\text{см}} := 0.16478$$

$$c_{\text{см}} := 2088.40$$

Зададим частоту вращения мешалки, об/мин:

$$n := 120$$

Критерий Рейнольдса при перемешивании:

$$Re_M := \frac{\rho_{\text{см}} \cdot n \cdot D^2}{\mu_{\text{см}}} = 8.114 \times 10^8$$

Критерий Прандтля для реакционной смеси:

$$Pr_{\text{см}} := \frac{c_{\text{см}} \cdot \mu_{\text{см}}}{\lambda_{\text{см}}} = 12.603$$

Коэффициент теплоотдачи для реакционной среды, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

Принимаем:

$$\frac{\mu_{\text{ст}}}{\mu_{\text{см}}} = 1$$

$$\alpha_p := \left( 0.0335 \cdot Re_M^{0.8} + 1.14 \cdot Re_M^{0.5} \right) \cdot \frac{Pr_{\text{см}}^{0.33}}{D \cdot \left( \frac{\mu_{\text{ст}}}{\mu_{\text{см}}} \right)^{0.14}} = 3.473 \times 10^5$$

Параметры стенки:

$$\delta_{\text{ст}} := 10 \cdot 10^{-3} \text{ - толщина стенки, м}$$

$$\lambda_{\text{ст}} := 46.5 \text{ - коэффициент теплопроводности стали, Вт/(м<sup>2</sup>*К)}$$

По [6, табл. I] тепловая проводимость загрязнений стенок:

$$\Sigma r_{\text{загр}} := \frac{1}{11600} + \frac{1}{1400} = 8.005 \times 10^{-4}$$

$$\Sigma R := \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \Sigma r_{\text{загр}}$$

Коэффициент теплопередачи в реакторе, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{руб}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{р}}} + \Sigma R} = 912.5$$

Для расчёта поверхности теплообмена необходимо определить среднюю разность температур:

$$t_{\text{н.в.}} := 20^{\circ} \text{C}$$

$$t_{\text{н.см.}} := 60^{\circ} \text{C}$$

$$t_{\text{к.в.}} := 30^{\circ} \text{C}$$

$$t_{\text{к.см.}} := 60^{\circ} \text{C}$$



$$\Delta t_{\text{б}} := t_{\text{к.см.}} - t_{\text{н.в.}} = 40^{\circ} \text{C} \quad \Delta t_{\text{м}} := t_{\text{н.см.}} - t_{\text{к.в.}} = 30^{\circ} \text{C}$$

$$\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} = 1.333$$

Средняя разность температур, °С:

$$\Delta t_{\text{ср}} := \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{2} = 30$$

Площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>:

$$F := \frac{Q_{\text{отв}} \cdot 10^3}{K \cdot (\Delta t_{\text{ср}})} = 66.428$$

Определим фактическую поверхность теплообмена реактора с рубашкой и волнорезами.

Высота рубашки, мм:

$$H_{\text{руб}} := 0.80 \cdot 6800 = 5.44 \times 10^3$$



Диаметр аппарата, мм:

$$D := 3200$$

Полуоси эллиптического днища, м:

$$a := 0.800 \quad b := 1.6$$

Поверхность теплообмена днища, м<sup>2</sup>:

$$F_{\text{дн}} = 2\pi \cdot a \cdot \left( a + \frac{b^2}{\sqrt{b^2 - a^2}} \cdot \arcsin\left(\frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{b}\right) \right)$$

$$F_{\text{дн}} := 11.11$$

Полная поверхность теплообмена рубашки, м<sup>2</sup>:

$$F_{\text{руб}} := \frac{\pi \cdot D \cdot H_{\text{руб}}}{10^6} = 54.689$$

Поверхность теплообмена волнорезов (змеевиков) в реакторе, м<sup>2</sup>:

В реакционном пространстве будут находиться 4 пучка волнорезов (z=4), соединённых последовательно. В каждом пучке будут находиться по 4 стальные трубы 25\*2 (n=4). Длина труб будет совпадать с длиной рубашки.

$$F_{\text{влнз}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot H_{\text{руб}} \cdot z \cdot n}{10^6} = 6.836$$

Общая поверхность теплообмена реактора с рубашкой и волнорезами, м<sup>2</sup>:

$$F_{\text{общ}} := F_{\text{руб}} + F_{\text{влнз}} + F_{\text{дн}} = 72.641$$

Согласно данным, представленным в пособии [7, таблица 9.4], нормализованный реактор с номинальным объёмом  $V=50 \text{ м}^3$  имеет параметры, представленные в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Параметры реактора объёмом  $50 \text{ м}^3$

Номинальный объем, м <sup>3</sup>	Внутренний диаметр D, мм	Площадь поверхности теплообмена рубашки F <sub>р</sub> , м <sup>2</sup>	Диаметр вала мешалки d <sub>в</sub> , мм	Высота уровня жидкости H <sub>ж</sub> , м (φ = 0,75)
50	3200	69,7	110	5,57

Запас поверхности теплообмена, %:

$$F_{\%} := \frac{F_{\text{общ}} - F}{F_{\text{общ}}} \cdot 100 = 8.553$$

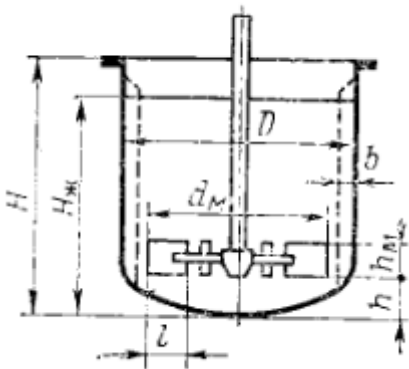
Запас поверхности теплообмена достаточен для ведения технологического процесса.

## 2.2.3 Подбор мешалки

### Выбор мешалки

Для обеспечения процесса выбираем турбинную мешалку по [7, таблица 9.1] в зависимости от вязкости суспензии. Эта мешалка обеспечивает взвешивание твёрдых частиц.

Таблица 2.12 - Характеристики турбинной мешалки

Тип мешалки	Основные параметры	Условия работы
<p>Турбинная</p> 	$D/d_M = 3 \div 4;$ $h_M/d_M = 0,2;$ $h/d_M = 0,4 \div 1;$ $l/d_M = 0,25;$ $b/d_M = 0,1;$ $\zeta_M = 8,4$	<p>Взвешивание и растворение твердых кристаллических частиц (с массовым содержанием до 80%) и волокнистых (с массовым содержанием до 5%); эмульгирование жидкостей с большой разностью плотностей, диспергирование газа в жидкости; перемешивание ньютоновских жидкостей; <math>\omega = 2,5 \div 10</math> м/с при <math>\mu \leq 10</math> Па·с; <math>\omega = 2,5 \div 7</math> м/с при <math>\mu = 10 \div 40</math> Па·с</p>

Принимаем отношение  $D/d_M = 4$  (таблица 2.12), получаем диаметр мешалки, м:

$$d_M := \frac{D}{4} = 0.8$$

На основании данных [7, таблица 9.2] окончательно принимаем  $d_M=800$  мм.

Предварительно примем окружную скорость мешалки  $\omega=7$  м/с (таблица 2.12). В этом случае частота вращения мешалки равна,  $c^{-1}$ :

$$n := \frac{\omega}{\pi \cdot d_M} = 2.785$$

Частота вращения мешалки при взвешивании твёрдых частиц жидкости определяется по формуле  $c^{-1}$ :

$C_1=4,72$  —коэффициент;

$D$  — диаметр сосуда,  $D=3,2$  м;

$d_M$  — диаметр мешалки,  $d_M=0,8$  м;

$\delta$  — размер частицы,  $\delta=1,0 \cdot 10^{-3}$  м;

$\rho_{ж}$  — плотность жидкости,  $\rho_{ж}= 656$  кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{пп}$  — плотность полипропилена,  $\rho_{пп}= 930$  кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta\rho$  — разность плотностей фаз,  $274$  кг/м<sup>3</sup>;

$$n_1 := C_1 \cdot \left( \frac{D \cdot \delta \cdot \Delta\rho}{d_M^4 \cdot \rho_{ж}} \right)^{0.5} = 0.27$$

В соответствии с полученными данными по [7,табл. 11 приложения] принимаем частоту вращения мешалки  $n = 3.33$   $c^{-1}$ .

### **Определение глубины воронки**

Определение глубины воронки будем вести по пособию [7, стр. 245]. Для определения глубины воронки в сосуде необходимо найти значения параметров  $\Gamma$  и  $Re_{цб}$ .

При коэффициенте заполнения сосуда  $\varphi = 0,75$ ; высота уровня жидкости  $H_{ж}= 5.57$  м , [7, таблица 9.4].

В этом случае для аппарата со свободной поверхностью жидкости:

$$\Gamma := \frac{8 \cdot H_{ж}}{(D + 1)} = 10.61$$

Критерий Рейнольдса при перемешивании:

$$Re_{цб} := \frac{n \cdot d_M^2 \cdot \rho_{ж}}{\mu_{см}} = 6.99 \times 10^5$$

где  $\mu_{см}=0.002$  — вязкость суспензии полипропилена, Па·с.

Значение параметра E найдем по формуле, приняв по [7, табл. 9.1] для турбинной мешалки  $\xi_M=8.4$ .

$$E := \frac{\Gamma}{\xi_M \cdot z \cdot (Re_{цб})^{0.25}} = 0.044$$

$\xi_M$  — коэффициент сопротивления мешалки;

$z$  — количество мешалок на одном валу,  $z=1$ .

При полученном значении E по [7, рис. 9.2] находим  $B = 4.6$ .

Глубину воронки в сосуде без перегородок, м:

$$h_b := \frac{B \cdot n^2 \cdot d_M^2}{2} = 16.323$$

При установке мешалки согласно [7, табл. 9.1] на высоте  $h$ , предельно допустимая глубина воронки, м:

$$h := 0.5 \cdot d_M = 0.4$$

$$h_{пр} := H_{ж} - h = 5.17$$

Так как расчётная глубина воронки  $h_b = 16.3$  м превосходит  $h_{пр} = 5.17$  м, в аппарате следует установить отражательные перегородки.

### **Выбор торцового уплотнения**

Для выбора торцового уплотнения предварительно подберём диаметр вала мешалки под уплотнение, м:

$$d_B := 0.11$$

По данным [7, табл. 9.3] выбираем торцовое уплотнение ТДПФ -01. С параметрами, представленными в таблице 2.13

Таблица 2.13 – Параметры уплотнения ТДПФ-01

Тип уплотнения	Диаметр вала $d_v$ , мм	Рабочее давление, МПа	Частота вращения вала, $c^{-1}$	Рабочая температура, $^{\circ}C$	Рабочая среда в аппарате
ТДПФ-01	110 и 130	0,6	до 5,5	от -30 до +250	Высокоагрессивная, взрывопожарная и пожароопасная

### Выбор привода мешалки

Мощность, теряемая в торцовом уплотнении, Вт:

$$N_y := 10440 \cdot d_v^{1.3} = 592.258$$

По [7, рис. 9.3] для двухлопастной мешалки в аппарате с перегородками при  $Re_{цб} = 6.99 \cdot 10^5$  находим значение критерия  $K_N = 8$ .

В этом случае определяем мощность, затрачиваемую на перемешивание, Вт:

$$N_{\text{мш}} := K_N \cdot \rho_{ж} \cdot n \cdot d_m^5 = 5.726 \times 10^3$$

Для расчета мощности электродвигателя примем дополнительные условия: в аппарате установлена гильза термопары и труба передавливания, тогда  $\Sigma k_i = 2 \cdot k_i$ .

Определяем коэффициент высоты уровня жидкости в аппарате:

$$K_n := \left( \frac{H_{ж}}{D} \right)^{0.5} = 1.319$$

Определяем мощность привода мешалки, Вт:

где  $K_n = 1$  — для аппаратов с перегородками;

$k_i$  — коэффициент, учитывающий наличие в сосуде внутренних устройств;

$k_i = 1,1 \div 1,2$  — при наличии гильзы термопары, трубы передавливания или уровнемера;

$$\Sigma k_i = 2 \cdot k_i = 2 \cdot 1,2 = 2,4;$$

$N$  — мощность, затрачиваемая на перемешивание жидкости;

$\eta$  — к.п.д. привода мешалки;  $\eta = 0,85 \div 0,9$ .

$$N_э := \frac{(K_n \cdot K_H \cdot K_i \cdot N + N_y)}{\eta} = 2.203 \times 10^4$$

По [7, табл. 11 приложения] выбираем в качестве привода мешалки мотор-редуктор с мощностью электродвигателя  $N = 22$  кВт и частотой вращения  $n = 3.33 \text{ с}^{-1}$  (этот мотор-редуктор предусмотрен ГОСТом).

### Проверка соответствия диаметра вала

Диаметр вала выбирается по следующему соотношению, мм:

$$M_{кр} := \frac{N_э}{\omega} = 3.147 \times 10^3$$

где  $M_{кр}$  — крутящий момент;

$[\tau]$  — допускаемое касательное напряжение,  $[\tau] = 20 \dots 25$  МПа.

$$d := \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_{кр} \cdot 1000}{\pi \cdot \tau}} = 86.227$$

Ранее был выбран диаметр  $d = 110$  мм, что удовлетворяет условию.

Согласно каталогу [16] и альбому типовых конструкций [42] принимаем параметры для двух типов мешалок:

- лопастная мешалка — для перемешивания в газовой фазе;
- турбинная открытая — для перемешивания суспензии.

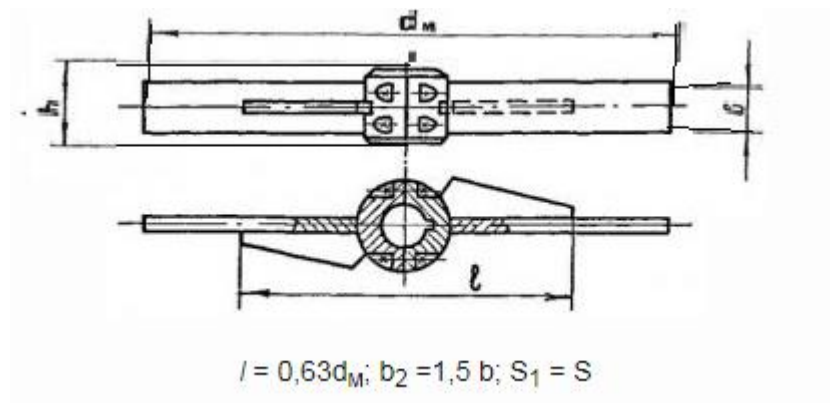


Рисунок 2.4. Лопастная мешалка

Таблица 2.14 – Параметры лопастной мешалки

Диаметр мешалки $d_m$ , мм	Коэффициент сопротивления	Коэффициент расхода	Отношение $D/d_m$	Отношение высоты лопасти к ее радиусу	Масса стальной мешалки
2240	0,88	0,0013	1,5-2,5	0,2	78,8

Таблица 2.15 – Размеры лопастной мешалки, мм

Диаметр мешалки $d_m$	$d$ (после допуска по Н9)	$h$	$b$	$s$
2240	110	250	224	14

Таблица 2.16. – Параметры турбинной мешалки

Диаметр мешалки $d_m$ , мм	Коэффициент сопротивления	Коэффициент расхода	Отношение $D/d_m$	Отношение высоты лопасти к ее радиусу	Масса стальной мешалки
1250	8,4	0,0013	3-4	0,4	155

Таблица 2.17 – Размеры турбинной мешалки, мм

Диаметр мешалки $d_M$	$d$ (после допуска по Н9)	$h$	$b$	$s$
1250	110	220	250	12

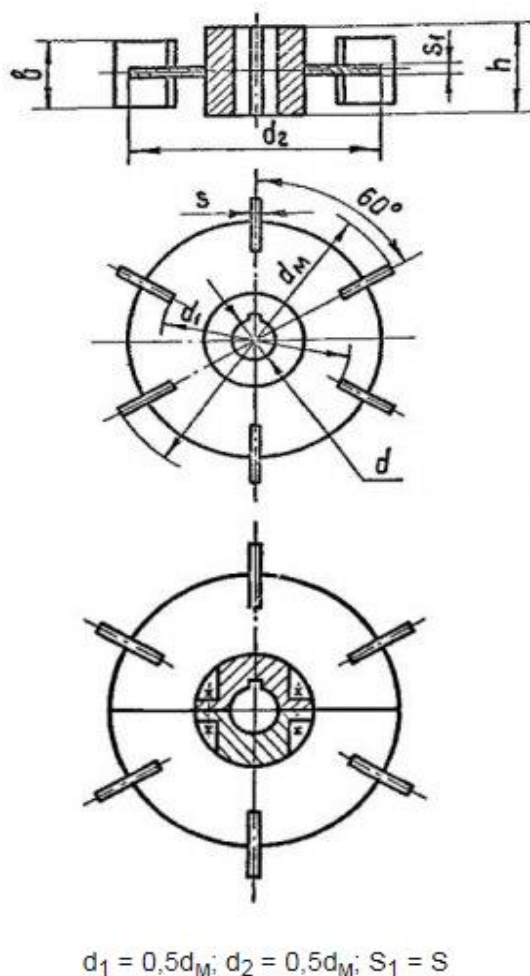


Рисунок 2.5. Турбинная открытая мешалка

Длину вала принимаем: 6500 мм. По причине большого объёма аппарата, на валу будут установлены 2 турбинные мешалки для суспензии и 1 лопастная мешалка для перемешивания газовой фазы. Мешалки будут с разборными ступицами. Материал - 12X18H10T.



## 2.3 Механический расчёт реактора

### 2.3.1 Расчётные параметры

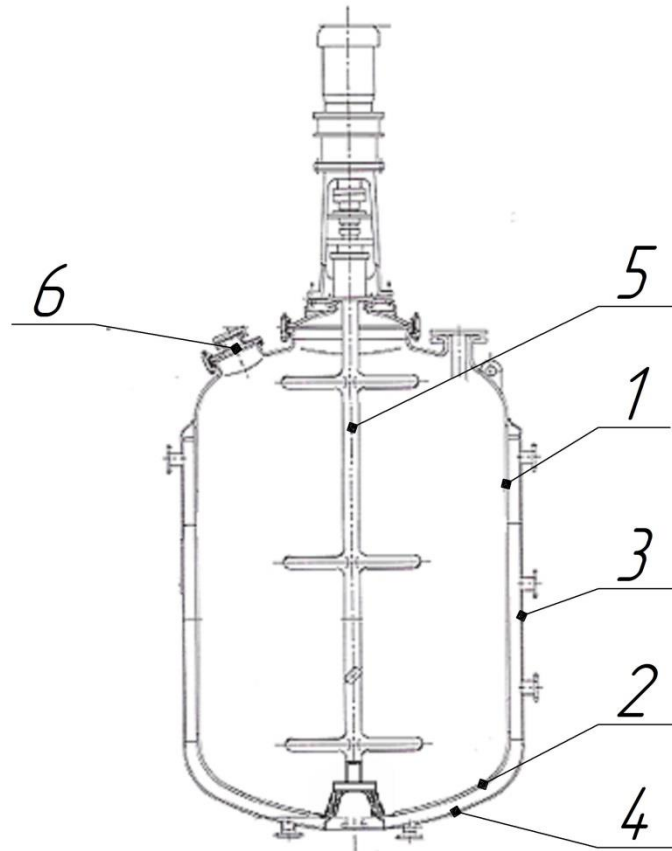


Рисунок 2.6. Упрощённая модель реактора полимеризации:

- 1 – цилиндрическая обечайка;
- 2 – эллиптическое днище;
- 3 – цилиндрическая обечайка (рубашка);
- 4 – эллиптическое днище (рубашка);
- 5 – вал с мешалками;
- 6 – люк-лаз.

#### Исходные данные:

Объем ёмкости, м<sup>3</sup>:

$$V := 50$$

Внутренний диаметр, мм:

$$D := 3200$$

Высота реактора, мм:

$$L := 6800$$

Высота цилиндрической части, мм:

$$H_{\text{ц.ч.}} := 5200$$

Высота обечайки под рубашкой, мм:

$$H_p := 5440$$

Рабочее давление в аппарате, МПа:

$$P := 0.9$$

Рабочая температура среды в аппарате, °С:

$$t_c := 60$$

Максимальная температура среды, °С:

$$t_{c,\text{max}} := 135$$

Плотность среды в аппарате, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho := 656.6$$

Плотность среды в рубашке, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_c := 1000$$

Давление среды в рубашке, МПа:

$$P_{\text{руб}} := 0.25$$

Скорость коррозии, мм/год:

$$П := 0.02$$

Срок эксплуатации, лет:

$$Y := 20$$

Марка стали: 12X18H10T

Сталь относится к классу жаропрочных, жаростойких и коррозионно-стойких сталей.

Плотность стали, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_s := 7750$$

**Расчётные параметры:**

Расчётное значение предела текучести для стали марки 12X18H10T при  $t=135$  по [8, таблице Б.7], МПа:

$$R_{02} := 254.7$$

Расчётное значение предела текучести при 20<sup>0</sup>С для стали 12Х18Н10Т согласно [8, таблице Б.7], МПа:

$$R_{e20} := 220$$

Коэффициент запаса прочности при гидравлическом испытании по [8, таблице 1]:

$$n_T := 1.1$$

Коэффициент запаса прочности:

$$\eta := 1$$

Допускаемое напряжение для стали марки 12Х18Н10Т при t=135 °С по [8, таблице А.3] , МПа:

$$\sigma_t := 168.9$$

Допускаемое напряжение для стали марки 12Х18Н10Т при нормальных условиях [8, по таблице А.3], МПа:

$$\sigma_{20} := 184$$

Ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>:

$$g := 9.81$$

Расчётная температура, °С:

$$t_p := \max(t_c, t_{c, \max}, 20) = 135$$

Так как аппарат изготавливается из листового проката:

$$\eta := 1$$

$$\sigma_d := \eta \cdot \sigma_t = 168.9$$

Допускаемое напряжение для стали 12Х18Н10Т по [8, по таблице А.3]: при t=20<sup>0</sup>С, МПа:

$$\sigma_{d20} := \eta \cdot \sigma_{20} = 184$$

Допускаемое напряжение при гидравлических испытаниях, МПа:

$$\sigma_{и} := \text{Floor}\left(\frac{R_{e20}}{1.1}, 0.5\right) = 199.5$$

Расчётное значение внутреннего избыточного давления, МПа:

$$P'_p := P + \frac{\rho \cdot g \cdot H_p}{10^9} = 0.935$$

Расчётное значение наружного давления, МПа:

$$P'_{н.р} := P_{руб} + \frac{\rho_c \cdot g \cdot H_p}{10^9} = 0.303$$

Пробное давление при гидравлическом испытании внутри аппарата, МПа:

$$P_{и} := 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{д20}}{\sigma_d} = 1.226$$

Пробное давление при гидравлическом испытании в рубашке, МПа:

$$P_{и.р} := 1.25 \cdot P'_{н.р} = 0.379$$

Модуль упругости, МПа:

$$E := \text{Floor}(\text{interp}(t, E, 135), 0.5) = 1.993 \times 10^5$$

Модуль упругости для стали 12Х18Н10Т при температуре испытания 20°C согласно [8], МПа:

$$E_{20} := 2.0 \cdot 10^5$$

Вид сварного шва и способ сварки:

Согласно [8, по таблице Д.1], шов стыковой, выполняемый вручную с одной стороны. Длина контролируемых швов от общей длины составляет 100%\*:

$$\phi_p := 0.9$$

### 2.3.2 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки (1)

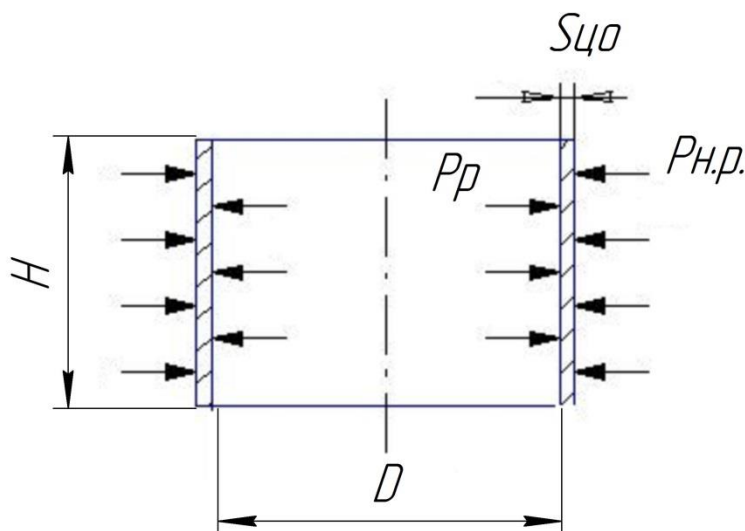


Рисунок 2.7. Расчётная схема цилиндрической обечайки (1)

Целью расчёта толщины цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним и внешним избыточным давлением, является определение исполнительной толщины стенки исходя из условий прочности и устойчивости. На рисунке 2.7. представлена схема цилиндрической обечайки с необходимыми для расчёта размерами и нагрузками.

Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки ведётся согласно [9,5-5.3.1], а также в соответствии с рекомендациями, изложенными в пособии [10].

Расчёт производится при давлении гидравлического испытания и при рабочем давлении в реакционном пространстве.

Максимальная исполнительная толщина стенки из условия прочности, мм:

$$s_p := \max \left( P'_p \cdot \frac{D}{2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_d - P'_p}, P'_{н.р} \cdot \frac{D}{2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_d - P'_{н.р}}, P'_и \cdot \frac{D}{2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_d - P'_и} \right)$$

Добавка на коррозию и на компенсацию минусового допуска, мм:

$c$ — сумма прибавок к расчетным толщинам стенок, мм;

$c1$ — прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;

$c2$ — прибавка для компенсации минусового допуска, мм;

Принимаем добавку, мм:

$$c1 := Y \cdot \Pi = 0.4$$

$$c2 := 0$$

$$c := \text{Ceil}(c1 + c2, 1) = 1$$

Максимальная исполнительная толщина стенки обечайки из условия прочности, мм:

$$s_1 := \text{Ceil}(s_p + c, 1) = 14$$

Максимальная исполнительная толщина стенки из условий устойчивости, мм:

$$B := \max \left[ 1.0, 0.47 \cdot \left( \frac{P'_{н.р}}{E \cdot 10^{-5}} \right)^{0.067} \cdot \left( \frac{H_p}{D} \right)^{0.4} \right] = 1$$

$$s'_p := \max \left[ 1.06 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{D}{B} \cdot \left[ \frac{P'_{H.P} \cdot (H_p)}{10^{-5} \cdot E \cdot D} \right]^{0.7}, 1.2 \cdot P'_{H.P} \cdot \frac{D}{(2 \cdot \sigma_d - P'_{H.P})} \right] = 13.167$$

$$s_2 := \text{Ceil}[(s'_p) + c, 1] = 15$$

Примем толщину, мм:

$$s_{цo} := \max(s_1, s_2) = 15$$

Получаем исполнительную толщину стенки гладкой цилиндрической обечайки из сортамента прокатных стальных листов, мм:

$$(s_{цo}) := 16$$

Проверка условия применения формул для обечаек при  $D > 200$  мм

$$\text{Prov}_1 := \begin{cases} \text{"условие применения формул выполняется"} & \text{if } \frac{s_{цo} - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"условие применения формул НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**Prov\_1 = "условие применения формул выполняется"**

Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку, МПа:

Рабочие условия

$$P_{д.цo} := \frac{[2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_p \cdot (s_{цo} - c)]}{D + (s_{цo} - c)} = 1.418$$

Условия испытаний

$$P'_{д.цo} := \frac{2 \cdot \sigma_{и} \cdot \phi_p \cdot (s_{цo} - c)}{D + (s_{цo} - c)} = 1.675$$

Проведён расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним и внешним избыточным давлением, исходя из условий прочности и устойчивости. Результаты расчётов представлены в таблице 2.17.

Таблица 2.17. – Результаты расчёта толщины стенки цилиндрической обечайки

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы изм.
Добавка на коррозию и на компенсацию минусового допуска	c	1	мм
Максимальная исполнительная толщина стенки обечайки из условия прочности	s1	14	мм
Максимальная исполнительная толщина стенки из условий устойчивости,	s2	15	мм
исполнительную толщину стенки гладкой цилиндрической обечайки из сортамента прокатных стальных листов	sцo	16	мм
Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку при рабочих условиях	Pд.цo	1.418	МПа
Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку при условиях испытания	P'д.цo	1.675	МПа
Расчётное значение внутреннего избыточного давления	Pp	0.935	МПа
Пробное давление при гидравлическом испытании внутри аппарата	Pи	1.226	МПа

### 2.3.3 Расчёт толщины стенки эллиптических днищ (2)

Целью расчёта толщины стенки эллиптических днищ, нагруженных внутренним избыточным давлением, является определение исполнительной толщины стенки исходя из условий прочности и устойчивости. На рисунке 2.8. представлена схема эллиптического днища с необходимыми для расчёта размерами и нагрузками.

Расчёт толщины стенки эллиптического днища ведётся согласно [9,6.1-6.3.], а также в соответствии с рекомендациями, изложенными в пособии [10].

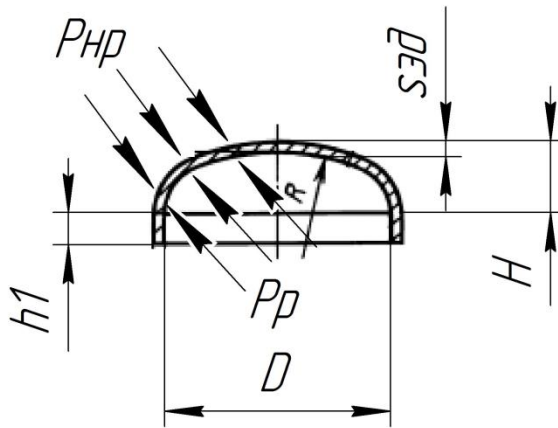


Рисунок 2.8. Эллиптическое днище

Высота днища без учёта цилиндрической части, мм:

$$H := 0.25D = 800$$

Радиус кривизны в вершине днища по внутренней поверхности, мм:

$$R := \text{ceil}\left(\frac{D^2}{4H}\right) = 3.2 \times 10^3$$

Коэффициент прочности сварных швов для крышек, изготовленных из одной заготовки (штамповкой):

$$\phi = 1$$

Расчёт толщины стенки эллиптического днища производится при давлении гидравлического испытания и при рабочем давлении, МПа:

$$S_p := \max\left[\frac{P'_p \cdot R}{(2 \cdot \phi \cdot \sigma_t - 0.5P'_p)}, \frac{P'_{H.P} \cdot R}{(2 \cdot \phi \cdot \sigma_{и} - 0.5P'_{H.P})}, \frac{P_{и} \cdot R}{(2 \cdot \phi \cdot \sigma_{и} - 0.5P_{и})}\right] = 9.844$$

Толщина стенки с учётом добавки на коррозию и на компенсацию минусового допуска, мм:

$$S_{зд} := \text{ceil}(S_p + c) = 11$$

Максимальная исполнительная толщина стенки из условий устойчивости, мм:

$$\frac{H}{D} = 0.25 \quad \frac{D}{S_{зд} - c} = 320$$



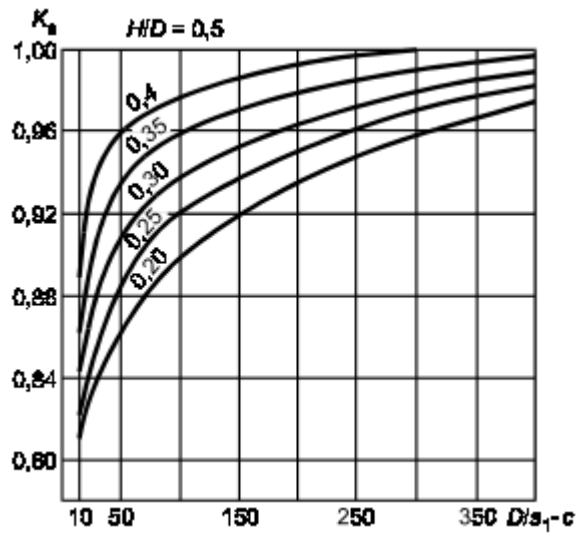


Рисунок 2.9. График для определения коэффициента К

$$K_s := 0.97$$

$$S_{1p} := \max\left(\frac{K_s \cdot R}{161} \cdot \frac{\sqrt{\eta \cdot P_{н.р}}}{10^{-5} \cdot E}, \frac{1.2 \cdot P_{н.р} \cdot R}{2 \cdot \sigma_{н}}\right) = 5.328$$

С учётом добавки на коррозию и на компенсацию минусового допуска, мм:

$$S_{эд1} := \text{ceil}(S_{1p} + c) = 7$$

Примем толщину, мм:

$$s_{эд} := \max(S_{эд}, S_{эд1}) = 11$$

Увеличиваем толщину днища до толщины обечайки и получаем

исполнительную толщину стенки гладкой цилиндрической обечайки, мм:

$$s_{эд} := s_{цр} = 16$$

Высота цилиндрической части днища, мм:

$$h_1 := \text{ceil}\left[0.8 \cdot \sqrt{D \cdot (s_{эд} - c)}\right] = 176$$

Согласно [11, табл.16.1] принимаем высоту цилиндрической части, мм:

$$h_1 := 180$$

Проверка на условие применимости формул:

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие применения формул выполняется"} & \text{if } 0.2 \leq \frac{H}{D} \leq 0.5 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl = \text{"Условие применения формул выполняется"}$$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие применения формул выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{s_{эд} - c}{D} \leq 0.100 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$U_{sl} = \text{"Условие применения формул выполняется"}$

Допускаемое внутреннее избыточное давление на эллиптическую крышку,

МПа:

Рабочие условия

$$P_{д.эд} := \frac{[2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_p \cdot (s_{эд} - c)]}{R + 0.5 \cdot (s_{эд} - c)} = 1.422$$

Условия испытаний

$$P'_{д.эд} := \frac{2 \cdot \sigma_{и} \cdot \phi_p \cdot (s_{эд} - c)}{R + 0.5 \cdot (s_{эд} - c)} = 1.679$$

Проведён расчёт толщины стенки эллиптического днища, нагруженного внутренним и внешним избыточным давлением, исходя из условий прочности и устойчивости. Результаты расчётов представлены в таблице 2.18.

Таблица 2.18. – Результаты расчёта толщины эллиптического днища

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы изм.
Добавка на коррозию и на компенсацию минусового допуска	c	1	мм
Максимальная исполнительная толщина стенки днища из условия прочности	sэд	11	мм
Максимальная исполнительная толщина стенки днища из условий устойчивости	sэд1	7	мм
Исполнительная толщину стенки эллиптического днища из сортамента прокатных стальных листов	sэд	16	мм
Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку при рабочих условиях	Pд.эд	1.422	МПа
Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку при условиях испытания	P'д.эд	1.679	МПа
Высота цилиндрической части днища	h1	180	мм
Высота днища без учёта цилиндрической части	H	800	мм
Радиус кривизны в вершине днища	R	3200	мм

### 2.3.4 Расчёт толщины стенки цилиндрической части рубашки и эллиптического днища (3), (4)

Целью расчёта толщины стенки цилиндрической части рубашки и эллиптических днищ, нагруженных внутренним избыточным давлением, является определение исполнительной толщины стенки исходя из условий прочности. На рисунке 2.10. представлена схема эллиптического днища с необходимыми для расчёта размерами и нагрузками.

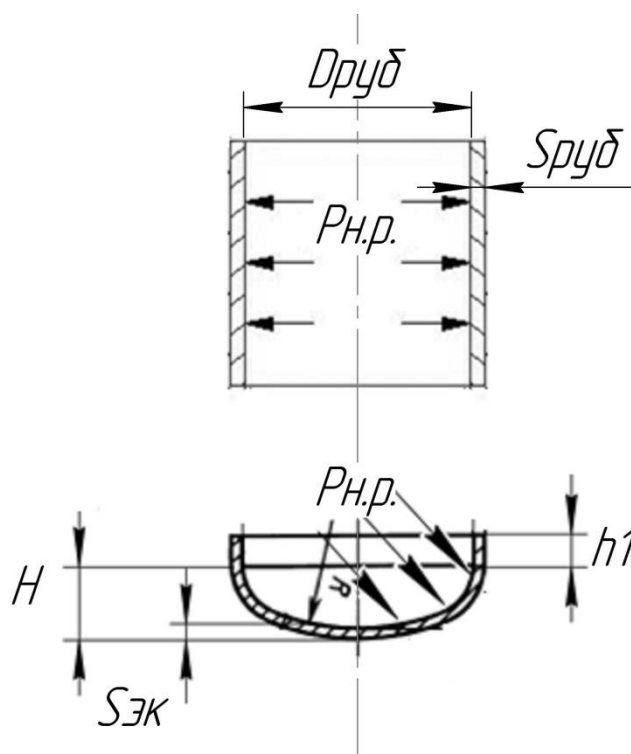


Рисунок 2.10. Расчётная схема цилиндрической обечайки и эллиптического днища

Расчёт толщины стенки цилиндрической части рубашки ведётся согласно [12], а также в соответствии с рекомендациями, изложенными в пособии [10].

Максимальная исполнительная толщина стенки из условия прочности, мм:

$$s_{руб1} := \max \left( P_{и.р} \cdot \frac{D_{руб}}{2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_d - P_{и.р}}, P'_{н.р} \cdot \frac{D_{руб}}{2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_d - P'_{н.р}} \right) = 4.301$$

$$s_{руб} := \text{Ceil}(s_{руб1} + c, 1) = 6$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление на рубашку, МПа:

Рабочие условия

$$P_{д.руб} := \frac{[2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_p \cdot (s_{руб} - c)]}{D_{руб} + (s_{руб} - c)} = 0.446$$

Условия испытаний

$$P'_{д.руб} := \frac{2 \cdot \sigma_{и} \cdot \phi_p \cdot (s_{руб} - c)}{D_{руб} + (s_{руб} - c)} = 0.527$$

Проверка условия применения формул для обечаек при  $D > 200$  мм

$$Prov_1 := \begin{cases} \text{"условие применения формул выполняется"} & \text{if } \frac{s_{руб} - c}{D_{руб}} \leq 0.1 \\ \text{"условие применения формул НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

**Prov\_1 = "условие применения формул выполняется"**

Днище для рубашки принимаем согласно, [11, табл. 16.1]

Расчёт толщины стенки эллиптического днища рубашки ведётся согласно [9], а также в соответствии с рекомендациями, изложенными в пособии [11].

Высота выпуклой части днища без учёта цилиндрической части, мм:

$$H := 0.25D \quad H = 850$$

Радиус кривизны в вершине днища по внутренней поверхности, мм

$$R := \text{ceil}\left(\frac{D^2}{4H}\right) = 3.4 \times 10^3$$

Расчёт толщины стенки эллиптического днища производится при давлении гидравлического испытания и при рабочем давлении в рубашке.

$$\phi := 1$$

Коэффициент прочности сварных швов для крышек изготовленных из одной заготовки (штамповкой).

Расчётная толщина стенки, мм:

$$S_p := \max\left[\frac{P_{и.р} \cdot R}{(2 \cdot \phi \cdot \sigma_t - 0.5 P_{и.р})}, \frac{P_{н.р} \cdot R}{(2 \cdot \phi \cdot \sigma_{и} - 0.5 P_{н.р})}\right] = 3.817$$

С учётом добавки на коррозию и на компенсацию минусового допуска, мм:

$$S_{\text{ЭК}} := \text{ceil}(S_p + c) = 5$$

Согласно рекомендациям [11, табл.16.1], увеличиваем толщину стенки днища до толщины стенки обечайки, мм:

$$S_{\text{ЭК}} := 6$$

Высота цилиндрической части днища, мм:

$$h_1 := \text{ceil}\left[0.8 \cdot \sqrt{D \cdot (S_{\text{ЭК}} - c)}\right] = 105$$

Согласно [11, табл.16.1] принимаем высоту цилиндрической части, мм:

$$h_1 := 100$$

Проведён расчёт толщины стенки цилиндрической и эллиптической части рубашки исходя из условий прочности. Результаты расчётов представлены в таблице 2.19.

Таблица 2.19. – Результаты расчёта толщины цилиндрической и эллиптической части рубашки

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы изм.
Максимальная исполнительная толщина стенки днища из условия прочности	спруб	6	мм
Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую рубашку при рабочих условиях	Рд.руб	0.446	МПа
Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую рубашку при рабочих условиях	Р'д.руб	0.527	МПа
Высота днища без учёта цилиндрической части	H	850	мм
Радиус кривизны в вершине днища	R	3400	мм
Высота цилиндрической части днища	h1	200	мм
Максимальная исполнительная толщина стенки днища из условия прочности	sЭК	5	мм
Исполнительная толщина стенки эллиптического днища из сортамента прокатных стальных листов	sЭК	6	мм

### 2.3.5 Расчёт вала на прочность, жёсткость и виброустойчивость (5)

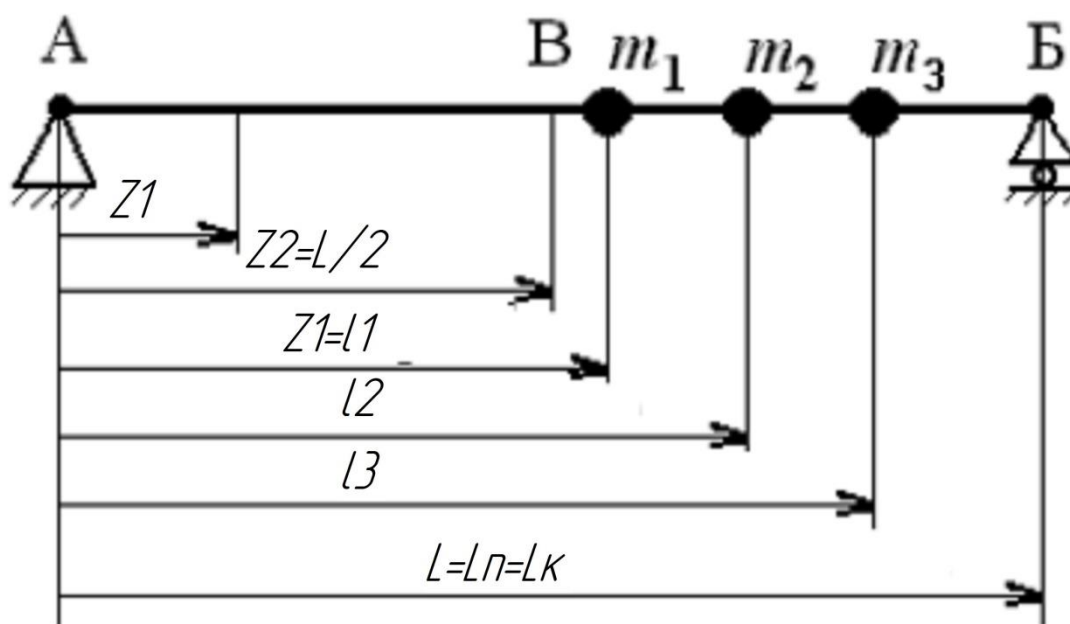


Рисунок 2.11. Условная схема вала с мешалками

Целью расчёта вала на прочность, жёсткость и виброустойчивость является определение диаметра вала, при котором выполняется условие жёсткости. Проверка уплотнения. Проверка вала на прочность в опасных сечениях. А также проверка условия виброустойчивости и определение критической угловой скорости. На рисунке 2.11. представлена схема однопролётного вала с необходимыми для расчёта размерами.

Расчёт вала на прочность, жёсткость и виброустойчивость производится согласно методике, изложенной в пособии [13, стр. 52].

#### Исходные данные:

Длина пролёта, м:

$$L := 0.6$$

Координата  $m_1$ , м:

$$L_0 := 0.58$$

Длина консоли (координата  $m_2$ ), м:

$$L_1 := 5.82$$

Длина вала, м:

$$L_2 := 6.42$$

Длина вала, м:

$$L := 6.5$$

Длина пролёта, м:

$$L_{\Pi} := 6.5$$

Длина консоли, м:

$$L_k := 6.5$$

Координата центра массы детали, м:

$$l_i := \begin{pmatrix} 1.5 \\ 4.150 \\ 6.00 \end{pmatrix}$$

Масса детали, кг:

$$m_i := \begin{pmatrix} 78.8 \\ 155 \\ 155 \end{pmatrix}$$

Координаты опасных по прочности и жесткости сечений, м:

$$z_i := \begin{pmatrix} 1.0 \\ 3.25 \\ 4.15 \end{pmatrix}$$

Модуль предельной упругости материала вала, Па:

$$E := 1.95 \cdot 10^{11}$$

Материал вала: 12Х18Н10Т

Плотность материала вала, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho := 7800$$

Диаметр аппарата, м:

$$D := 3.2$$

Диаметр мешалки, м:

$$d_M := 1.250$$

Число мешалок на валу, шт:

$$n_M := 3$$

Частота вращения вала, об./мин.:

$$n := 300$$

Мощность перемешивания (по гидродинамическому расчету), Вт:

$$N := 23 \cdot 10^3$$

Мощность потребляемая одной мешалкой, Вт:

$$N_{ш} := \frac{N}{3}$$

Концентратор напряжений в опасном по прочности сечении: шпоночный паз;

Перемешиваемая среда (по фазовому состоянию) : жидкость-твёрдое

Тип мешалки: закрытая турбинная

Температура среды в мешалке, °С:

$$t := 60$$

### **Расчёт на виброустойчивость**

Относительные величины:

Относительная длина пролёта

$$a_{п} := \frac{L_{п}}{L_{к}} = 1$$

Относительные координаты центра тяжести i-ой детали в пролёте

$$a_i := \frac{l_i}{L_{п}}$$

$$a_i = \begin{pmatrix} 0.231 \\ 0.638 \\ 0.923 \end{pmatrix}$$

Угловая скорость вала, рад./с:

$$\omega := \frac{\pi \cdot n}{30}$$

$$\omega = 31.416$$

Безразмерный динамический прогиб вала в центре массы детали:

По аппроксимирующей формуле:

$$a_{yi} := 1.049 \cdot 10^{-3} + 3.2704 a_i - 0.4732 a_i^2 - 5.594 a_i^3 + 2.797 a_i^4$$



За действительные значения примем значения по аппроксимирующей формуле.

$$a_{yi} = \begin{pmatrix} 0.67 \\ 0.905 \\ 0.248 \end{pmatrix}$$

Приведенная масса деталей в пролёте, кг:

$$m_{iB} := 38.6 \cdot a_{yi}^2$$

$$m_i = \begin{pmatrix} 78.8 \\ 155 \\ 155 \end{pmatrix}$$

$$m_{iB} = \begin{pmatrix} 17.314 \\ 31.619 \\ 2.365 \end{pmatrix}$$

Суммарная приведенная масса деталей, кг:

$$m_B = \sum_{i=1}^{n_M} m_{iB}$$

где  $n_M$ -число деталей в пролёте.

$$m_B := 155 \cdot 2 + 78.8 = 388.8$$

Безразмерный коэффициент:

Чтобы выполнялось условие, примем первую угловую скорость вращения вала:

$$\omega_1 := 50 \quad \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$\xi_d := \frac{\omega}{\omega_1} = 0.628$$

$$\xi_d \leq 0.7$$

$$A_1 := \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot L^4}{12 \cdot \xi_d^2 \cdot E} = 0.015$$

$$A_2 := \frac{4 \cdot m_B \cdot \omega^2 \cdot L^3}{3 \cdot \pi \cdot E \cdot \xi_d^2} = 5.81 \times 10^{-4}$$

Расчётный диаметр вала, м:

$$d_p := 0.10^4$$

$$d_p := \sqrt{A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}} = 0.208$$

Принятый диаметр вала из условия:

$$d \geq d_p$$

Чтобы выполнялось условие жесткости, принимаем диаметр вала 110 мм.

$$d := 110$$

$$d := \frac{d}{1000} = 0.11$$

Масса единичной длины вала, кг/м:

$$m_b := \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \rho$$

$$m_b = 74.126$$

Относительная суммарная масса деталей:

$$a_m := \frac{m_B}{m_b \cdot L} \quad a_m = 0.807$$

Первая критическая угловая скорость вала, рад./с:

$$\alpha := 3.146 - 1.3426a_m + 0.836a_m^2 - 0.34086a_m^3 + 0.0638a_m^4 = 2.455$$

J-момент инерции сечения вала

$$J := \frac{\pi \cdot d^4}{64} = 7.187 \times 10^{-6}$$

$$\omega_1 := \left( \frac{\alpha}{L} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m_B}} = 8.564 \quad \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Принимаем первую критическую угловую скорость вала, рад/с.

$$\omega_1 := 50 \quad \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Условие виброустойчивости:

$$\xi_d := 0.10478 \frac{n}{\omega_1} = 0.629$$

$$\xi_d := \frac{\omega}{\omega_1} = 0.628$$

$$\xi_d \leq 0.7$$

$$\text{Усл} := \begin{cases} \text{"Условие виброустойчивости выполняется"} & \xi_d \leq 0.7 \\ \text{"Условие виброустойчивости НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Усл = "Условие виброустойчивости выполняется"

## Расчет на жесткость

Эксцентриситет массы детали, м:

$$e_k := \frac{10^{-3}}{\sqrt{\omega}} = 1.784 \times 10^{-4}$$

Относительные координаты опасного по жесткости сечения:

$$a_{si} := \frac{z_i}{L}$$

$$a_{si} = \begin{pmatrix} 0.154 \\ 0.5 \\ 0.638 \end{pmatrix}$$

Безразмерный динамический прогиб вала в опасном по жесткости сечении:

Аналогично тому, что было при расчётах на виброустойчивость, безразмерные динамические прогибы определяются аппроксимирующей формуле.

$$a_{zi} := 1.049 \cdot 10^{-3} + 3.2704 a_{si} - 0.4732 a_{si}^2 - 5.594 a_{si}^3 + 2.797 a_{si}^4$$

$$a_{zi} = \begin{pmatrix} 0.474 \\ 0.994 \\ 0.905 \end{pmatrix}$$

Приведенная масса вала, кг:

$$m_{bV} := 0.5 \cdot m_b \cdot L = 240.909$$

Смещение оси вала от оси вращения за счет зазора в опорах в опасном по жёсткости сечении, м:

По принятому диаметру вала принимаем подшипник качения однорядный шариковый.

$$d = 0.11 \text{ м}$$

где  $\Delta A_{и}$   $\Delta B$  - высота радиальных зазоров в опорах, м

$$\Delta_A := 3.5 \cdot 10^{-5} \quad \Delta_B := 3.5 \cdot 10^{-5}$$

-для деталей однопролётного вала

$$\Delta_{li} := (\Delta_B - \Delta_A) \cdot a_i + \Delta_A$$

$$\Delta_{li} = \begin{pmatrix} 3.5 \times 10^{-5} \\ 3.5 \times 10^{-5} \\ 3.5 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

-для опасных точек в пролёте однопролётного вала:

$$\Delta_{zi} := (\Delta_B - \Delta_A) \cdot a_{zi} + \Delta_A$$

$$\Delta_{zi} = \begin{pmatrix} 3.5 \times 10^{-5} \\ 3.5 \times 10^{-5} \\ 3.5 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Смещение оси вала от оси вращения за счет начальной изогнутости вала в опасном по жесткости сечении, м:

Отношение длины вала к его диаметру:

$$\frac{L}{d} = 59.091$$

$$\varepsilon_B := 0.075 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$$

-для деталей в пролёте:

$$\varepsilon_{li} := \varepsilon_B \cdot a_{yi} = \begin{pmatrix} 5.023 \times 10^{-5} \\ 6.788 \times 10^{-5} \\ 1.857 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

-для опасных точек в пролёте:

$$\varepsilon_{zi} := \varepsilon_B \cdot a_{zi} = \begin{pmatrix} 3.556 \times 10^{-5} \\ 7.451 \times 10^{-5} \\ 6.788 \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

где  $\varepsilon_B$  - начальная изогнутость вала в точке приведения В, м.

Смещение оси вала от оси вращения в точке приведения В за счет зазоров в опорах, м:

$$\Delta_B := \frac{\Delta_A + \Delta_B}{2} = 3.5 \times 10^{-5}$$

Приведенные эксцентритеты масс деталей, м:

в пролёте однопролётного вала:

$$e_{iB} := \frac{e_k}{a_{yi}} = \begin{pmatrix} 2.664 \times 10^{-4} \\ 1.971 \times 10^{-4} \\ 7.207 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Приведенный (к точке В) эксцентритеты масс деталей, м:

$$E_{iB} := \frac{\sum_{i=1}^{n_M} (e_{iB} \cdot m_{iB})}{m_{bB} + m_B} = 5.979 \times 10^{-5}$$

Приведенный (к точке В) эксцентрисит массы вала с деталями, м:

$$E_B := E_{iB} + \Delta_B + \varepsilon_B = 1.698 \times 10^{-4}$$

Динамический прогиб оси вала в точке приведения В, м:

$$y_B := \frac{E_B}{\left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2 - 1} = 1.108 \times 10^{-4}$$

Динамическое смещение центра тяжести деталей:

$$A_i := y_B \cdot a_{yi} + \Delta_{li} + \varepsilon_{li} + e_k = \begin{pmatrix} 3.378 \times 10^{-4} \\ 3.815 \times 10^{-4} \\ 2.594 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Динамическое смещение вала в опасных по жесткости сечениях, м

$$A_{zi} := y_B \cdot a_{zi} + \Delta_{zi} + \varepsilon_{zi} = \begin{pmatrix} 1.231 \times 10^{-4} \\ 2.195 \times 10^{-4} \\ 2.031 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

Для проверки условия жёсткости в опасных сечениях принимаем точки Z1 и Z2. Так как в точке Z1 будет устанавливаться уплотнение. А в точке Z2 (середина вала) происходит максимальный прогиб вала.

Динамическое смещение вала в точках Z1 и Z2 принимаем:

$$A_{Z1} := 1.289 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$A_{Z2} := 2.302 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Динамическое смещение вала в точке приведения:

$$A_B := y_B + \Delta_B + \varepsilon_B = 2.208 \times 10^{-4}$$

Условие жесткости:

$$n = 300 \text{ об./мин.}$$

Таблица 2.20 – Допускаемые динамические смещения вала, в месте установки уплотнений

Частота вращения вала, об/мин	Вид уплотнения			
	торцовое	сальниковое	манжетное	гидравлическое
До 100	0,25	0,10	0,15	0,25
100-500	0,25	-	0,15	0,25
500-750	0,15	-	0,10	0,25
750-2900	0,10	-	-	-

Таблица 2.21. – Предельно допустимый прогиб вала

Частота вращения, об./мин.	Допустимый прогиб вала, мм	
	на 1 м длины	на всю длину
Более 500	0,10	0,20
Менее 500	0,15	0,30

\*по РД 31.1.02-04.

Выбираем торцовое уплотнение, по таблице 2.20 допускаемое смещение вала:

$$A_{уп} := 0.25 \cdot 10^{-3} = 2.5 \times 10^{-4}$$

По таблице 2.21 предельно допустимый прогиб вала:

$$A_{пр} := 0.3 \cdot 10^{-3} = 3 \times 10^{-4} \text{ м}$$

Проверка условий жёсткости:

Для точки Z1:

$$\text{Усл} := \begin{cases} \text{"Условие жёсткости выполняется"} & A_{Z1} \leq A_{уп} \\ \text{"Условие жёсткости НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Усл = "Условие жёсткости выполняется"

Для точки Z2:

$$\text{Усл} := \begin{cases} \text{"Условие жёсткости выполняется"} & A_{Z2} \leq A_{\text{пр}} \\ \text{"Условие жёсткости НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Усл = "Условие жёсткости выполняется"

## Расчёт на прочность

Сосредоточенная центробежная сила, действующая на i-мешалку:

$$m_i := 38.6$$

масса каждой мешалки, кг

$$P_i := m_i \cdot \omega^2 \cdot A_i = \begin{pmatrix} 12.87 \\ 14.535 \\ 9.882 \end{pmatrix}$$

Приведенная центробежная сила:

$$P_B := m_{bB} \cdot \omega^2 \cdot A_B = 52.488$$

Сумма моментов сил инерции масс относительно опоры Б:

$$M_{Bn} := \sum_{i=1}^{n_M} P_i \cdot (L_n - l_i) = 310.342$$

Реакция опоры А:

$$R_A := \frac{M_{Bn}}{L_n} + \frac{P_B}{2} = 73.989$$

Сумма моментов сил инерции масс относительно опоры А:

$$M_{An} := \sum_{i=1}^{n_M} P_i \cdot l_i = 416.752$$

Реакция опоры Б:

$$R_B := \frac{M_{An}}{L} + \frac{P_B}{2} = 90.36$$

Изгибающий момент в опасных по прочности сечениях:

-между точками А и В однопролётного вала

$$k := 0$$

число масс между точками А и В

$$M_{zi} := R_A \cdot z_i - \sum_{i=1}^k P_i \cdot (z_i - l_i) = \begin{pmatrix} 149.586 \\ 316.061 \\ 382.651 \end{pmatrix}$$

-между точками В и Б однопролётного вала

$$t := 3$$

число масс между точками В и Б

$$M_{zi} := R_A \cdot z_i - P_B \cdot \left( z_i - \frac{L_n}{2} \right) - \sum_{i=1}^t P_i \cdot (z_i - l_i) = \begin{pmatrix} 305.482 \\ 353.859 \\ 373.21 \end{pmatrix}$$

Крутящие моменты в опасных по прочности сечениях:

$$p := 3$$

число мешалок ниже опасного сечения

$$M_i := \omega^{-1} \cdot \sum_{i=1}^p N_{ш} = 732.113$$

Момент сопротивления  $i$ -го опасного сечения

$$d_i := d$$

диаметр вала в  $i$ -ом опасном сечении

$$W_i := \frac{\pi \cdot d_i^3}{32} = 1.307 \times 10^{-4}$$

Эквивалентные напряжения в опасных сечениях:

$$\sigma_{\Sigma i} := W_i^{-1} \cdot \left( \sqrt{M_{zi}^2 + M_i^2} \right) = \begin{pmatrix} 6.071 \times 10^6 \\ 6.223 \times 10^6 \\ 6.289 \times 10^6 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\Sigma 1} := 1.343 \times 10^6 \quad \sigma_{\Sigma 2} := 1.545 \times 10^6 \quad \sigma_{\Sigma 3} := 1.594 \times 10^6$$

Допускаемое напряжение в  $i$ -ом опасном сечении:

коэффициент масштабного уменьшения предела усталости в  $i$ -ом опасном сечении.

Для валов из легированной стали:



$$k_M := 0.5074 + \frac{12.77}{d} - \frac{185.5}{d^2} + \frac{1397}{d^3} - \frac{3874}{d^4} = 0.595$$

коэффициент запаса прочности материала вала на выносливость в  $i$ -ом опасном сечении.

$k_z = 1,5-1,8$ -при приближенной расчетной схеме и отсутствии точных данных о механических характеристиках материала, но при достаточной достоверности определения усилий и напряжений;

$$k_z := 1.5$$

$k_\sigma$ -коэффициент концентрации напряжений в  $i$ -ом опасном сечении;

для шпоночных канавок и насадок ступицы или подшипника = 2.0

$$k_\sigma := 2.0$$

$\sigma_1$ -предел выносливости материала вала.

$$\sigma_B := 1500 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{B, \text{нн}} := 1500 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$\sigma_1 := 0.5 \cdot \sigma_B = 7.5 \times 10^8 \text{ МПа}$$

$$\sigma_i := \frac{k_M \cdot \sigma_1}{k_\sigma \cdot k_z} = 1.488 \times 10^8$$

$$\text{Усл} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \sigma_{\text{Э}1} \leq \sigma_i \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Усл = "Условие прочности выполняется"

Выполнили расчёт на жёсткость однопролётного вала постоянного поперечного сечения в сечениях Z1 и Z2. Получили результат, что условие жёсткости выполняется при диаметре вала 110 мм. В качестве уплотнения выбрали манжетное уплотнение для сечения Z1. Провели расчёт на прочность в опасных сечениях. Получили результат, что условие прочности выполняется. Провели расчёт на виброустойчивость, условие виброустойчивости выполняется. Первая критическая угловая скорость вала равняется 50 рад/с .

### 2.3.6 Расчёт и подбор штуцеров для реактора полимеризации

Химические вещества подаются в аппарат и выводятся из него через специальные устройства называемые штуцерами. Это сборочная единица, состоящая из патрубка и фланца. Штуцера свариваются в технологические отверстия в аппарате.

Внутренние или условные диаметры штуцеров рассчитывается по формуле массового расхода [14,стр.17]:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\rho \cdot \pi \cdot \omega}}$$

По полученным диаметрам отверстия, согласно [15, табл. 1] подбираем патрубки. Результаты расчётов представлены в таблице 2.22.

Таблица 2.22 – Подобранные патрубки

Назначение штуцера	Диаметр патрубка, мм	Длина патрубка, мм	Условный диаметр, мм	Р <sub>у</sub> , кгс/см <sup>2</sup>	Масса 1 м трубы, кг
Вход смеси пропилена, этилена, водорода	114x6	400	100	25	15,98
Основной вход смеси нефраса, ТЭА, катализатора, донора, фугата	114x6	400	100	25	15,98
Верхний вход смеси нефраса, ТЭА, катализатора, донора, фугата	57x5	200	50	25	6,41
Вход деминерализованной воды в рубашку	219x6	200	200	6	31,52
Вход деминерализованной воды в волнорезы	114x5	200	100	6	14,3
Выход деминерализованной воды из рубашки	219x6	200	200	6	31,52
Выход деминерализованной воды из волнорезов	114x5	200	100	6	14,3
Основная выгрузка суспензии	159x4.5	400	150	10	17,15
Дополнительные штуцера 3 шт	57x5	200	45	25	6,41
Верхняя крышка реактора	820x10	200	800	10	170,9
Дополнительные штуцера 3	114x6	400	100	25	15,98

Сдувки на факел, ППК	159x4.5	400	150	10	17,15
Мембранное предохранительное устройство	219x6	400	200	10	31,52
Азот высокого давления	57x5	200	45	25	6,41
Люк-лаз	530x9	200	500	10	115,6

По значениям условных диаметров и условных давлений (табл. 2.22) по пособию [11, табл. 21.9] подбираем фланцы 4 типа. Параметры фланцев указаны в таблицах 2.23-2.30.

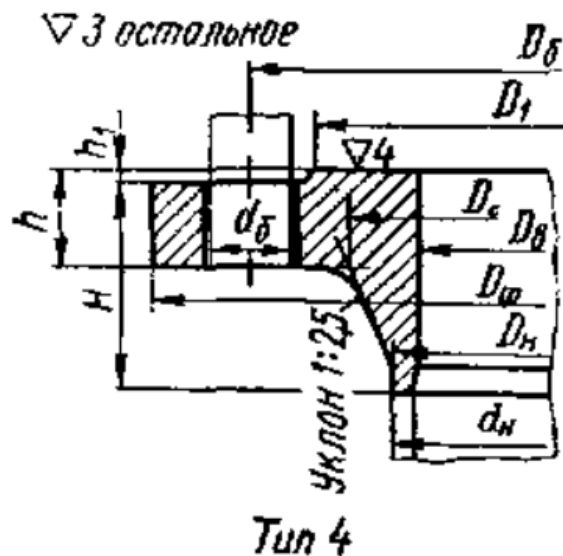


Рисунок 2.12. Фланец арматуры, соединительных частей и трубопроводов из черных металлов, цельные по ГОСТ 12830-67

Таблица 2.23 – Параметры для плоского фланца  $D_y=50$ ,  $P_y=25$  кгс/см<sup>2</sup>

$P_y$ , МН/ м <sup>2</sup>	$D_y$	$d_n$	$D_{ф}$	$D_b$	$D_1$	Болты		Тип фланца 4; ГОСТ 12830-67					масса , кг
						$d_b$	$z$	$D_г$	$D_н$	$D_в$	$H$	$h$	
						мм		шт		мм			
2,5	50	57	160	125	102	M16	4	76	58	49	45	17	2,81

Таблица 2.24 – Параметры для плоского фланца  $D_y=100$ ,  $P_y=6$  кгс/см<sup>2</sup>

$P_y$ , МН/ м <sup>2</sup>	$D_y$	$d_n$	$D_{ф}$	$D_b$	$D_1$	Болты		Тип фланца 4; ГОСТ 12830-67					масса , кг
						$d_b$	$z$	$D_г$	$D_н$	$D_в$	$H$	$h$	
						мм		шт		мм			
0,6	100	108	105	170	148	M16	4	102	90	78	37	13	2.76

Таблица 2.25 – Параметры для плоского фланца  $Dy=100$ ,  $P_y=25\text{кгс/см}^2$

$P_y$ , МН/ м <sup>2</sup>	$Dy$	$d_n$	$D_\phi$	$D_6$	$D_1$	Болты		Тип фланца 4; ГОСТ 12830-67					масса , кг
						$d_6$	$z$	$D_\Gamma$	$D_n$	$D_b$	$H$	$h$	
						мм					шт	мм	
2,5	100	108	230	190	162	M20	8	132	110	96	58	21	6,51

Таблица 2.26 – Параметры для плоского фланца  $Dy=150$ ,  $P_y=10\text{кгс/см}^2$

$P_y$ , МН/ м <sup>2</sup>	$Dy$	$d_n$	$D_\phi$	$D_6$	$D_1$	Болты		Тип фланца 4; ГОСТ 12830-67					масса , кг
						$d_6$	$z$	$D_\Gamma$	$D_n$	$D_b$	$H$	$h$	
						мм					шт	мм	
1,0	150	159	280	240	212	M20	8	180	161	146	57	19	8,17

Таблица 2.27 – Параметры для плоского фланца  $Dy=200$ ,  $P_y=6\text{кгс/см}^2$

$P_y$ , МН/ м <sup>2</sup>	$Dy$	$d_n$	$D_\phi$	$D_6$	$D_1$	Болты		Тип фланца 4; ГОСТ 12830-67					масса , кг
						$d_6$	$z$	$D_\Gamma$	$D_n$	$D_b$	$H$	$h$	
						мм					шт	мм	
0,6	200	219	315	280	258	M16	8	235	222	202	50	18	11,0

Таблица 2.28 – Параметры для плоского фланца  $Dy=200$ ,  $P_y=10\text{кгс/см}^2$

$P_y$ , МН/ м <sup>2</sup>	$Dy$	$d_n$	$D_\phi$	$D_6$	$D_1$	Болты		Тип фланца 4; ГОСТ 12830-67					масса , кг
						$d_6$	$z$	$D_\Gamma$	$D_n$	$D_b$	$H$	$h$	
						мм					шт	мм	
1,0	200	219	335	295	242	M20	8	240	222	202	58	19	11,4

Таблица 2.29 – Параметры для плоского фланца  $Dy=500$ ,  $P_y=10\text{кгс/см}^2$

$P_y$ , МН/ м <sup>2</sup>	$Dy$	$d_n$	$D_\phi$	$D_6$	$D_1$	Болты		Тип фланца 4; ГОСТ 12830-67					масса , кг
						$d_6$	$z$	$D_\Gamma$	$D_n$	$D_b$	$H$	$h$	
						мм					шт	мм	
1,0	500	530	670	620	585	M24	20	559	535	501	90	38	71,0

Таблица 2.29 – Параметры для плоского фланца  $Dy=500$ ,  $P_y=10\text{кгс/см}^2$

$P_y$ , МН/ м <sup>2</sup>	$Dy$	$d_n$	$D_\phi$	$D_6$	$D_1$	Болты		Тип фланца 4; ГОСТ 12830-67					масса , кг
						$d_6$	$z$	$D_\Gamma$	$D_n$	$D_b$	$H$	$h$	
						мм					шт	мм	
1,0	800	820	1010	950	905	M30	28	850	826	792	75	27	91,0

### 2.3.7 Расчёт необходимости укрепления отверстий

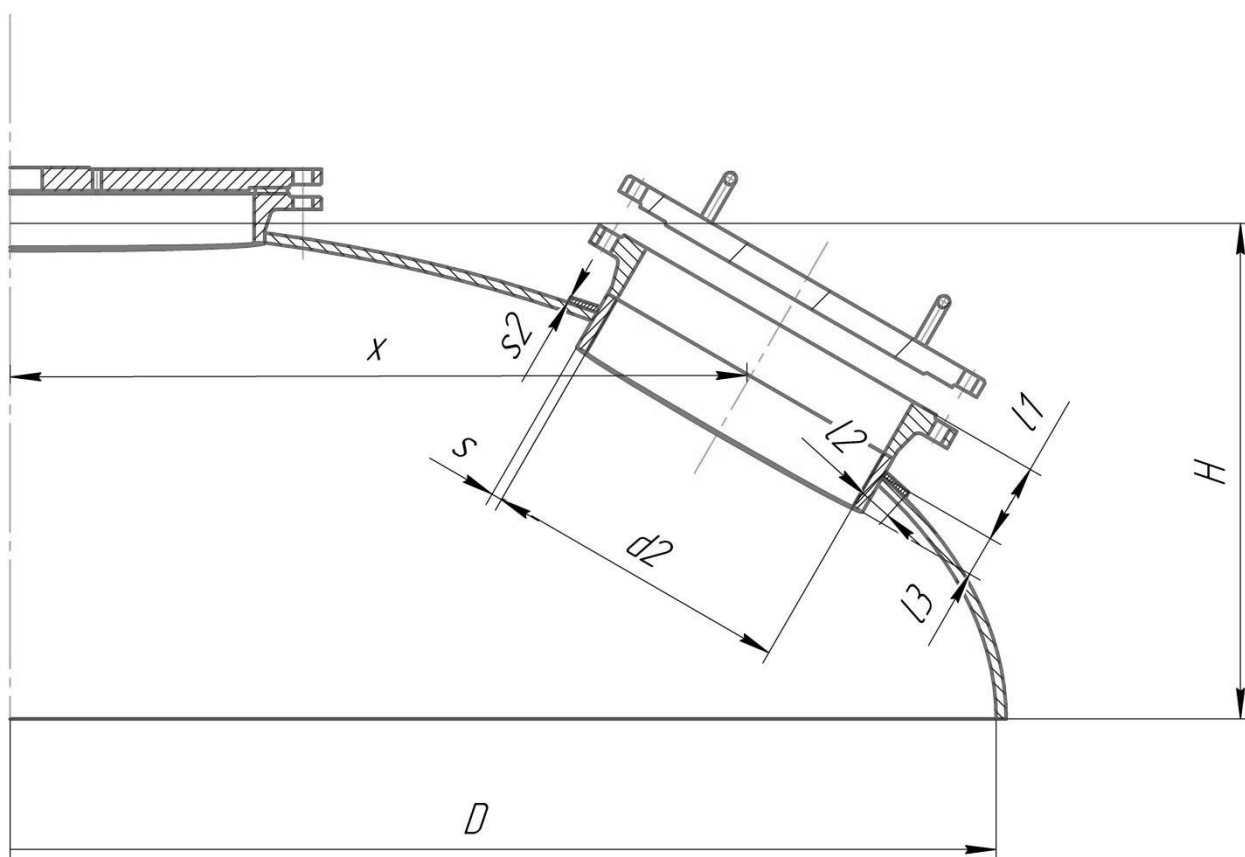


Рисунок 2.13. Схема укрепления люк-лаза

Задачей расчёта укрепления отверстий является определения минимального диаметра отверстия не требующего укрепления и условия укрепления.

Для расчёта укрепления отверстий был выбран люк-лаз. Выбираем основные его параметры по [17]. Расчёт проводился согласно методикам пособий [11] и [13].

#### **Исходные данные:**

Внутренний диаметр цилиндрической обечайки, мм:

$$D := 3200$$

Внутренний диаметр отверстия, мм:

$$d_2 := 512$$

Рабочее давление, МПа:

$$p := 0.9$$

Температура, °C:

$$t_c := 135$$

Исполнительная толщина стенок, мм:

$$s := 16$$

Расстояние от центра укрепляемого отверстия до оси эллиптического днища, мм:

$$x := 1000$$

Материал корпуса аппарата, штуцера и накладного кольца:

12X18H10T

Высота стандартного эллиптического днища, мм:

$$H := 0.25 \cdot D$$

$$H = 800$$

Допускаемое напряжение для материала при температуре, МПа:

$$\sigma_D := 168.9$$

Допускаемое напряжение для материала накладного кольца при температуре,  
МПа:

$$\sigma_{D1} := \sigma_D$$

Прибавка к расчетной толщине стенок, мм:

$$c := 1$$

Исполнительная длина внешней части штуцера, мм:

$$l_1 := 130$$

Исполнительная ширина накладного кольца, мм:

$$l_2 := 50$$

Исполнительная длина внутренней части штуцера, мм:

$$l_3 := 70$$

Исполнительная толщина накладного кольца, мм:

$$s_2 := 10$$

## Расчет укрепления отверстия в эллиптической крышке

Расчётный диаметр оболочки, мм:

$$D_p := \frac{D^2}{2 \cdot H} \cdot \sqrt{1 - 4 \cdot \frac{D^2 - 4 \cdot H^2 \cdot x^2}{D^4}}$$

$$D_p = 6.705 \times 10^3$$

Расчетный диаметр отверстия в стенке крышки, мм:

$$d_p := \frac{d_2 + 2 \cdot c}{\sqrt{1 - \left(\frac{2 \cdot x}{D_p}\right)^2}}$$

$$d_p = 538.513$$

Расчетная толщина стенки оболочки, мм

$$s_p := \frac{p \cdot D}{4 \cdot \phi_p \cdot \sigma_d - p} \quad s_p := \frac{p \cdot D}{4 \cdot \phi_p \cdot \sigma_d - p}$$

Расчет толщины стенки оболочки, мм:

$$s_p := \frac{p \cdot D}{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_p - p}$$

$$s_p = 4.269$$

Расчетная толщина стенки штуцера, мм

$$s_{p1} := \frac{p \cdot (d_2 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_d \cdot \phi_p - p}$$

$$s_{p1} = 1.373$$

Расчетные длины штуцеров, мм:

$$l_{1p} := \min \left[ l_1, \sqrt{(d_2 + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - c)} \right]$$

$$l_{1p} = 68.015$$

$$l_{3p} := \min \left[ l_3, 0.5 \cdot \sqrt{(d_2 + 2 \cdot c) \cdot (s_1 - 2 \cdot c)} \right]$$

$$l_{3p} = 32.062$$

Расчетная ширина накладного кольца, мм:

$$l_{2p} := \min \left[ l_2, \sqrt{D \cdot (s_2 + s_1 - c)} \right]$$

$$l_{2p} = 50$$

Расчетная ширина зоны укрепления в обечайках и днищах при отсутствии торообразной вставки или вварного кольца, мм:

$$l_p := \sqrt{D \cdot (s1 - c)}$$

Отношение допускаемых напряжений:

-для внешней части штуцера

$$\chi_1 := 1$$

-для накладного кольца

$$\chi_2 := 1$$

-для внутренней части штуцера

$$\chi_3 := 1$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующий дополнительного укрепления, мм:

$$d_{op} := 0.4 \cdot \sqrt{D \cdot (s1 - c)}$$

$$d_{op} = 67.882$$

Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующий дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда, мм:

$$d_o := 2 \cdot \left[ \left( \frac{s1 - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{D \cdot (s1 - c)}$$

$$d_o = 444.098$$

Проверка необходимости укрепления отверстия:

$$P_{rov} := \begin{cases} \text{"Необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_o < d_2 \\ \text{"Укрепление отверстия Не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{rov} = \text{"Необходимо укрепление отверстия"}$$

Проверка условия укрепления одиночного отверстия:

$$A_1 := l_{1p} \cdot (s1 - s_{p1} - c) \cdot \chi_1$$

$$A_1 = 518.741$$

$$A_2 = 500$$

$$A_2 := l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2$$

$$A_3 = 288.562$$

$$A_3 := l_{3p} \cdot (s1 - c) \cdot \chi_3$$

$$A_{p.c.} := l_p \cdot (s1 - s_p - c)$$

$$A_{p.c.} = 802.951$$

$$A_p = 1.004 \times 10^3$$



$$A_p := 0.5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot s_p$$

$$\text{Sum} := A_1 \cdot \chi_1 + A_2 \cdot \chi_2 + A_3 \cdot \chi_3 + A_{p.c.}$$

$$\text{Sum} = 2.11 \times 10^3$$

$$\text{Prov} := \begin{cases} \text{"Условие укрепления отверстия выполняется"} & \text{if } \text{Sum} \geq A_p \\ \text{"Условие укрепления отверстия НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Prov} = \text{"Условие укрепления отверстия выполняется"}$$

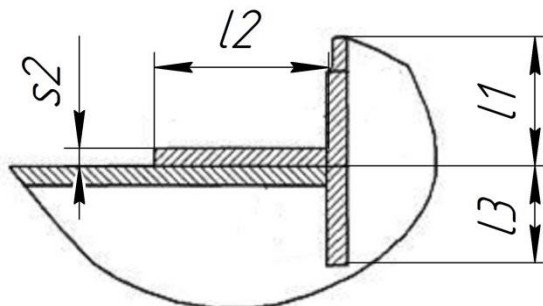


Рисунок 2.13. Накладное (укрепляющее) кольцо

В результате расчёта укрепления отверстий было выявлено, что расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующий дополнительного укрепления при наличии избыточной толщины стенки сосуда составляет 444 мм. Для отверстий большего диаметра необходимо использование накладного кольца с параметрами:  $l_2=50$  мм,  $s_2=10$  мм. Схема накладного кольца на рис. 2.14.

### 2.3.8 Подбор стандартной опоры аппарата

Для установки аппарата выбираем опорную обечайку. Это вызвано тем, что часто необходимо обслуживание реактора и под телом. Поэтому необходимо достаточное пространство.

Конструктивные размеры элементов опоры устанавливаются в зависимости от нагрузки на одну опору  $Q$ , кН. Рассчитаем вес аппарата, для того, чтобы узнать нагрузку на одну опору.

### Масса обечайки.

Длина обечайки, м:

$$L_{об} := 5.2$$

Наружный диаметр обечайки, м:

$$D_H := 3.232$$

Внутренний диаметр обечайки, м:

$$D := 3.2$$

Плотность стали, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{ст} := 7800$$

Масса обечайки, кг:

$$m_{об} := \frac{\pi}{4} (D_H^2 - D^2) \cdot L_{об} \cdot \rho_{ст} = 6.557 \times 10^3$$

### Масса эллиптического днища.

Согласно [11,таблице 16.1] для эллиптических днищ с d=3200 мм: масса - 1483 кг, диаметр заготовки перед штамповкой - 3879 мм.

Масса днища и крышки:

$$m_{эд} := 1483$$

$$m_{эк} := 1483$$

### Масса цилиндрической части рубашки.

Длина обечайки, м:

$$L_{об} := 4.600$$

Наружный диаметр обечайки, м:

$$D_H := 3.412$$

Внутренний диаметр обечайки, мм:

$$D := 3.4$$

Масса цилиндрической части рубашки, кг:

$$m_{руб.} := \frac{\pi}{4} (D_H^2 - D^2) \cdot L_{об} \cdot \rho_{ст} = 2.304 \times 10^3$$

### Масса эллиптической части рубашки.

Согласно [11,таблице 16.1] для эллиптических днищ с d=3400 мм: масса - 619 кг, диаметр заготовки перед штамповкой - 4092 мм.

$$m_{\text{эд.руб}} := 619$$

### Масса вала мешалки.

Диаметр вала, м:

$$D_{\text{в.м}} := 0.11$$

Длина вала, м:

$$L_{\text{в.м.}} := 6.42$$

Масса вала, кг:

$$m_{\text{в.меш.}} := \frac{\pi}{4} D_{\text{в.м.}}^2 \cdot L_{\text{в.м.}} \cdot \rho_{\text{ст}} = 475.888$$

### Масса трубок волнореза.

Внутренний диаметр трубок, м:

$$d_{\text{вн}} := 0.021$$

Наружный диаметр трубок, м:

$$d_{\text{нар}} := 0.025$$

Число волнорезов, шт.:

$$z := 4$$

Число труб в волнорезах, шт.:

$$N := 4$$

Масса волнорезов, кг:

$$m_{\text{тр}} := N \cdot \left[ \frac{\pi}{4} (d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вн}}^2) \cdot L_{\text{об}} \cdot \rho_{\text{ст}} \right] = 20.741$$

### Масса мешалок.

Согласно Таблицам 2.13.1 и 2.13.2 масса мешалок, кг:

$$m_{\text{лоп}} := 4.95$$

$$m_{\text{тур}} := 38$$

### Масса штуцеров и фланцев корпуса.

Таблица 2.21 – Расчёт массы штуцеров

Назначение штуцера	Диаметр патрубка, мм	Длина патрубка, мм	Масса 1 м трубы, кг	$R_y$ , кгс/см <sup>2</sup>	масса патрубка, кг	масса фланца, кг	Сумма, кг
Вход смеси пропилена, этилена, водорода	114x6	400	15,98	25	6,392	6,51	12,902
Основной вход смеси нефраса, ТЭА, катализатора, донора, фугата	114x6	400	15,98	25	6,392	6,51	12,902
Верхний вход смеси нефраса, ТЭА, катализатора, донора, фугата	57x5	200	6,41	25	1,282	2,81	4,092
Вход деминерализованной воды в рубашку	219x6	200	31,52	6	6,304	11	17,304
Вход деминерализованной воды в волнорезы	114x5	200	14,3	6	2,82	2,76	5,62
Выход деминерализованной воды из рубашки	219x6	200	31,52	6	6,304	11	17,304
Выход деминерализованной воды из волнорезов	114x5	200	14,3	6	2,82	2,76	5,62
Основная выгрузка суспензии	159x4.5	400	17,15	10	6,86	8,17	15,03
Резервная выгрузка суспензии	159x4.5	400	17,15	10	6,86	8,17	15,03
Сдувки на факел, ППК	159x4.5	400	17,15	10	6,86	8,17	15,03
Мембранное предохранительное устройство	219x6	400	31,52	10	12,608	11,4	24,008
Азот высокого давления	57x5	200	6,41	25	1,282	2,81	4,092
Люк-лаз	530x9	200	115,6	10	23,12	71	94,12
<b>Итого:</b>	<b>237,438</b>						

$M_{\text{сум}} := 237.438$

## Масса воды при гидроиспытаниях внутри реактора

Объём реактора, м<sup>3</sup>:

$$V_p := 50$$

Плотность воды, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_B := 1000$$

Масса воды внутри реактора, кг:

$$m_{в.реак} := V_p \cdot \rho_B = 5 \times 10^4$$

## Масса воды при гидроиспытаниях внутри рубашки

Диаметр рубашки, м:

$$D_{руб} := 3.400$$

Диаметр реактора, м:

$$D_{реакт} := 3.200$$

Длина рубашки, м:

$$L_{руб} := 5.440$$

Масса воды в рубашке, кг:

$$m_{в.руб} := \left[ \frac{\pi}{4} \left[ (D_{руб})^2 - D_{реакт}^2 \right] \cdot L_{руб} \cdot \rho_B \right] = 5.64 \times 10^3$$

Масса самого аппарата, кг:

$$M_{ап} := (m_{об} + m_{эд} + m_{эк} + m_{руб.} + m_{эд.руб} + m_{в.меш.} + m_{тр} + m_{лоп} + m_{тур} + M_{сум} + M_{п}) = 1.332 \times 10^4$$

Общая масса аппарата с водой, кг:

$$M := M_{ап} \cdot 1.2 + (m_{в.реак} + m_{в.руб}) = 7.163 \times 10^4$$

Нагрузка на опору максимальная, Н:

$$G_{ап.мах} := g \cdot M = 7.027 \times 10^5$$

$$G_{ап.мах} := G_{ап.мах} \cdot 10^{-6} = 0.70 \text{ МН}$$

Нагрузка на опору минимальная, Н:

$$G_{ап.мин} := M_{ап} \cdot g = 1.307 \times 10^5$$

$$G_{ап.мин} := G_{ап.мин} \cdot 10^{-6} = 0.13 \text{ МН}$$

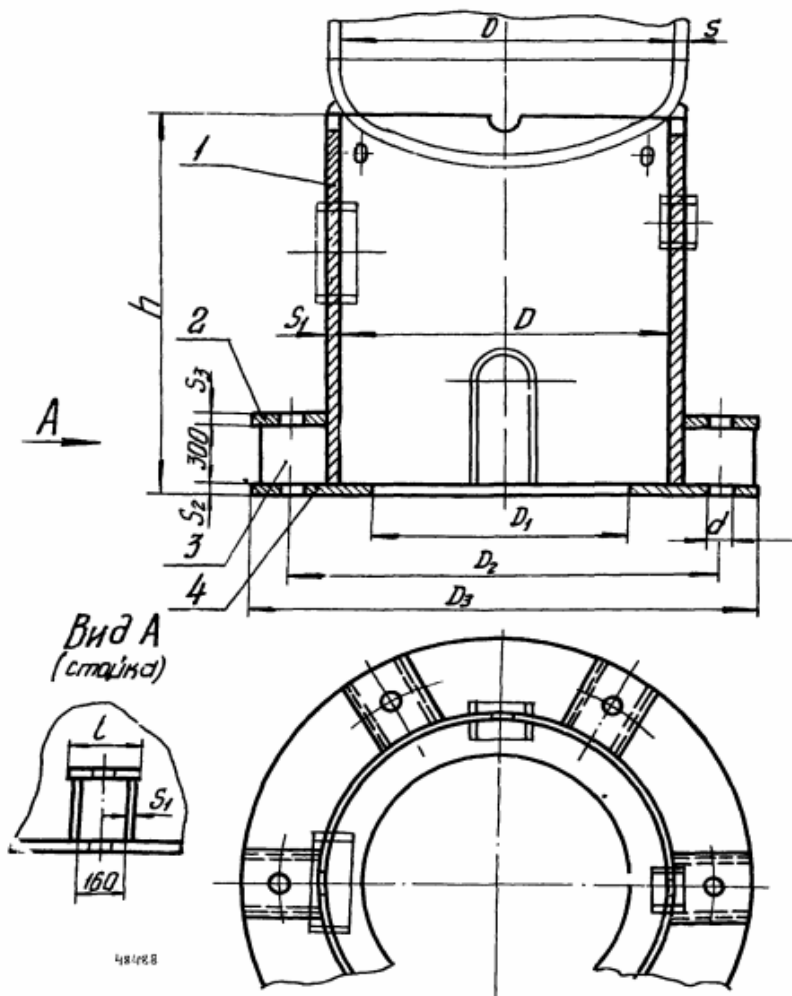
Согласно [18, табл. 1] подбираем опорную обечайку ТИП 2. С параметрами, указанными в таблице 2.22.

Таблица 2.22 – Параметры опорной обечайки

Q <sub>max</sub> = 1,6 МН				Q <sub>min</sub> до 0,32 МН			Фундаментные болты		
D	D1	D2	D3	s1	s2	s3	d	d резьбы	Количество
3400	3200	3620	3760	8	25	25	60	36	16

Тип 2

Опоры цилиндрические с наружными стойками под болты



1 - обечайка;  
3 - ребро;

2 - планка;  
4 - кольцо нижнее

Черт. 2

$$L = 160 + 4S_1$$

Примечание. Допускается изготовление стоек в штампованном исполнении, при этом толщина стойки должна быть не менее 0,75 толщины планки  $S_2$

Рисунок 2.9. Опорная обечайка.

**Расчёт на прочность.**

Максимальный вес, МН:

$$Q_{\max} := G_{\text{ап. max}} = 0.703$$

Минимальный вес, МН:

$$Q_{\text{раб}} := G_{\text{ап. min}} = 0.131$$

Изгибающий момент:

$$M := 0$$

$$M_1 := 0$$

Внутренний диаметр опорного фундаментного кольца, м:

$$D_1 := 3.200$$

Наружный диаметр, м:

$$D_2 := 3.760$$

Материал сталь 16ГС, допускаемое напряжение при нормальных условиях, МПа:

$$\sigma := 196$$

Толщина опоры, мм:

$$s := 8$$

Наружный диаметр аппарата, м:

$$D_H := 3.400$$

Коэффициент прочности сварных швов:

$$\phi := 0.8$$

Опорная площадь фундаментного кольца, м<sup>2</sup>:

$$F := \frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2) = 3.061$$

Момент сопротивления изгибу опорной площади фундаментного кольца, м<sup>3</sup>:

$$W := \frac{\pi}{32} \cdot \left( \frac{D_2^4 - D_1^4}{D_2} \right) = 2.481$$

Условие прочности:

$$Us1 := \left( \begin{array}{l} \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} \text{ if } \frac{Q_{\max}}{F} + \frac{M}{W} > \sigma \\ \text{"Условие прочности НЕ выполняется"} \text{ if } \frac{Q_{\text{раб}}}{F} + \frac{M}{W} > \sigma \\ \text{"Условие прочности ВЫПОЛНЯЕТСЯ"} \text{ otherwise} \end{array} \right)$$

$$Us1 = \text{"Условие прочности ВЫПОЛНЯЕТСЯ"}$$

Площадь опасного сечения сварного шва, м<sup>2</sup>:

$$f_c := \pi \cdot D_H \cdot 0.7 \cdot s = 59.816$$

Момент сопротивления сварного шва изгибу, м<sup>3</sup>:

$$W_c := 0.8 \cdot 0.7 \cdot s \cdot D_H^2$$

Напряжение в сварном шве при работе на срез, МПа:

$$\sigma_c := 0.8 \cdot \phi \cdot \sigma = 125.44$$

Условие прочности сварного шва:

$$U_{sl} := \left( \begin{array}{l} \text{"Условие прочности сварного шва НЕ выполняется"} \text{ if } \frac{Q_{\max}}{f_c} + \frac{M_1}{W_c} > \sigma_c \\ \text{"Условие прочности сварного шва НЕ выполняется"} \text{ if } \frac{Q_{\text{раб}}}{f_c} + \frac{M_1}{W_c} > \sigma_c \\ \text{"Условие прочности сварного шва ВЫПОЛНЯЕТСЯ"} \text{ otherwise} \end{array} \right)$$

$U_{sl} = \text{"Условие прочности сварного шва ВЫПОЛНЯЕТСЯ"}$

Таким образом, выбранная опорная обечайка удовлетворяет заданным требованиям.



### 3. Расчёт кожухотрубчатого теплообменника

#### 3.1 Технологический расчёт теплообменника

Определение поверхности теплообмена будет вестись в соответствии с методикой, изложенной в "Глава 4. Теплопередача в химической аппаратуре" [14].

Таблица 3.1 – Исходные данные к расчёту теплообменника

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы изм.
Начальная температура деминерализованной воды:	$t_{н.Д.В.}$	30	$^{\circ}\text{C}$
Конечная температура деминерализованной воды:	$t_{к.Д.В.}$	20	$^{\circ}\text{C}$
Начальная температура оборотной воды:	$t_{н.О.В.}$	12	$^{\circ}\text{C}$
Начальная температура оборотной воды:	$t_{к.О.В.}$	25	$^{\circ}\text{C}$
Рабочее давление в межтрубном пространстве:	$P_{\text{раб.мжт}}$	0,6	МПа
Рабочее давление в трубном пространстве:	$P_{\text{раб.тр}}$	0,25	МПа
Расход деминерализованной воды:	$G_{\text{д.в.}}$	50	кг/с

#### Выбор взаимного направления движения теплоносителей.

Правильный выбор взаимного направления движения теплоносителей имеет существенное значение для наиболее экономичного проведения процесса теплообмена. Поэтому, в соответствии с рекомендациями, изложенными в [19,стр.304], принимаем направление движение теплоносителей: противотоком.

Это даёт то, что при противотоке более холодный теплоноситель с начальной температурой  $t_{2н}$  может нагреться до более высокой, по сравнению с прямоточным движением, температурой  $t_{2к}$ , близкой к начальной

температуре  $t_{1н}$  более нагретого теплоносителя (рис. 3.1). Это позволит сократить расход более холодного теплоносителя. Однако, выбор противоточной схемы движения приводит к некоторому уменьшению средней разности температур и соответственно к увеличению потребной поверхности теплообмена, а следовательно и к некоторому увеличению габаритов аппарата. Но, тем не менее, противоток более экономичен, поэтому принимаем именно эту схему движения.

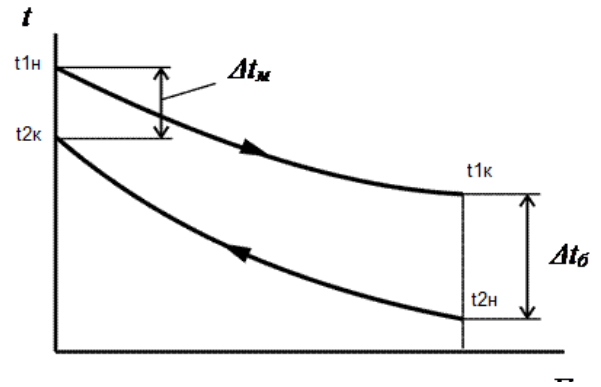


Рисунок 3.1. График изменения температур теплоносителей противоточной схемы движения.

### Расчёт средней разницы температур между теплоносителями.

Согласно методике, изложенной в [14,стр.169] определим среднюю разность температур при противотоке теплоносителей:

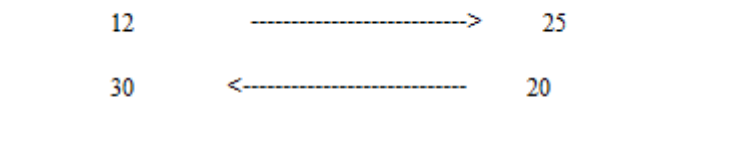


Рисунок 3.2. Тепловая схема

$$\Delta t_б := t_{н.д.в.} - t_{н.о.в.} = 18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_м := t_{к.о.в.} - t_{к.д.в.} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Так как  $\frac{\Delta t_б}{\Delta t_м} = 1.882 < 2$ , то средняя разность температур находится как среднее

арифметическое,  $^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t_{ср} := \frac{(\Delta t_б + \Delta t_м)}{2} = 11.5$$

## Расчёт средней температуры теплоносителей.

Среднее значение температуры "холодного" (ХС) и "горячего" (ГС) теплоносителей вычисляется по формулам, изложенным в [14,стр.170], °С:

$$t_{\text{ср.ХС}} := \frac{t_{\text{к.д.в.}} + t_{\text{н.д.в.}}}{2} = 25$$

$$t_{\text{ср.ГС}} := \Delta t_{\text{ср}} + t_{\text{ср.ХС}} = 35.16$$

## Выбор значений теплофизических свойств теплоносителей.

Значения теплофизических свойств теплоносителей при их средних температурах подбираем из справочника [13].

### ТРУБНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Теплоноситель: ОБОРОТНАЯ ВОДА

Средняя температура:  $t_{\text{ср.ХС}} = 25$  °С

Теплоёмкость:  $C_{p1} := 4.1817 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

Плотность:  $\rho_1 := 997.8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Вязкость:  $\mu_1 := 0.9736 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$

### МЕЖТРУБНОЕ ПРОСТРАНСТВО

Теплоноситель: ДЕМИНЕРАЛИЗОВАННАЯ ВОДА

Средняя температура:  $t_{\text{ср.ГС}} = 35.16$  °С

Теплоёмкость:  $C_{p2} := 4.1769 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

Плотность:  $\rho_2 := 995.5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Вязкость:  $\mu_2 := 0.8683 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$

## Расчёт расходов теплоносителей.

Массовый расход деминерализованной воды, кг/с:

$$G_{\text{д.в.}} := 50$$

По уравнению теплового баланса [19,стр.262], массовый расход оборотной воды с учётом теплотерь 5% будет равен, кг/с:

$$G_{\text{о.в.}} := \frac{1.05 G_{\text{д.в.}} \cdot C_{p2} \cdot (t_{\text{н.д.в.}} - t_{\text{к.д.в.}})}{C_{p1} \cdot (t_{\text{к.о.в.}} - t_{\text{н.о.в.}})} = 40.338$$

## Расчёт тепловой нагрузки аппарата.

Так как в заданном нам процессе не происходит изменение агрегатного состояния ни вещества теплоносителя, ни вещества хладагента, то тепловая нагрузка находится также по уравнению теплового баланса [19,стр.262]:

$$Q := G_{o.в.} \cdot C_{p1} \cdot (t_{к.о.в.} - t_{н.о.в.}) = 2.193 \times 10^6 \text{ Вт}$$

### **Предварительный расчёт ориентировочной поверхности теплообмена.**

Вычислим ориентировочную поверхность теплообмена при максимальном и минимальном коэффициентах теплопередачи по [14,табл.4.8]. Коэффициент теплопередачи принимаем для вынужденного движения: от жидкости к жидкости.

$$K_{op_{min}} := 80 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad K_{op_{max}} := 170 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Тогда ориентировочная поверхность теплообмена вычислим по основному уравнению теплопередачи [19,стр.262]:

$$F_{op_{min}} := \frac{Q}{K_{op_{max}} \cdot \Delta t_{cp}} = 126.958 \text{ м}^2 \quad F_{op_{max}} := \frac{Q}{K_{op_{min}} \cdot \Delta t_{cp}} = 269.786 \text{ м}^2$$

### **Определение скорость движения теплоносителя в трубном пространстве и числа труб в трубном пучке.**

Для дальнейшего расчёта необходимо задаться значением критерия Рейнольдса в трубном пространстве, а также параметрами труб.

Принимаем значение критерия Рейнольдса равным 20000, которое является значением: развитого турбулентного течения [14,стр.17]. А также зададимся параметрами стандартных труб диаметром 25\*2мм.

$$Re_1 := 20000; \quad d_{вн} := 0.02 \text{ м}; \quad d_{нар} := 0.022 \text{ м}; \quad d_1 := d_{вн}; \quad d_2 := d_{нар};$$

Ориентировочно зададимся диаметром теплообменника равным:

$$D := 1.0 \text{ м}$$

Тогда скорость теплоносителя в трубном пространстве найдём из формулы критерия Рейнольдса [14,стр.17] будет равна:

$$\omega_1 := \frac{Re_1 \cdot \mu_1}{d_1 \cdot \rho_1} = 0.929 \frac{м}{с}$$

Число параллельно работающих труб 25\*2, находим по формуле:

$$n := \text{ceil}\left(\frac{G_{o.в.}}{0.785 \cdot Re_1 \cdot d_{вн} \cdot \mu_1}\right) = 126 \text{ труб}$$

### **Расчёт скорости движения теплоносителя в межтрубном пространстве.**

Для интенсификации процесса теплообмена в межтрубном пространстве будут установлены перегородки. Согласно [20, табл.5], для аппарата диаметром 1000 мм и наружным диаметром труб 25 мм, площадь проходного сечения между перегородками будет равна:

$$S_M := 13 \cdot 10^{-2} = 0.13 \text{ м}^2$$

Тогда скорость теплоносителя в межтрубном пространстве будет равна, м/с:

$$\omega_2 := \frac{G_{д.в.}}{\rho_2 \cdot S_M} = 0.386$$

Для определения значения критерия Рейнольдса, необходимо определить эквивалентный диаметр теплообменника с гладкими трубами:

Согласно [14, стр.27], эквивалентный диаметр будет равен, м<sup>2</sup>:

$$d_3 := \frac{4 \cdot \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} - n \cdot \frac{\pi \cdot d_{нар}^2}{4} \right)}{n \cdot (\pi \cdot d_{нар})} = 0.292$$

Тогда значения критерия Рейнольдса для межтрубного пространства:

$$Re_2 := \frac{\omega_2 \cdot d_3 \cdot \rho_2}{\mu_2} = 1.295 \times 10^5$$

### **Расчёт ориентировочных коэффициентов теплоотдачи для каждого потока.**

Коэффициент теплоотдачи находится по формуле [14, стр.150]:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{эkv}}$$

Для расчёта необходимо подобрать критериальное уравнение расчета критерия Нуссельта, а также для расчёта процесса теплопередачи необходимо

знать температуры  $t_{ст1}$  и  $t_{ст2}$ . Расчёт будем вести по методике [14,стр.219-221]

Зададимся значениями  $t_{ст1}$  и  $t_{ст2}$ , °С, исходя из условия:

$$t_{ср.г.с} > t_{ст1} > t_{ст2} > t_{ср.х.с}$$

$$t_{ср.г.с} = 35.16$$

$$t_{ср.х.с} = 25$$

Примем и позже уточним значения, °С :

$$t_{ст1} := 36$$

$$t_{ст2} := 25$$

### **Расчёт коэффициента теплоотдачи для трубного пространства.**

По [14,рис.Х] определяем значения коэффициентов теплопроводности обратной воды при  $t_{ст1}$ :

$$\lambda_{о.в.} := 0.5 \frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{С}}$$

$$\lambda_{о.в.} := 1.163 \cdot \lambda_{о.в.} = 0.64 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

По [14,рис.ХIII] находим значения критерия Прандтля ( $Pr$ ) для обратной воды при средней температуре:

$$Pr := 4$$

По [14,рис.ХIII] находим значения критерия Прандтля ( $Pr_{ст}$ ) для обратной воды при температуре стенки  $t_{ст1}$ , °С:

$$Pr_{ст} := 4.5$$

$\varepsilon_1 := 1$  - коэффициент, учитывающий влияние на коэффициент теплоотдачи отношения длины трубы к ее диаметру  $l/d > 50$  [19,табл.4.5].

### **Критерий Нуссельта для трубного пространства:**

Так как горячий поток движется турбулентно в прямых трубах [14,стр.152], то критериальное уравнение для расчета критерия Нуссельта будет выглядеть так:

$$Nu := 0.023 \cdot \varepsilon_1 \cdot Re_1^{0.8} Pr^{0.43} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0.25} = 132.893$$

**Ориентировочный коэффициент теплоотдачи для трубного пространства:**

$$\alpha_{о.в.} := \frac{Nu \cdot \lambda_{о.в.}}{d_1} = 3.827 \times 10^3 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

**Расчёт коэффициента теплоотдачи для межтрубного пространства.**

По [14,рис.X] определяем значения коэффициентов теплопроводности обратной воды при  $t_{ст2}$ , °C:

$$\lambda_{д.в.} := 0.5 \frac{ккал}{м \cdot ч \cdot C}$$

$$\lambda_{д.в.} := 1.163 \cdot \lambda_{д.в.} = 0.616 \frac{Вт}{м \cdot К}$$

По [14,рис.XIII] находим значения критерия Прандтля (Pr) для деминерализованной воды при средней температуре:

$$Pr := 6.5$$

По [14,рис.XIII] находим значения критерия Прандтля ( $Pr_{ст}$ ) для деминерализованной воды при температуре стенки  $t_{ст2}$ , °C:

$$Pr_{ст} := 6.6$$

$\varepsilon_1 := 0.4$  - коэффициент, учитывающий, что теплоноситель в межтрубном пространстве лишь часть пути движется поперек труб и при угле атаки, меньшем 90градусов; кроме того он может протекать через щели между перегородками и кожухом или трубами [14,табл.4.5].

**Критерий Нуссельта для межтрубного пространства:**

Так как холодный поток поперечно обтекает пучок гладких труб при их шахматном расположении [14,стр.156], при турбулентном режиме движения

жидкости, то критериальное уравнение для нахождения критерия Нуссельта имеет вид:

$$Nu := 0.4 \cdot \varepsilon_1 \cdot Re_2^{0.6} Pr^{0.36} \cdot \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0.25} = 375.206$$

**Ориентировочный коэффициент теплоотдачи для межтрубного пространства:**

$$\alpha_{д.в.} := \frac{Nu \cdot \lambda_{д.в.}}{d_2} = 8.902 \times 10^3 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

**Расчёт коэффициента теплопередачи.**

Тепло передаётся через стенки труб 25\*2, поэтому необходимо учитывать тепловую проводимость стенок и загрязнений. Материал стенки – сталь 20, величины по таблице [14, XXVIII] для стали 20:

$\delta_{ст} := 2 \cdot 10^{-3} м$  - толщина стенки;

$\lambda_{ст} := 46.4 Вт/(м \cdot К)$  - коэффициент теплопроводности стали;

По [14, табл. XXXI] тепловая проводимость загрязнений стенок:

Вода дистиллированная: 11600 Вт/(м<sup>2</sup>\*К)

Вода среднего качества: 1400-1860 Вт/(м<sup>2</sup>\*К)

$$\Sigma \Gamma_{загр} := \frac{1}{11600} + \frac{1}{1400} = 8.005 \times 10^{-4}$$

$$\Sigma R := \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \Sigma \Gamma_{загр}$$

**Коэффициент теплопередачи:**

Находим коэффициент теплопередачи с поправкой на коэффициент теплоотдачи и с учётом загрязнения стенки [14, стр.168].

$$K_{расч} := \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{о.в.}} + \frac{1}{\alpha_{д.в.}} + \Sigma R} = 821.601 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$



### Расчёт площади поверхности теплопередачи:

Действительная площадь поверхности теплопередачи находим по уравнению теплопередачи [14,стр.168]

$$F_{\text{расч}} := \frac{Q}{K_{\text{расч}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = 262.693 \text{ м}^2$$

### Проверка значений $t_{\text{ст1}}$ и $t_{\text{ст2}}$ .

Как было указано при расчёте ориентировочных коэффициентов теплоотдачи для каждого потока теплоносителя, необходимо уточнить значения  $t_{\text{ст1}}$  и  $t_{\text{ст2}}$ . Определим значения  $t_{\text{ст1}}$  и  $t_{\text{ст2}}$ , исходя из того что

$$q' = K' \Delta t_{\text{ср}} = \alpha'_1 \Delta t'_1 = \frac{1}{\sum r_{\text{cm}}} = \alpha'_2 \Delta t'_2$$

,где сумма

$$\Delta t'_1 + \Delta t'_{\text{cm}} + \Delta t'_2 = \Delta t_{\text{ср}}$$

Поверхностная плотность теплового потока:

$$q := K_{\text{расч}} \cdot \Delta t_{\text{ср}} = 8.348 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

$$\Delta t_{\text{ст1}} := \frac{q}{\alpha_{\text{о.в.}}} = 2.181 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{ст2}} := \frac{q}{\alpha_{\text{д.в.}}} = 0.938 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Отсюда

$$t_{\text{ст1}} := t_{\text{ср.г.с}} - \Delta t_{\text{ст1}} = 32.979 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{ст2}} := t_{\text{ср.х.с}} + \Delta t_{\text{ст2}} = 25.938 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Дальнейшее уточнение  $t_{\text{ст1}}$  и  $t_{\text{ст2}}$  и других величин не требуется, так как расхождение между коэффициентами теплоотдачи, и другими величинами не велико.

**В итоге получили расчётную площадь поверхности теплообмена,  $\text{м}^2$ :**

$$F_{\text{расч}} = 262.693$$

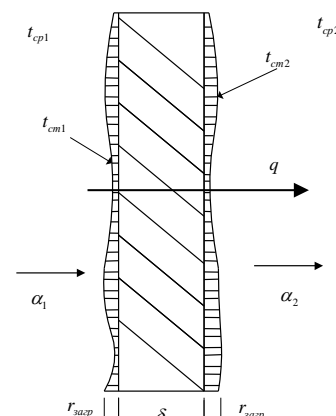


Рисунок 3.3. Схема теплопередачи через стенку труб

## 3.2 Конструктивный расчёт теплообменника

### 3.2.1 Подбор стандартного теплообменника

Выбор стандартного теплообменника будем вести по методике, изложенной в [21,1.5].

Рассчитанная площадь поверхности теплопередачи, м<sup>2</sup>:

$$F_{\text{расч}} = 262.693$$

**Расчёт площади проходного сечения трубок одного хода и количества труб:**

Для кожухотрубчатых теплообменников важным элементом является расчет проточной части трубного пространства. Исходя из заданной производительности аппарата и скорости движения жидкости, по уравнению расхода определяют площадь проходного сечения трубок одного хода:

$$f_1 := \frac{G_{\text{о.в.}}}{\rho_1 \cdot \omega_1} = 0.044 \text{ м}^2$$

Отсюда число трубок одного хода:

$$n_1 := \text{ceil} \left( \frac{f_1}{0.785 \cdot d_{\text{вн}}^2} \right) = 126 \text{ штук}$$

**Расчётная длина трубки при одном ходе.**

$d_p$ -расчётный диаметр трубки, определяемый в зависимости от соотношения коэффициентов теплоотдачи в трубном и межтрубном пространстве, соответственно:

при $\alpha_1 \approx \alpha_2$	$d_p = 0,5(d_n + d_n)$
при $\alpha_1 \gg \alpha_2$	$d_p = d_n$ ;
при $\alpha_1 \ll \alpha_2$	$d_p = d_n$ .

$$\alpha_{\text{д.в.}} = 8.902 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\alpha_{\text{о.в.}} = 3.827 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Т.к. порядок коэффициента теплоотдачи в межтрубном пространстве равен коэффициенту теплоотдачи в трубном, то принимаем:

$d_p := 0.5 \cdot (d_{вн} + d_{нар}) = 0.023$ , тогда расчётная длина трубки при одном ходе, м:

$$L_1 := \frac{F_{расч}}{\pi \cdot d_p \cdot n_1} = 28.854$$

### **Расчёт число ходов трубного пространства и общего количества труб.**

Была определена расчётная длина трубки при одном ходе:

$$L_1 = 28.854 \text{ м}$$

Но полученное значение большое для стандартных теплообменников.

Рабочую длину труб рекомендуется принимать не более 4-6 м.

$l := 6$  - рабочая длина труб, м.

Тогда число ходов по трубному пространству будет равно:

$$Z := \frac{L_1}{l} = 4.809$$

В многоходовых аппаратах выбирается четное число ходов, поэтому принимаем:

$$Z := 6$$

Тогда общее число трубок, размещаемое на трубной решетке будет равно:

$$n_x := n_1 \cdot Z = 756 \text{ ШТ.}$$

Трубы чаще всего размещаются по периметрам правильных шестиугольников. Для этого случая при подсчёте общего количества труб  $n$  исходят из числа труб  $a$ , расположенных на стороне наибольшего шестиугольника:

$$n = 3a(a - 1) + 1$$

Число труб, расположенных на стороне шестиугольника:

$$\text{Disk} := -3 - 4 \cdot 3 \cdot (1 - n_x) = 9.057 \times 10^3$$

$$a_{\text{в1}} := \text{ceil}\left(\frac{3 + \sqrt{\text{Disk}}}{2 \cdot 3}\right) = 17 \text{ ШТ.}$$

Число труб, расположенных по диагонали наибольшего шестиугольника :

$$b_{\text{в1}} := 2 \cdot a_{\text{в1}} - 1 = 33$$

### Расчётный диаметр многоходового теплообменника.

$$t := 1.2 \cdot 25 + 2 = 32 \text{ мм}$$

$\eta := 0.9$  - коэффициент заполнения трубной решетки.

$$D_{\text{вн}} := 1.1 \cdot t \cdot \sqrt{\frac{n_x}{\eta}} = 1.02 \times 10^3 \text{ мм}$$

По полученным данным, выбираем наиболее подходящий стандартный теплообменник типа ТН или ТК с основными характеристиками:

Таблица 3.2 – Параметры стандартного теплообменника

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы изм.
Внутренний диаметр аппарата	D	1000	мм
Общее число труб	N	642	шт
Площадь поверхности теплообмена	F	302	м <sup>2</sup>
Длина труб	l	6	м
Число рядов в пучке	n.ряд	26	шт
Расстояние между перегородками	l.пер	520	мм
Трубы	25*2 мм		
Исполнение (Материал)	Кожух: 16ГС; Распределительная камера и крышки: 16ГС; Теплообменные трубы: Сталь 20; Трубные решетки: 16ГС.		

### Запас площади поверхности:

$$\Delta := \frac{|F - F_{\text{расч}}|}{F} \cdot 100 = 13.016 \%$$

Полученный запас площади поверхности теплообмена достаточен.

### 3.2.2 Подбор штуцеров для входа и выхода теплоносителей

Горячий и холодный теплоносители подаются в аппарат и выводятся из него через специальные устройства называемые штуцерами. Это сборочная единица, состоящая из патрубка и фланца. Штуцера ввариваются в технологические отверстия в аппарате.

Внутренние или условные диаметры штуцеров рассчитывается по формуле массового расхода [1,стр.17]:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\rho \cdot \pi \cdot \omega}}$$

скорость жидкости при движении в напорных трубопроводах [14,табл.1.1] задаётся в интервале:

$$\omega = 0.5 \div 2.5 \frac{\text{М}}{\text{С}}$$

Принимаем:

$$\omega_{\text{о.в.}} := 2 \frac{\text{М}}{\text{С}} - \text{ скорость движения оборотной воды}$$

$$\omega_{\text{д.в.}} := 2 \frac{\text{М}}{\text{С}} - \text{ скорость движения деминерализованной воды}$$

#### Физические свойства теплоносителей при температуре.

Значения теплофизических свойств теплоносителей при заданных температурах подбираем из справочника [18].

Температура на входе и выходе:	Плотность оборотной воды:	Температура на входе и выходе:	Плотность деминерализованной воды:
$t_{\text{н.д.в.}} = 30 \text{ } ^\circ\text{С}$	$\rho_{\text{о.в.н}} := 997.5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$t_{\text{н.о.в.}} = 12 \text{ } ^\circ\text{С}$	$\rho_{\text{д.в.н}} := 999.5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
$t_{\text{к.д.в.}} = 20 \text{ } ^\circ\text{С}$	$\rho_{\text{о.в.к}} := 998.2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$t_{\text{к.о.в.}} = 25 \text{ } ^\circ\text{С}$	$\rho_{\text{д.в.к}} := 997.8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

## Расчёт внутренних диаметров патрубков.

ОБОРОТНАЯ ВОДА

-на входе

$$d_{\text{см.вх}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{о.в.}}}{\rho_{\text{о.в.н}} \cdot \pi \cdot \omega_{\text{о.в.}}}} = 0.16 \text{ м}$$

-на выходе

$$d_{\text{г.п.}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{о.в.}}}{\rho_{\text{о.в.к}} \cdot \pi \cdot \omega_{\text{о.в.}}}} = 0.16 \text{ м}$$

Для оборотной воды, согласно [6,табл.1], принимаем патрубки с размерами:219\*6мм, длина патрубка 200мм. Условные проход Ду=200мм. Диаметр отверстия под трубу, в соответствии с [5,табл.19.1], принимаем 224мм.

ДЕМИНЕРАЛИЗОВАННАЯ ВОДА

-на выходе

$$d_{\text{см.вых}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{д.в.}}}{\rho_{\text{д.в.н}} \cdot \pi \cdot \omega_{\text{д.в.}}}} = 0.178 \text{ м}$$

-на выходе

$$d_{\text{к.г.п.}} := \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{д.в.}}}{\rho_{\text{д.в.к}} \cdot \pi \cdot \omega_{\text{д.в.}}}} = 0.179 \text{ м}$$

Для деминерализованной воды, согласно [6,табл.1], принимаем патрубки с размерами:219\*6 мм, длина патрубка 200мм. Условные проход Ду=200мм. Диаметр отверстия под трубу, в соответствии с [5,табл.19.1], принимаем 224мм.

Таблица 3.4 – Параметры подобранных штуцеров

Назначение штуцера	Диаметр патрубка, мм	Длина патрубка, мм	Условный диаметр, м	Р <sub>у</sub> , кгс/см <sup>2</sup>	Масса 1 м трубы, кг
Вход деминерализованной воды в теплообменник	219х6	200	200	6	31,52
Вход оборотной воды в теплообменник	219х6	200	200	6	31,52
Выход деминерализованной воды из теплообменника	219х6	200	200	6	31,52
Выход оборотной воды из теплообменника	219х6	200	200	6	31,52

### Подбор фланцев на штуцера.

Подбор фланцев на патрубки с диаметрами 219\*6 ведётся согласно рекомендациям справочника [11, глава 21]. Фланцы были подобраны 4 типа: плоские приварные встык (рис.3.4). Основные размеры фланцев были вынесены в табл.2

Условным давлением принимаем давление: 0,6МПа

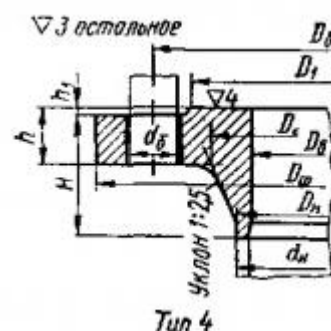


Рисунок 3.4. Фланец арматуры, соединительных частей из чёрных металлов, цельный.

Таблица 3.5 – Параметры подобранных фланцев

Р <sub>у</sub> , Мн/м <sup>2</sup>	D <sub>у</sub>	d <sub>н</sub>	D <sub>ф</sub>	D <sub>б</sub>	D <sub>1</sub>	Болты		Тип фланца 4; ГОСТ 12830-67					масса , кг
						d <sub>б</sub>	z	D <sub>г</sub>	D <sub>н</sub>	D <sub>в</sub>	H	h	
0,6	200	219	315	280	258	M16	8	235	222	202	50	17	8,37

### Массы фланцев:

Согласно таблица 3.4 и 3.5, масса фланцев будет равна:

$$m_{ф219} := 8.37 \text{ кг}$$

### Масса патрубков.

Согласно [6, табл.1], находим массу 200мм патрубков.

Масса 1 м труб

$$M_{T219 \times 8.5} := 44.13 \text{ кг}$$

Масса 0,2 м труб

$$m_{T219 \times 8.5} := M_{T219 \times 8.5} \cdot 0.2 = 8.826 \text{ кг}$$

### 3.3 Механический расчёт теплообменника

#### 3.3.1 Расчётные параметры

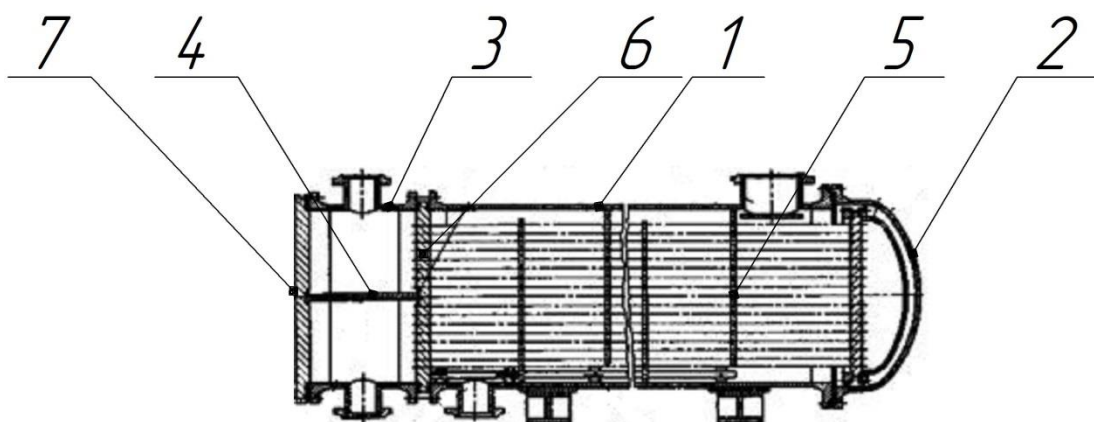


Рисунок 3.5. Кожухотрубчатый теплообменник:

- 1 – Цилиндрическая обечайка;
- 2 - Эллиптическое днище;
- 3 – Распределительная камера;
- 4 – Продольная перегородка;
- 5 – Поперечная перегородка;
- 6 - Трубная решетка;
- 7 – Плоская крышка.

#### Исходные данные:

Таблица 3.6 – Исходные данные

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Внутренний диаметр обечайки	D	1000	мм
Длина обечайки	L	6000	мм
Рабочее давление в межтрубном пространстве	P.раб.мжт	0,6	МПа
Рабочее давление в трубном пространстве	P.раб.тр	0,25	МПа
Расчётная температура	t.расч	135	°C



Теплообменник выполнен в исполнении М1, в соответствии с [22,табл.6]. Материалы основных узлов и деталей теплообменника указаны в табл.3.7.

Таблица 3.7– Исполнение теплообменника по материалу

Исполнение по материалу	Кожух	Распред-камера	Теплообменная труба	Трубная решетка
М1	16ГС	16ГС	Сталь 20	16ГС

### Расчётные параметры:

Допускаемое напряжение для стали марки 16ГС при  $t=135^{\circ}\text{C}$ , согласно [8,табл.А.1], МПа:

$$\sigma_t := 172.8$$

Допускаемое напряжение для стали марки 16ГС при нормальных условиях, согласно [8,табл.А.1], МПа:

$$\sigma_{20} := 196$$

Плотность деминерализованной воды при  $t_{\text{ср}}$ , согласно данным справочника [3]:

$$\rho_{\text{д.в.}} := 989.36 \text{ кг/м}^3$$

Плотность оборотной воды при  $t_{\text{ср}}$ , согласно данным справочника [3]:

$$\rho_{\text{д.в.}} := 997.66 \text{ кг/м}^3$$

Коэффициент уменьшения номинального допускаемого напряжения, согласно пособию [13,стр.110]:

$$\eta := 1$$

Ускорение свободного падения:

$$g := 9.81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

Расчётное значение предела текучести для стали марки 16ГС при  $t=135^{\circ}\text{C}$ , согласно [8,табл.Б.2], МПа:

$$R_{02} := 256.$$

Коэффициент запаса прочности при гидравлическом испытании ,согласно [8,табл.1]:

$$n_T := 1.1$$

Расчетное значение внутреннего избыточного давления в межтрубном пространстве, согласно пособию [13], МПа:

$$P_{р.мжт.} := P_{раб.мжт} + \frac{\rho_{д.в.} \cdot g \cdot D}{10^9} = 0.61$$

Расчётное значение внутреннего избыточного давления в трубном пространстве, согласно пособию [13], МПа:

$$P_{р.тр} := P_{раб.тр} + \frac{\rho_{д.в.} \cdot g \cdot D}{10^9} = 0.26$$

Пробные давления при гидравлическом испытании внутри аппарата рассчитываем согласно пособию [13].

Допускаемое напряжение при расчёте по предельным нагрузкам сосудов, работающих при статических однократных нагрузках, вычисляют по формулам:

$$\sigma_{д20} := \eta \cdot \sigma_{20} = 196 \text{ МПа}$$

Пробное давление в межтрубном пространстве при гидравлических испытаниях будет равно, МПа:

$$P_{пр.мжт} := 1.25 \cdot P_{раб.мжт} \cdot \frac{\sigma_{д20}}{\sigma_t} = 0.851$$

Пробное давление в трубном пространстве при гидравлических испытаниях будет равно, МПа:

$$P_{пр.тр} := 1.25 \cdot P_{раб.тр} \cdot \frac{\sigma_{д20}}{\sigma_t} = 0.354$$

Гидравлически испытания аппаратов проводят в соответствии с требованиями [8,табл.15].

Допускаемое напряжение для стали 16ГС при гидравлических испытаниях, согласно пособию [8]:

Расчетное значение предела текучести при 20 °с для стали 16ГС, МПа:

$$\sigma_{и} := \text{Floor}\left(\frac{R_{02}}{1.1}, 0.5\right) = 233$$

Прибавка к расчетным толщинам конструктивных элементов:

$c_1 := 1$  - прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм;

$c_2 := 0.8$  - прибавка для компенсации минусового допуска, мм;

$c_3 := 0$  - прибавка технологическая, мм.

$c$  — сумма прибавок к расчетным толщинам стенок, мм:

$$c := \text{Ceil}(c_1 + c_2 + c_3, 0.5) = 2 \text{ мм.}$$

### 3.3.2 Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки (1)

Целью расчёта толщины цилиндрической обечайки, нагруженной внутренним давлением, является определение исполнительной толщины стенки исходя из условий прочности.. На рисунке 3.6. представлена схема цилиндрической обечайки с необходимыми для расчёта размерами и нагрузками.

Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки ведётся согласно [9,5-5.3.1], а также в соответствии с рекомендациями, изложенными в пособии [13].

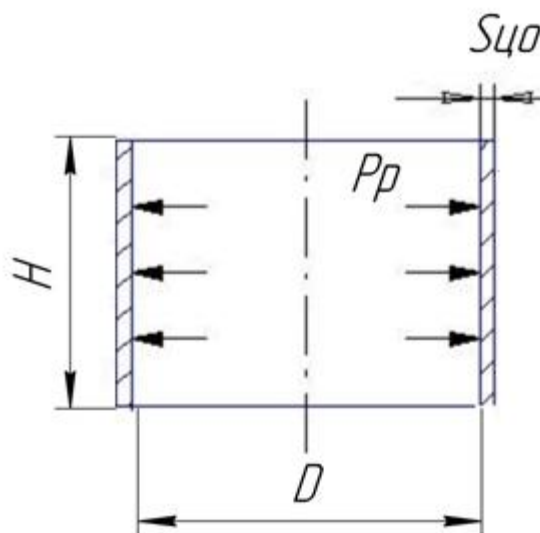


Рисунок 3.6. Цилиндрическая обечайка

## Вид сварного шва и способ сварки:

Согласно с [8,табл.Д.1], выбираем вид шва: стыковой, выполняемый вручную с одной стороны. Длина контролируемых швов от общей длины составляет 100%\*.

Коэффициент прочности сварных швов принимаем равным:  $\phi_p := 0.9$

## Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки:

Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки производится при давлении гидравлического испытания и при рабочем давлении в межтрубном пространстве.

Расчётная толщина стенки цилиндрической обечайки, мм:

$$s_p := \max \left[ \frac{P_{р.мжт} \cdot D}{(2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_t - P_{р.мжт})}, \frac{P_{пр.мжт} \cdot D}{(2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_{и} - P_{пр.мжт})} \right] = 2.032$$

Исполнительная толщина стенки обечайки будет равна:

$$S_{цО} := \text{ceil}(s_p + c) = 5 \text{ мм}$$

Но согласно рекомендациям [20,табл.1], минимальная толщина стенок цилиндрической обечайки при внутреннем диаметре кожуха 1000 мм равна 6 мм. Поэтому принимаем исполнительную толщину стенки цилиндрической обечайки равной:

$$S_{цО} := 6 \text{ мм}$$

## Проверка на условие прочности:

Допускаемое внутреннее избыточное давление, МПа:

$$P_d := \frac{2 \cdot \sigma_t \cdot \phi_p \cdot (S_{цО} - c)}{D + (S_{цО} - c)} = 1.239$$

$$Usl := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{рвб.мжт} \leq P_d \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

## Проверка на условие применимости формул:

Для обечаек и труб при  $D \geq 200$  мм:

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{S_{цo} - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"Условия применимости формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$U_{sl} = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$

Условия прочности и применимости формул выполняются, значит Расчёт произведён верно. Полученные значения в табл. Обечайка будет изготавливаться из листового проката.

Таблица 3.8– Рассчитанные значения для цилиндрической обечайки

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы изм.
Добавка на коррозию и на компенсацию минусового допуска	c	2	мм
Расчётная толщина стенки обечайки из условия прочности	Sp	2.032	мм
Максимальная исполнительная толщина стенки из условий прочности	Sцo	6	мм
Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку при рабочих условиях	Pd	1.239	МПа
Расчётное значение внутреннего избыточного давления	Pp мжт	0.61	МПа
Пробное давление при гидравлическом испытании внутри аппарата	Pпр мжт	0.851	МПа

### 3.3.3 Расчёт толщины стенки эллиптического днища

Целью расчёта толщины стенки эллиптических днищ, нагруженных внутренним избыточным давлением, является определение исполнительной толщины стенки исходя из условий прочности. На рисунке 3.7. представлена схема эллиптического днища с необходимыми для расчёта размерами и нагрузками.

Расчёт толщины стенки эллиптического днища ведётся согласно [9,6.1-6.3.], а также в соответствии с рекомендациями, изложенными в пособии [10].

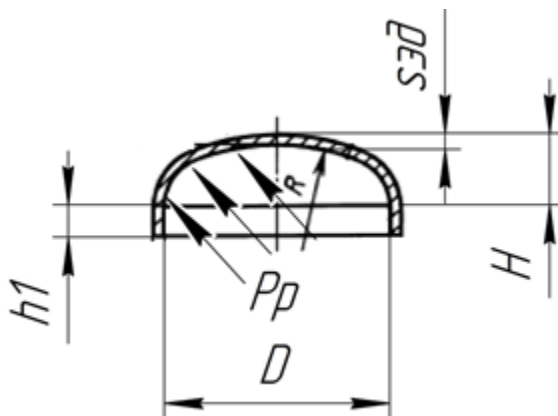


Рисунок 3.7. Эллиптическое днище

#### Высота днища:

Поскольку днище эллиптическое, то, согласно [10] и рис.5, высота выпуклой части днища без учета цилиндрической части будет равна:

$$H := 0.25D$$

$$H = 250 \text{ мм}$$

#### Радиус кривизны:

Радиус кривизны в вершине днища по внутренней поверхности:

$$R := \text{ceil}\left(\frac{D^2}{4H}\right) = 1 \times 10^3 \text{ мм}$$

#### Расчётная толщина стенки:

Расчёт толщины стенки эллиптического днища производится при давлении гидравлического испытания и при рабочем давлении в трубном пространстве.

$\phi := 1$  - коэффициент прочности сварных швов для крышек, изготовленных из одной заготовки (штамповкой).

$$S_p := \max \left[ \frac{P_{p.тр} \cdot R}{(2 \cdot \phi \cdot \sigma_t - 0.5P_{p.тр})}, \frac{P_{пр.тр} \cdot R}{(2 \cdot \phi \cdot \sigma_{II} - 0.5P_{пр.тр})} \right] = 0.761 \text{ мм}$$

С учётом добавки на коррозию и на компенсацию минусового допуска:

$$S_{эк} := \text{cei}(S_p + c) = 3 \text{ мм}$$

Согласно рекомендациям [9,табл.1], увеличиваем толщину стенки днища до толщины стенки обечайки.

$$S_{эк} := 6 \text{ мм}$$

#### Высота цилиндрической части днища:

$$h_1 := \text{cei} \left[ 0.8 \cdot \sqrt{D \cdot (S_{эк} - c)} \right] = 51 \text{ мм}$$

Согласно [5,табл.16.1] принимаем высоту цилиндрической части:

$$h_1 := 50 \text{ мм}$$

В таблице 3.8 представлены основные параметры стандартного эллиптических днища.

Таблица 3.8– Днище эллиптическое отбортованное стальное с размерами по ГОСТ 6533-68.

<b>Dв</b>	<b>hв</b>	<b>h</b>	<b>Fв</b>	<b>V*10<sup>3</sup></b>	<b>s</b>	<b>D</b>	<b>m</b>
	мм		м <sup>2</sup>	м <sup>3</sup>	мм		кг
1000	250	50	1,24	170	6	1225	55,5

#### Допускаемое внутреннее избыточное давление, МПа:

$$p_{d1} := \frac{2 \cdot \sigma_t \cdot \phi \cdot (S_{эк} - c)}{R + 0.5(S_{эк} - c)} = 1.38$$

#### Проверка на условие применимости формул:

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие применения формул выполняется"} & \text{if } 0.2 \leq \frac{H}{D} \leq 0.5 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$U_{sl} = \text{"Условие применения формул выполняется"}$

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие применения формул выполняется"} & \text{if } 0.002 \leq \frac{S_{\text{эк}} - c}{D} \leq 0.100 \\ \text{"Условия применения формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$U_{sl} = \text{"Условие применения формул выполняется"}$

### Проверка на условие прочности:

$$U_{sl} := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{\text{раб.тр}} \leq P_{d1} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$U_{sl} = \text{"Условие прочности выполняется"}$

Условия прочности и применимости формул выполняются, значит расчёт произведён верно. Днище будет изготавливаться штамповкой.

Таблица 3.9– Рассчитанные значения для эллиптического днища

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы изм.
Добавка на коррозию и на компенсацию минусового допуска	c	2	мм
Максимальная расчётная толщина стенки днища из условия прочности	$S_p$	0.761	мм
Максимальная исполнительная толщина стенки днища из условий прочности	$S_{\text{эк}}$	3	мм
Исполнительная толщину стенки эллиптического днища из сортамента прокатных стальных листов	$S_{\text{эр}}$	6	мм
Допускаемое внутреннее избыточное давление на цилиндрическую обечайку при рабочих условиях	$P_{d1}$	1.38	МПа
Высота цилиндрической части днища	$h_1$	50	мм
Высота днища без учёта цилиндрической части	H	250	мм
Радиус кривизны в вершине днища	R	1000	мм



### 3.3.4 Расчёт толщины стенки распределительной (входной) камеры

Расчёт толщины стенки распределительной камеры ведётся аналогично расчёту толщины стенки цилиндрической обечайки. Расчёт ведётся согласно [10,5-5.3.1], а также в соответствии с рекомендациями, изложенными в пособии [13].

#### Вид сварного шва и способ сварки:

Согласно с [8,табл.Д.1],выбираем вид шва: стыковой, выполняемый вручную с одной стороны. Длина контролируемых швов от общей длины составляет 100%\*.

Коэффициент прочности сварных швов принимаем равным:

$$\phi_p := 0.9$$

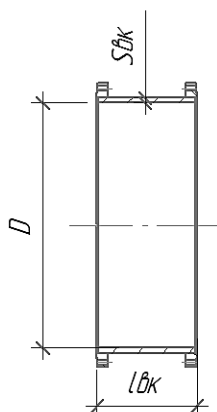


Рисунок 3.7. Входная камера.

#### Расчет толщины стенки распределительной (входной) камеры:

Расчёт толщины стенки входной камеры производится при давлении гидравлического испытания и при рабочем давлении в трубном пространстве.

Расчётная толщина стенки цилиндрической обечайки (входной камеры):

$$s_{р.в.к.} := \max \left[ \frac{P_{р.тр} \cdot D}{(2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_t - P_{р.тр})}, \frac{P_{пр.тр} \cdot D}{(2 \cdot \phi_p \cdot \sigma_{и} - P_{пр.тр})} \right] = 0.846 \text{ мм}$$

Исполнительная толщина стенки обечайки будет равна:

$$S_{в.к.} := \text{ceil}(s_{р.в.к.} + c) = 3 \text{ мм}$$

Но согласно рекомендациям [9,табл.1], минимальная толщина стенок цилиндрической обечайки при внутреннем диаметре кожуха 1000мм равна 6мм. Поэтому принимаем исполнительную толщину стенки входной камеры равной:

$$S_{в.к.} := 6 \text{ мм}$$

### Проверка на условие прочности:

Допускаемое внутреннее избыточное давление, МПа:

$$P_d := \frac{2 \cdot \sigma_t \cdot \phi_p \cdot (S_{в.к.} - c)}{D + (S_{в.к.} - c)} = 1.239$$

$$Us1 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{р.тр} \leq P_d \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1 = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

### Проверка на условие применимости формул:

Для обечайек и труб при  $D \geq 200$ мм:

$$Us1 := \begin{cases} \text{"Условие применимости формул выполняется"} & \text{if } \frac{S_{в.к.} - c}{D} \leq 0.1 \\ \text{"Условия применимости формул НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1 = \text{"Условие применимости формул выполняется"}$$

Условия прочности и применимости формул выполняются, значит окончательно принимаем толщину стенки распределительной (входной)камеры : $S_{в.к.} = 6$  мм. Камера будет изготавливаться из листового проката. Длина входной камеры будет равна 600 мм.

### 3.3.5 Расчёт температурных деформаций

Расчёт будем вести по методике, изложенной в [21,1.5.2.1].Подбор при расчёте корпуса и труб на температурные напряжения.

#### Определение расчётных параметров:

Таблица 3.9– Исходные данные для расчёта температурных деформаций

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Часть аппарат-трубы			
Материал - Сталь 20			
Средняя температура	t.т	135	°С
Температурный коэффициент линейного расширения	$\alpha.t$	$12,6 \cdot 10^{-6}$	°С <sup>-1</sup>
Допускаемое напряжение для материала при средней температуре	$\sigma.tt$	139,9	МПа
Модуль упругости материала	E.t	$1,875 \cdot 10^5$	МПа
Часть аппарат-корпус			
Материал - 16ГС			
Средняя температура	t.к	25	°С
Температурный коэффициент линейного расширения	$\alpha.к$	$11,6 \cdot 10^{-6}$	°С <sup>-1</sup>
Допускаемое напряжение для материала при средней температуре	$\sigma.tk$	196	МПа
Модуль упругости материала	E.к	$1,99 \cdot 10^5$	МПа

Наружный диаметр аппарата будет слагаться из внутреннего диаметра кожуха и двух толщин стенок кожуха. Расчёт толщины стенки кожуха изложен в 3. Механический расчёт. Расчёт толщины стенки цилиндрической обечайки. Примем ту толщину стенки:  $s_{\text{кж}}$  := 6 мм.

Тогда наружный диаметр кожуха будет равен:

$$D_H := \frac{D + 2 \cdot s}{1000} = 1.012 \text{ м}$$

Внутренний диаметр:

$$D := \frac{D}{1000} = 1 \text{ м}$$

**Определение поперечного сечения труб и корпуса, м<sup>2</sup>:**

$$F_K := \frac{\pi}{4} \cdot (D_H^2 - D^2) = 0.019$$

$$F_T := N \frac{\pi}{4} \cdot (d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вн}}^2) = 0.093$$

**Определение температурных усилий, МН:**

$$Q_t := \frac{(|\alpha_T \cdot t_T - \alpha_K \cdot t_K|) \cdot E_T \cdot F_T \cdot E_K \cdot F_K}{E_T \cdot F_T + E_K \cdot F_K} = 4.375$$

**Определение температурных напряжений, МПа:**

$$\sigma_T := \frac{Q_t}{F_T} = 47.16$$

$$\sigma_K := \frac{Q_t}{F_K} = 230.737$$

**Проверка условия прочности.**

$$Usl\_ := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется, теплообменник ТН подходит"} & \text{if } \sigma_T \leq \sigma_{\text{ТТ}} \\ \text{"Условие прочности выполняется, теплообменник ТН подходит"} & \text{if } \sigma_K \leq \sigma_{\text{ТК}} \\ \text{"Условие прочности не выполняется, теплообменник ТН не подходит"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl\_ = \text{"Условие прочности выполняется, теплообменник ТН подходит"}$$

Из проверки условия прочности следует, что температурные напряжения в трубах и корпусе не превышают допусковые. Это говорит о том, что можно использовать теплообменник с неподвижными трубными решётками (Рис.3.8).

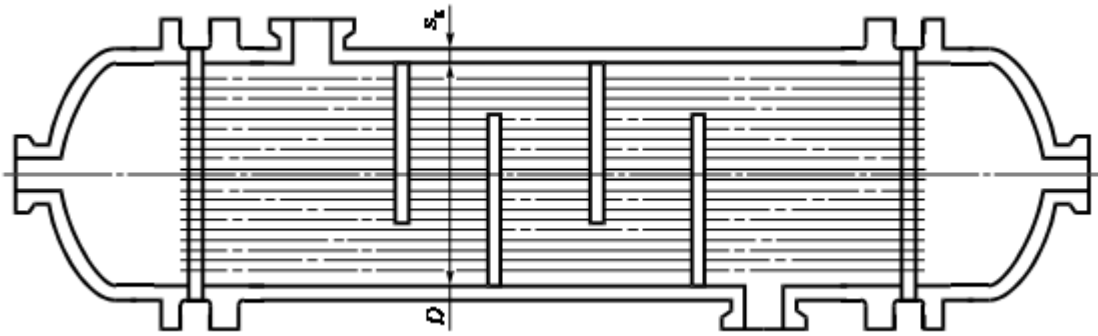


Рисунок 3.8 .Аппарат с неподвижными трубными решетками

### 3.3.6 Подбор фланцев и прокладок для обечайек и днищ

Для соединения отдельных частей и узлов теплообменника применяются фланцевые соединения.

При выборе фланцевого соединения основное внимание уделялось параметрам:

Внутренний диаметр обечайки:  $D = 1 \times 10^3$  мм

Рабочее давление в межтрубном пространстве:

$P_{\text{раб.мжт}} = 0.6$  МПа

Расчётная температура:  $t_{\text{раб}} = 60$  °С

Толщина стенки обечайки:  $S_{\text{цО}} = 6$  мм

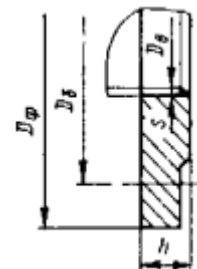


Рисунок 3.9. Фланец с гладкой уплотнительной поверхностью.

Исходя из значений данных параметров, по [11,табл.21.12] были подобраны фланцы для стальных сварных аппаратов для обечайек и днищ с внутренними базовыми размерами, указанными в табл.6. По исполнению был выбран фланец 1 типа: с гладкой уплотнительной поверхностью. При выборе фланцев также руководствовались [23].

Таблица 3.10– Конструкционные размеры фланцев

Р <sub>у</sub> , Мн/м <sup>2</sup>	D <sub>у</sub>	D <sub>ф</sub>	D <sub>б</sub>	h (l)	s min	Болты		масса
						d <sub>б</sub>	z	
							мм	
0,6	1000	1130	1090	32	6	M16	8	70,8

Принимаем массу одного фланца:  $m_{ф1000} := 70,4 \text{ кг}$

Для obtюрации фланцевого соединения, согласно требованиям [5,табл.20.1] были выбраны плоские паронитовые прокладки. Согласно [5,табл.20.5] были приняты основные размеры прокладок:

$$D_1 := 1000 \text{ мм}$$

$$D_2 := 1057 \text{ мм}$$

$$s_1 := 3 \text{ мм}$$

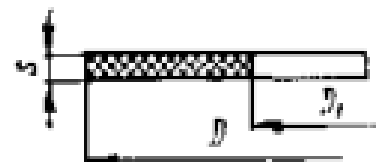


Рисунок 3.10. Прокладка из паронита для фланцевых сварных аппаратов.

### 3.3.7 Подбор продольных и поперечных перегородок

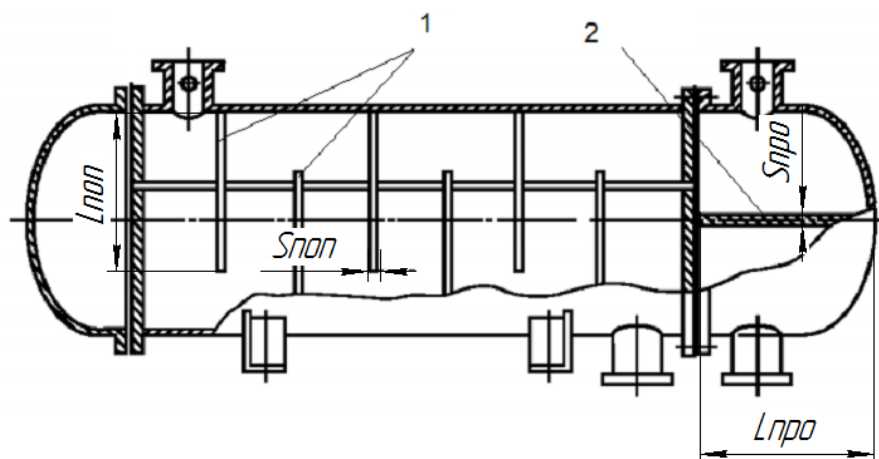


Рисунок 3.11. Теплообменник с поперечными (1) и продольными (2) перегородками.

Для интенсификации процесса теплообмена в межтрубном пространстве установлены поперечные перегородки (Рис ). Толщина и длина перегородок приняты согласно [24,табл.2-4]. В поперечных перегородках есть дренажные вырезы 6 мм.

Длина перегородки, мм:  $L_{\text{поп}} := \frac{3}{4} \cdot D = 750$

Толщина перегородки, мм:  $S_{\text{поп}} := 8$

Количество поперечных перегородок в аппарате, согласно [20,табл.1], шт:

$n := 10$

Расстояние между поперечными перегородками, согласно [20,табл.1], мм:

$L := 520$

Длина продольных перегородок в распределительной камере равна, мм:

$L_{\text{про1}} := 600$

Длина продольных перегородок в эллиптическом днище равна, мм:

$L_{\text{про2}} := 300$

Толщина продольных перегородок, согласно [20,табл.4] равна, мм:

$S_{\text{про}} := 10$

### 3.3.8 Расчёт толщины трубной решётки

Расчёт толщины трубной решётки ведётся по методике, указанной в пособии [21, 1.5.2.4.].

#### **Коэффициент прочности решётки.**

Коэффициент прочности решётки учитывает ослабление сечения решетки отверстиями под трубы и определяется в зависимости от шага  $t$  и диаметра отверстий  $d_{\text{отв}}$  по формуле:

$d_{\text{отв}} := 26 \text{ мм}$

$t := 1.2 \cdot 25 + 2 = 32 \text{ мм}$

$$\varphi_p := \frac{t - d_{\text{отв}}}{t} = 0.188$$

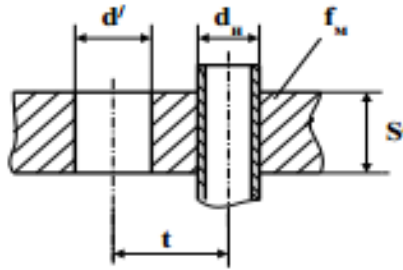


Рисунок 3.12. Схема к расчёту трубных решёток.

**Толщина стенки из условия надёжности развальцовки труб:**

Наружный диаметр труб:  $d_n := 25 \text{ мм}$

$$f_m := 4.35 \cdot d_n + 15 = 123.75 \text{ мм}$$

$$S_{\text{тр1}} := \text{ceil}\left(\frac{f_m}{t - d_{\text{отв}}}\right) + c = 23 \text{ мм}$$

**Суммарная нагрузка на площадь трубной решётки:**

$$Q_p := P_{\text{раб.мжт}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 - P_{\text{раб.тр}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 + Q_t = 2.749 \times 10^5 \text{ НН}$$

**Расчётное давление:**

$$P_p := \frac{4 \cdot Q_p}{\pi \cdot D^2} = 0.35 \text{ МПа}$$

**Толщина трубной решетки, если считать её плоской заземленной плитой:**

Допускаемое напряжение для стали 16ГС из которой изготовлена трубная решётка:

$$\sigma_t = 186.5 \text{ МПа}$$

$$S_{\text{тр2}} := \frac{D}{4.7} \cdot \sqrt{\frac{P_p}{\sigma_t \cdot \phi_p}} + c = 23.286 \text{ мм}$$

**Принимаем толщину трубной решетки:**

$$S_{\text{тр}} := \text{ceil}(\max(S_{\text{тр1}}, S_{\text{тр2}}, 12)) = 24 \text{ мм}$$

В результате расчёта получили исполнительную толщину трубной решётки:  $S_{\text{тр}} = 24 \text{ мм}$ . В дальнейшем будет проведена проверка принятого значения.



### 3.3.9 Расчёт развальцовочного соединения

Расчёт развальцовочного соединения производится по методике, указанной в пособии [21,1.5.2.3.]

**Площадь трубной решётки при расположении труб по вершинам правильного треугольника:**

$$f := 0.866 \cdot t^2 - \frac{\pi \cdot d_H^2}{4} = 395.91 \text{ мм}^2$$

Внутренний диаметр аппарата:  $D_{\text{вн}} := D \cdot 10^{-3} = 1 \text{ м}$

**Осевое усилие, МН:**

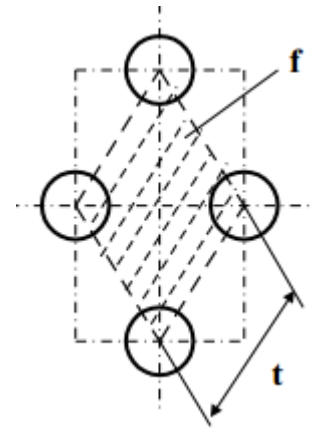


Рисунок 3.13.Схема к расчёту развальцовочного соединения.

$$Q_{\text{о.у.}} := P_{\text{раб.мжт}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - N \cdot d_{\text{нар}}^2) + P_{\text{раб.тр}} \cdot N \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{вн}}^2 = 0.338$$

**Усилие, действующее на 1 трубку, МН:**

$$q := \frac{Q_{\text{о.у.}}}{N} = 5.261 \times 10^{-4}$$

**Температурное усилие, приходящее на одну трубу:**

Площадь поперечного сечения стенки трубы:

$$f_T := \frac{\pi}{4} \cdot (d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вн}}^2) = 1.445 \times 10^{-4} \text{ м}^2$$

**Температурные напряжения в трубе, МН:**

$$q_T := \sigma_T \cdot f_T = 6.815 \times 10^{-3}$$

**Суммарное усилие:**

$$q_c = q \pm q_T, \text{ МН}$$

В формуле принимают со знаком плюс, когда корпус нагрет больше, чем трубы, и со знаком минус, если трубы нагреты больше, чем корпус.

В нашем случае:

Средняя температура трубного пространства:

$$t_{\text{ср.х.с}} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Средняя температура межтрубного пространства:

$$t_{\text{ср.г.с}} = 47.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$q_c := |q - q_T| = 6.289 \times 10^{-3} \text{ МН}$$

**Удельная нагрузка от давления на единицу длины окружности развальцовки, МН:**

$$\sigma_o := \frac{q}{\pi \cdot d_{\text{нар}}} = 6.698 \times 10^{-3}$$

**Удельная нагрузка на развальцовку от действия суммарного усилия с учетом давления и температурных напряжений, МН:**

$$\sigma_c := \frac{q_c}{\pi \cdot d_{\text{нар}}} = 0.08$$

**Проверка условия прочности:**

$$Us|_ := \begin{cases} \text{"Условие выполняется, можно использовать при развальцовке труб в отверстиях без канавок"} & \text{if } \sigma_o \leq 0.04 \\ \text{"Условие выполняется, можно использовать при развальцовке труб в отверстиях без канавок"} & \text{if } \sigma_c \leq 0.08 \\ \text{"Условие не выполняется, необходим другой способ развальцовки"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us|_ = \text{"Условие выполняется, можно использовать при развальцовке труб в отверстиях без канавок"}$$

### 3.3.10 Расчёт на прочность и герметичность фланцевых соединений

Целью расчета фланцевых соединений на прочность и герметичность являются:

- определения усилия, действующего на прокладку в рабочих условиях, необходимого для обеспечения герметичности фланцевого соединения, и усилия, необходимого для первоначального сжатия прокладки;

- определения усилия в болтах (шпильках) в рабочих условиях и усилия при затяжке, необходимого для обеспечения герметичности фланцевого

соединения в рабочих условиях. Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки;

- расчет на прочность элементов фланцевого соединения при затяжке и в рабочих условиях при действии давления, усилий в болтах (шпильках), необходимых для обеспечения герметичности фланцевого соединения и других нагрузок;

- проверки углов поворота фланцев;

- расчета элементов фланцевого соединения на малоцикловую усталость в случае, если нагружение носит циклический характер.[25]

Расчёт на прочность и герметичность фланцевых соединений ведётся согласно [25]. Проверке подлежат все фланцевые соединения. В данном разделе проверяются на прочность и герметичность фланцевые соединения частей аппарата (кожух, эллиптическое днище, плоская крышка, распределительная камера).

Таблица 3.11– Исходные данные для расчёта на прочность и герметичность фланцевых соединений

Параметр	Обозн-ие	Значение	Единицы измерения
Внутренний диаметр аппарата	D	1000	мм
Наружный диаметр фланца	D.н	1130	мм
Диаметр окружности расположения болтов (шпилек)	D.б	1090	мм
Расчётный диаметр прокладки	D.сп	1057	мм
Ширина прокладки	b.п	28,5	мм
Ширина тарелки фланца	h	65	мм
Толщина прокладки	h.п	3	мм
Толщина втулки приварного встык фланца в месте приварки к обечайке( трубе), толщина	S.0	6	мм

обечайки плоского фланца			
диаметр болтов (шпилек)	d	20	мм
Число болтов (шпилек)	n	40	шт
Расчётное давление	P	0,6	МПа
Внешний изгибающий момент	M	0	МН*м
Осевая сила	F	0	МН
Суммарная прибавка к расчётной толщине	c.o	1	мм
Расчётная температура	t	135	С

Материал обечаек и фланцев - сталь 16ГС

Материал болтов - сталь 35

Материал прокладки – Паронит

Стальные плоские приварные фланцы применяются для сосудов и аппаратов диаметром от 400 до 4000 мм с условным давлением от 0,3 до 1,6 МПа при температуре рабочей среды от минус 70°С до плюс 300°С, и предназначены для работы в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности.

#### **Выбор крепежных элементов:**

При давлении до 25кгс/см<sup>2</sup> (2,5 МПа) можно использовать болты. Они дешевле, чем шпильки. Будем использовать болты.

#### **Определение расчетных параметров:**

Расчетная температура неизолированных плоских фланцев  $t_f = 0,96t$  из [12,табл.В.1]

$$t_f := 0.96 \cdot t = 129.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Расчетная температура болтов из [25,табл.В.1]

$$t_b := 0.85 \cdot t = 114.75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Допускаемые напряжения для болтов изготовленных из стали 35 по [12,табл.Г.1].

В рабочем состоянии:

$$t := \begin{pmatrix} 100 \\ 200 \end{pmatrix}$$

$$\sigma := \begin{pmatrix} 126 \\ 120 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{д.б} := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_б), 0.5) = 125 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для болтов при рабочей температуре, согласно [25,табл.Ж.1]:

$$E_б := 2.115 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для болтов при  $t=20^\circ\text{C}$ , из [25,табл.Г.1]:

$$\sigma_{20б} := 130 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для болтов при температуре испытания  $20^\circ\text{C}$  согласно [25,табл.Ж.1]:

$$E_{20б} := 2.13 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения для стали 35 при  $t=20-100^\circ\text{C}$  согласно [25,табл.Ж.2]:

$$\alpha_б := 11.1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$$

Допускаемые напряжения для фланцев и обечаек стали 16ГС из [8,А.1]:

$$t := \begin{pmatrix} 20 \\ 100 \end{pmatrix} \quad \sigma := \begin{pmatrix} 196 \\ 177 \end{pmatrix}$$

$$\sigma := \text{Floor}(\text{linterp}(t, \sigma, t_ф), 0.5) = 187 \text{ МПа}$$

Так как фланцы изготавливается из листового проката

$$\eta := 1 \quad \sigma_{д.ф} := \eta \cdot \sigma = 187 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для стали 16ГС при рабочей температуре из [8,В.1]

$$E := 1.95 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Допускаемое напряжение для стали 16ГС при  $t=20^\circ\text{C}$  из [8,А.1]

$$\sigma_{20} := 196 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{д20} := \eta \cdot \sigma_{20} = 196 \text{ МПа}$$

Модуль упругости для стали 16ГС при температуре испытания  $20^\circ\text{C}$  из [8,В.1]

$$E_{20} := 1.99 \cdot 10^5 \text{ МПа}$$

Коэффициент линейного расширения стали 16ГС при  $t=20-100 \text{ }^\circ\text{C}$  из [8,Г.1]

$$\alpha_{\text{ф}} := 11.9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$$

### Эффективная ширина плоской прокладки

$$b_0 := \begin{cases} b_0 \leftarrow b_n & \text{if } b_n \leq 15 \\ b_0 \leftarrow \text{Ceil}(3.8 \cdot \sqrt{b_n}, 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad b_0 = 21 \text{ мм}$$

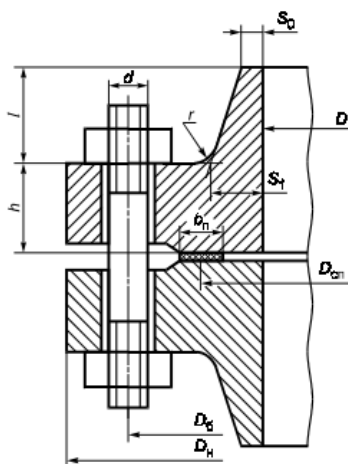


Рисунок 3.14. Фланцевое соединение с гладкой уплотнительной поверхностью

### Характеристики прокладки:

Согласно [25,табл.И.1] выбираем значения для паронита:

$m := 2.5$		прокладочный коэффициент
$q_{\text{обж}} := 20 \text{ МПа}$		удельное давление обжатия прокладки
$q_d := 130 \text{ МПа}$		допускаемое удельное давление
$K_{\text{обж}} := 0.9$		коэффициент обжатия
$E_n := 200 \text{ МПа}$		условный модуль сжатия прокладки

### Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке:

$$P_{\text{обж}} := 0.5\pi \cdot D_{\text{сн}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |P| = 5.23 \times 10^4 \text{ Н}$$

**Усилие на прокладке в рабочих условиях, необходимое для обеспечения герметичности фланцевого соединения:**

$$R_n := \begin{cases} \pi \cdot D_{\text{сн}} \cdot b_0 \cdot m \cdot P & \text{if } P \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$R_n = 1.046 \times 10^5 \text{ Н}$$

**Усилие в болтах фланцевого соединения при затяжке и в рабочих условиях:**

Площадь поперечного сечений болтов (шпилек) по [25,табл.Д.1]:

$$f_b := 225 \text{ мм}^2$$

**Суммарная площадь сечения болтов (шпилек)по внутреннему диаметру резьбы или нагруженному сечению наименьшего диаметра:**

$$A_b := n \cdot f_b = 9 \times 10^3 \text{ мм}^2$$

**Равнодействующая нагрузка от давления:**

$$Q_d := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{сн}})^2 \cdot P$$

$$Q_d = 5.265 \times 10^5 \text{ Н}$$

**Приведенная нагрузка, вызванная воздействием внешней силы и изгибающего момента:**

$$Q_{FM} := \max\left(\left|F + \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сн}}}\right|, \left|F - \frac{4 \cdot |M|}{D_{\text{сн}}}\right|\right)$$

$$Q_{FM} = 0 \text{ Н}$$

**Податливость прокладки**

$$y_n := \frac{h_n \cdot K_{\text{обж}}}{E_n \cdot \pi \cdot D_{\text{сн}} \cdot b_n} = 1.426 \times 10^{-7} \text{ мм/Н}$$

**Расстояние между опорными поверхностями гайки и головки болта или опорными поверхностями гаек:**

$$L_{60} := 98 \text{ мм}$$

Эффективная длина болта (шпильки) при определении податливости

$$L_6 := L_{60} + 0.28 \cdot d = 103.6 \text{ мм}$$

**Податливость болтов:**

$$y_6 := \frac{L_6}{E_{206} \cdot A_6} = 5.404 \times 10^{-8} \text{ мм/Н}$$

### Расчётные параметры фланцев:

-параметр длины обечайки

$$l_0 := \sqrt{D \cdot S_0}$$

$$l_0 = 77.46 \text{ мм}$$

Отношение наружного диаметра тарелки фланца к внутреннему диаметру:

$$K := \frac{D_n}{D} \quad K = 1.13$$

Коэффициенты, зависящие от соотношения размеров тарелки фланца:

$$\beta_T := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{(1.05 + 1.945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} \quad \beta_T = 1.864$$

$$\beta_U := \frac{K^2 \cdot (1 + 8.55 \cdot \log(K)) - 1}{1.36(K^2 - 1) \cdot (K - 1)} \quad \beta_U = 17.493$$

$$\beta_Y := \frac{1}{(K - 1)} \cdot \left[ 0.69 + 5.72 \cdot \frac{K^2 \cdot \log(K)}{(K^2 - 1)} \right] \quad \beta_Y = 16.077$$

$$\beta_Z := \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} \quad \beta_Z = 8.223$$

Коэффициенты для фланцевых соединений с приварными встык фланцами с прямой втулкой, плоскими фланцами и свободными фланцами:

$$\beta_F := 0.91$$

$$\beta_V := 0.54$$

$$f_s := 1$$

$$\lambda := \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} \quad \lambda = 4.042$$

### Угловая податливость фланцев:

Угловая податливость фланца при затяжке:

$$y_\Phi := \frac{0.91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot l_0 \cdot (S_0)^2} \quad y_\Phi = 2.231 \times 10^{-10}$$



Угловая податливость фланца, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$y_{\text{фн}} := \left(\frac{\pi}{4}\right)^3 \cdot \frac{D_6}{E_{20} \cdot h^3 \cdot D_H} \quad y_{\text{фн}} = 8.551 \times 10^{-12}$$

Коэффициент, учитывающий изгиб тарелки фланца между шпильками (болтами):

$$C_F := \max \left[ 1, \sqrt{\frac{\pi \cdot D_6}{n \cdot \left( 2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0.5} \right)}} \right] \quad C_F = 1$$

Приведенный диаметр плоского фланца:

$$D_{\text{пр}} := D$$

Плечо действия усилий в болтах (шпильках) для приварных встык и плоских фланцев:

$$b := 0.5(D_6 - D_{\text{сп}}) = 16.5 \text{ мм}$$

Плечо усилия от действия давления на фланец для всех типов фланцев:

$$e := 0.5 \cdot (D_{\text{сп}} - D - S_0) = 25.5 \text{ мм}$$

Эквивалентная толщина плоских фланцев:

$$S_9 := S_0$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения для приварных встык и плоских фланцев:

$$\gamma := \frac{1}{y_n + y_6 \cdot \frac{E_{206}}{E_6} + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}} \cdot \frac{E_{20}}{E}} \quad \gamma = 3.115 \times 10^6$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внутренним давлением или внешней осевой силой для приварных встык и плоских фланцев с плоскими прокладками:

$$\alpha := 1 - \frac{y_n - 2 \cdot e \cdot y_{\text{ф}} \cdot b}{y_n + y_6 + 2 \cdot b^2 \cdot y_{\text{ф}}} \quad \alpha = 1.142$$

Коэффициент жесткости фланцевого соединения, нагруженного внешним изгибающим моментом:

$$\alpha_M := \frac{y_6 + 2 \cdot y_{\text{фн}} \cdot b \cdot \left( b + e - \frac{e^2}{D_{\text{сп}}} \right)}{y_6 + y_{\text{п}} \cdot \left( \frac{D_6}{D_{\text{сп}}} \right)^2 + 2 \cdot y_{\text{фн}} \cdot b^2} \quad \alpha_M = 0.312$$

Нагрузка, вызванная стесненностью температурных деформаций, в соединениях с приварными встык и плоскими фланцами:

$$Q_t := \gamma \cdot [2\alpha_{\text{ф}} \cdot h \cdot (t_{\text{ф}} - 20) - 2\alpha_6 \cdot h \cdot (t_6 - 20)] \quad Q_t = 4.184 \times 10^4 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения:

$$P_{61} := \max \left[ \begin{array}{l} \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} \\ \alpha \cdot (Q_d + F) + R_{\text{п}} + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{\text{сп}}} - Q_t \end{array} \right]$$

$$P_{61} = 7.057 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения обжатия прокладки и минимального начального натяжения болтов (шпилек):

$$P_{62} := \max(P_{\text{обж}}, 0.4 \cdot A_6 \cdot \sigma_{206})$$

$$P_{\text{обж}} = 5.23 \times 10^4 \text{ Н}$$

$$P_{62} = 4.68 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) фланцевых соединений при затяжке фланцевого соединения:

$$P_{6\text{м}} := \max(P_{61}, P_{62}) \quad P_{6\text{м}} = 7.057 \times 10^5 \text{ Н}$$

Расчетная нагрузка на болты (шпильки) фланцевых соединений в рабочих условиях:

$$P_{6\text{р}} := P_{6\text{м}} + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{\text{сп}}}$$

$$P_{6\text{р}} = 6.729 \times 10^5 \text{ Н}$$

## Проверка прочности болтов (шпилек) и прокладки.

Расчетные напряжения в болтах (шпильках):

-при затяжке

$$\sigma_{б1} := \frac{P_{бм}}{A_б} \quad \sigma_{б1} = 78.414 \text{ МПа}$$

-в рабочих условиях

$$\sigma_{б2} := \frac{P_{бр}}{A_б} \quad \sigma_{б2} = 74.771 \text{ МПа}$$

## Проверка условий прочности болтов (шпилек) при затяжке и в рабочих условиях

$$Usl\_1 := \begin{cases} \text{"Условия прочности в при затяжке НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{б1} > \sigma_{20б} \\ \text{"Условия прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"} & \text{if } \sigma_{б2} > \sigma_{д.б} \\ \text{"Условия прочности выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl\_1 = \text{"Условия прочности выполняются"}$$

$$\sigma_{б1} = 78.414 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{20б} = 130 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{б2} = 74.771 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{д.б} = 128 \text{ МПа.}$$

## Удельное давление на прокладку:

$$q := \frac{\max(P_{бм}, P_{бр})}{\pi \cdot D_{сн} \cdot b_n} \quad q = 7.457 \text{ МПа}$$

## Условие прочности прокладки (проверяется для мягких прокладок)

$$Usl\_2 := \begin{cases} \text{"Условие прочности прокладки НЕ выполняется"} & \text{if } q > q_d \\ \text{"Условие прочности прокладки выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl\_2 = \text{"Условие прочности прокладки выполняется"}$$

$$q = 7.457 \text{ МПа}$$

$$q_d = 130 \text{ МПа}$$

## Расчёт фланцев на статическую прочность:

Расчётный изгибающий момент, действующий на приварной встык фланца или плоский фланец при затяжке,

$$M_M := C_F \cdot P_{\text{бМ}} \cdot b$$

$$M_M = 1.164 \times 10^7 \text{ Н*мм}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях

$$M_p := C_F \cdot \min[P_{\text{ор}} \cdot b + (Q_d + Q_{\text{FM}}) \cdot e, |Q_d + Q_{\text{FM}}| \cdot e] = 1.343 \times 10^7 \text{ Н*мм}$$

### Расчётные напряжения во фланце при затяжке:

-меридиональное изгибное напряжение во втулке приварного встык фланца, обечайке плоского фланца

$$\sigma_{\text{ОМ}} := \frac{M_M}{\lambda \cdot (S_0 - c_0)^2 \cdot D_{\text{пр}}} \quad \sigma_{\text{ОМ}} = 115.222 \text{ МПа}$$

-напряжения в тарелке приварного встык фланца или плоского фланца в условиях затяжки:

-радиальное напряжение

$$\sigma_{\text{RM}} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_M \quad \sigma_{\text{RM}} = 1.374 \text{ МПа}$$

-окружное напряжение

$$\sigma_{\text{TM}} := \frac{\beta_Y \cdot M_M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{\text{RM}} \quad \sigma_{\text{TM}} = 33.011 \text{ МПа}$$

### Расчётные напряжения во фланце в рабочих условиях:

-меридиональные изгибные напряжения для приварных встык фланцев с прямой втулкой и плоских фланцев

$$\sigma_{\text{ор}} := \frac{M_p}{\lambda \cdot (S_0 - c_0)^2 \cdot D_{\text{пр}}} \quad \sigma_{\text{ор}} = 132.846 \text{ МПа}$$

-максимальные меридиональные мембранные напряжения в обечайке плоского фланца

$$\sigma_{\text{Омр}} := \max \left[ \frac{Q_d + F + \frac{4|M|}{D_{\text{сп}}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_0)}, \frac{Q_d + F - \frac{4|M|}{D_{\text{сп}}}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - c_0)} \right] \quad \sigma_{\text{Омр}} = 33.318 \text{ МПа}$$

Напряжения в тарелке приварного встык фланца или плоского фланца в рабочих условиях:

-радиальное напряжение

$$\sigma_{Rp} := \frac{1.33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} \cdot M_p \quad \sigma_{Rp} = 1.584 \text{ МПа}$$

-окружное напряжение

$$\sigma_{Tp} := \frac{\beta_Y \cdot M_p}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_{Rf} \quad \sigma_{Tp} = 38.06 \text{ МПа}$$

### Проверка условий статической прочности фланцев

PR\_1 := "Условия статической прочности в при затяжке НЕ выполняются"

PR\_2 := "Условия статической прочности в рабочих условиях НЕ выполняются"

PR\_3 := "Условия статической прочности выполняются"

$K_T = 1.3$  при расчёте с учётом стеснённости температурных деформаций. При расчёте без учёта стеснённости температурных деформаций  $K_T = 1$ .

$$K_T := 1.3$$

$$Usl\_3 := \begin{cases} PR\_1 & \text{if } \max(|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{TM}|) > K_T \cdot \sigma_{20} \\ PR\_2 & \text{if } \max\left(\left(\left(|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}| \right), \left(|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}| \right), \left(|\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}| \right)\right)\right) > K_T \cdot \sigma_{д.ф} \\ PR\_3 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Usl\_3 = "Условия статической прочности выполняются"

$$\max(|\sigma_{0M} + \sigma_{RM}|, |\sigma_{0M} + \sigma_{TM}|) = 148.233 \text{ МПа};$$

$$K_T \cdot \sigma_{20} = 254.8 \text{ МПа};$$

$$\max\left(\left(\left(|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Tp}| \right), \left(|\sigma_{0p} - \sigma_{0mp} + \sigma_{Rp}| \right), \left(|\sigma_{0p} + \sigma_{0mp}| \right)\right)\right) = 166.163 \text{ МПа};$$

$$K_T \cdot \sigma_{д.ф} = 243.1 \text{ МПа}.$$

### Проверка углов поворота фланцев

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца:

$$\Theta := M_p \cdot y_f \cdot \frac{E_{20}}{E} \quad \Theta = 3.057 \times 10^{-3}$$

Допустимый угол поворота плоского фланца:

$$\Theta_d := 0.01;$$

$$Usl\_P := \begin{cases} \text{"Условие при испытаниях НЕ выполняется"} & \text{if } \Theta > 1.3 \cdot \Theta_d \\ \text{"Условие в рабочих условиях НЕ выполняется"} & \text{if } \Theta > \Theta_d \\ \text{"Условие поворота плоского фланца выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Usl\_P = \text{"Условие поворота плоского фланца выполняется"}$$

В поставленной задаче для расчёта выбрали плоские фланцевые соединения с привариваемые встык. Провели расчёт на прочность и герметичность.

Усилие, необходимое для смятия прокладки при затяжке, Н:

$$P_{обж} := 5.23 \cdot 10^4$$

Нагрузка, вызванная стеснённостью температурных деформаций, в соединениях с приварными встык и плоскими фланцами, Н:

$$Q_t = 4.184 \times 10^4$$

Угол поворота приварного встык фланца, плоского фланца (0,013-допустимый):

$$\Theta = 3.057 \times 10^{-3}$$

Расчётный изгибающий момент, действующий на фланец в рабочих условиях, Н мм

$$M_{р.р} := 1.343 \cdot 10^7$$

Расчётная нагрузка на болты (шпильки) при затяжке, необходимая для обеспечения в рабочих условиях давления на прокладку, достаточного для герметизации фланцевого соединения, Н:

$$P_{б1} = 7.057 \times 10^5$$

### 3.3.11 Расчёт плоских круглых крышек с дополнительным краевым моментом

Целью расчёта плоских круглых крышек является определение толщины стенки крышки при выполнении условия прочности.

Расчёт плоских крышек производится в соответствии с [26,7.3]. В плоской крышке имеется проточка под перегородку.

#### Равнодействующая нагрузка от давления:

В соответствии с пунктом 3.9:

$$Q_{д.р} := \frac{\pi}{4} \cdot (D_{сп})^2 \cdot P_{р.тр}$$

$$Q_d = 2.279 \times 10^5 \text{ Н}$$

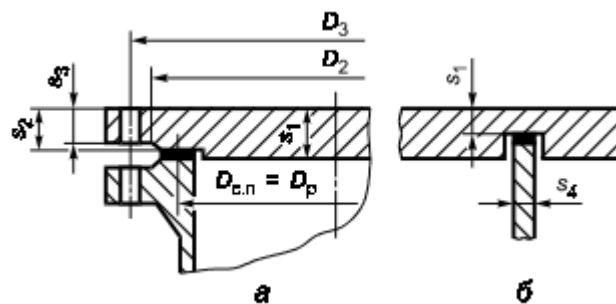


Рисунок 3.15. Плоская крышка с дополнительным краевым моментом и пазом под перегородку.

$P_{бр}$  — определяют по [12] для рабочих условий и условий монтажа.

$$P_{бр} = 7.317 \times 10^5 \text{ Н}$$

Значение  $\psi$  вычисляют по формуле:

$$\psi := \frac{P_{бр}}{Q_d} = 3.21$$

$D_3$  принимается равным диаметру окружности расположения болтов(шпилек)

$$D_3 := D_6 = 1.09 \times 10^3 \text{ мм}$$

$$D_{cp} = 1.057 \times 10^3 \text{ мм}$$

$s_4$  принимаем по [9,табл.5]:

$$s_4 := 1 \text{ мм}$$

**Толщина плоской круглой крышки:**

Для крышки, имеющей паз для перегородки (например, камер теплообменника), значение коэффициента  $K_6$  для определения толщины в месте паза (Рис.13) вычисляют с учетом усилия от сжатия прокладки в пазах по формуле:

$$K_6 := 0.41 \cdot \sqrt{\frac{1 + 3 \cdot \psi \cdot \left( \frac{D_3}{D_{\text{сп}}} - 1 \right) + 9.6 \cdot \frac{D_3}{D_{\text{сп}}} \cdot \frac{s_4}{D_{\text{сп}}}}{\frac{D_3}{D_{\text{сп}}}}} = 0.473$$

$\phi := 1$  - коэффициент прочности сварных швов для крышек изготовленных из одной заготовки (штамповкой).

$K_0$  для днищ и крышек без отверстий принимают равным 1,0

$$K_0 := 1$$

Толщина плоской круглой крышки:

$$s_{\text{пк}} := \text{ceil} \left( K_0 \cdot K_6 \cdot D_{\text{сп}} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{р.тр}}}{\phi \cdot \sigma}} \right) + c = 21 \text{ мм}$$

**Толщина плоской круглой крышки с дополнительным краевым моментом в месте уплотнения:**

Коэффициент  $K_7$  вычисляют по формуле:

$$K_7 := 0.8 \cdot \sqrt{\frac{D_3}{D_{\text{сп}}} - 1} = 0.141$$

Коэффициент  $\Phi$  вычисляют по формуле:

$$\Phi := \max \left( \frac{P_{\text{бм}}}{\sigma_{\text{б1}}}, \frac{P_{\text{бр}}}{\sigma_{\text{б2}}} \right) = 9 \times 10^3$$

В формуле при определении  $\Phi$  индекс «р» указывает на то, что величина суммарного болтового усилия  $F_{\text{бр}}$  и допускаемого напряжения для материала крышки относится к рабочему состоянию или испытаниям, а индекс «м» — состоянию монтажа.

Толщину плоской круглой крышки с дополнительным краевым моментом в месте уплотнения  $s_2$  (Рис.13) вычисляют по формуле:

$$s_2 := \max \left( K_7 \cdot \sqrt{\Phi}, \frac{0.6}{D_{\text{сп}}} \cdot \Phi \right) + c = 15.41 \text{ мм}$$

Окончательно принимаем, мм:

$$s_{\text{пк}} = 22$$

$$s_2 := 2c$$

Глубина паза под перегородку 5 мм.



$$s_1 := s_{\text{пк}} - 5 = 17$$

Поэтому необходимо компенсировать эту глубину, увеличив толщину крышки. Принимаем:  $s_{\text{пк}} := 25$  мм.

**Допускаемое давление для плоской круглой крышки, МПа:**

$$P_{\text{доп}} := \left( \frac{s_{\text{пк}} - c}{K_o \cdot K_b \cdot D_{\text{сп}}} \right)^2 \cdot \phi \cdot \sigma = 0.365$$

**Проверка на условие прочности:**

$$Us1 := \begin{cases} \text{"Условие прочности выполняется"} & \text{if } P_{\text{р.тр}} \leq P_{\text{доп}} \\ \text{"Условия прочности НЕ выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Us1 = \text{"Условие прочности выполняется"}$$

Проверка условия прочности показала, что рабочее давление не превышает допускаемое. Значит окончательно принимаем толщину плоской крышки:  $s_{\text{пк}} = 25$  мм.

### 3.3.12 Расчёт необходимости укрепления отверстий

Задачей расчёта укрепления отверстий является определения минимального диаметра отверстия, не требующего укрепления и условия укрепления.

Расчёт укрепления отверстий проводится в соответствии с требованиями [11] и [13]. В конструкцию аппарата входят 4 основных технологических штуцера. В данном пункте будет производиться проверка необходимости укрепления отверстия для пары наибольших штуцеров.

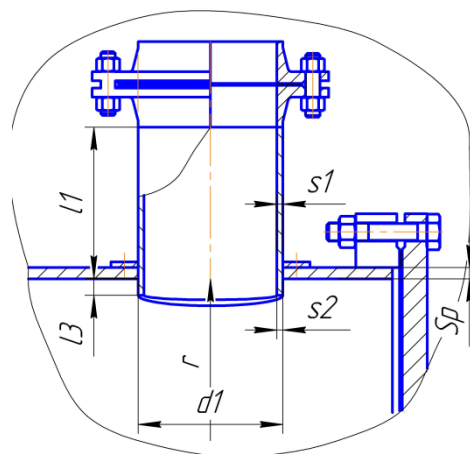


Рисунок 3.16. Схема для расчёта укрепления отверстий

Таблица 3.12– Исходные данные для расчёта необходимости укрепления отверстий

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Внутренний диаметр оболочки	D	1000	мм
Расчётная температура	t.R	135	С
Исполнительная толщина стенки оболочки	s	6	мм
Расчётная толщина стенки оболочки:	s.p	1,969	мм
Расчётное давление	P.r	0,6	МПа
Расстояние от центра укрепления отверстия до оси оболочки	r	500	мм
Диаметр отверстия	d1	224	мм
Толщина стенки (внешней) штуцера	s.1	5	мм
Толщина стенки (внутренней) штуцера	s3	5	мм
Длина внешней части штуцера	l1	200	мм
Длина внутренней части штуцера	l3	0	мм
Толщина накладного кольца	s.2	6	мм
Прибавка расчетной толщины стенки	c	2	мм
Коэффициент прочности сварных швов	φ	1	
Расстояние между отверстиями	b.1	1366	мм
Допускаемое напряжение для стали 16ГС при t = 20 0С из [7, А.1]	σ.20	196	МПа
Минимальное значение предела текучести стали при при 20 0С из [7, В.1]	R.02	300	МПа
Поправочный коэффициент для допускаемых напряжений сталей	η	1	

Коэффициент запаса прочности при гидравлических испытаниях	n.T	1,1	
Допускаемое напряжение для материала при расчётной температуре:	$\sigma_d$	172,2	МПа
Марка стали	16ГС		

### Расчётные параметры:

Допускаемое напряжение для материала накладного кольца (16ГС) при расчетной температуре:  $\sigma_{d1} := \sigma_d$

Допускаемое напряжение для материала внешней части штуцера при расчетной температуре:  $\sigma_{d2} := \sigma_d$

Допускаемое напряжение для материала внутренней части штуцера при расчетной температуре:  $\sigma_{d3} := \sigma_d$

Допускаемое напряжение для стали 08Х22Н6Т при нормальных условиях:

$$\sigma_{20} := \text{Floor}(\eta \cdot \sigma_{20}, 0.5) = 196 \text{ МПа.}$$

### Расчёт укрепления отверстия в цилиндрической оболочке.

#### Расчётный диаметр оболочки

$$D_p := D$$

$$D_p = 1 \times 10^3 \text{ мм}$$

#### Расчётный диаметр отверстий в стенке обечайки:

$$d_{1p} := d_1 + 2 \cdot c \quad d_{1p} = 228 \text{ мм}$$

Так как второе отверстие имеет такие же размеры, то:

$$d_{2p} := d_{1p} = 228 \text{ мм}$$

#### Одиночные отверстия в цилиндрической оболочке

Отверстие считается одиночным, если ближайшее к нему отверстие не оказывает на него влияния, что имеет место, когда расстояние между наружными поверхностями соответствующих штуцеров удовлетворяет условию:

$$b \geq \sqrt{d_{1p} \cdot (s - c)} + \sqrt{d_{2p} \cdot (s - c)}$$

Определяем расстояние между стенками штуцеров:

$$b_1 := \left[ \frac{(D + 2 \cdot S_{\text{ЦО}}) \cdot \pi}{2} \right] - d_1 = 1.366 \times 10^3 \text{ мм}$$

$$\text{Усл} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется расчет взаимодействующих отверстий"} & \text{if } b_1 \geq \sqrt{d_{1p} \cdot (s - c)} + \sqrt{d_{2p} \cdot (s - c)} \\ \text{"Требуется расчет взаимодействующих отверстий"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Усл} = \text{"НЕ требуется расчет взаимодействующих отверстий"}$$

**Расчетный диаметр одиночного отверстия, не требующего укрепления при избыточной толщине стенки цилиндрической обечайки:**

$$d_0 := 2 \cdot \left[ \left( \frac{s - c}{s_p} \right) - 0.8 \right] \cdot \sqrt{(D_p) \cdot (s - c)} = 176.845 \text{ мм}$$

Отверстия в оболочке одинаковые, поэтому рационально рассматривать расчёт укрепления лишь одного отверстия.

**Проверка условий необходимости дальнейшего расчета укреплений отверстий:**

$$\text{провЗ} := \begin{cases} \text{"НЕ требуется укрепление отверстия"} & \text{if } d_0 \geq (d_{1p}) \\ \text{"Требуется укрепление отверстия"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{провЗ} = \text{"Требуется укрепление отверстия"}$$

Из условий следует, что необходимо укрепление отверстий для обоих штуцеров.

**Проверка условий применения формул для расчёта укрепления отверстий:**

Согласно [13,табл.1] для первого (второго) отверстия:

$$\text{Usl} := \begin{cases} \text{"отношение диаметров НЕ выполняется"} & \text{if } \frac{(d_{1p} - 2 \cdot c)}{D} > 1 \\ \text{"отношение толщины к диаметру НЕ выполняется"} & \text{if } \frac{(s - c)}{D} > 0.1 \\ \text{"условия применения формул выполняются"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Usl} = \text{"условия применения формул выполняются"}$$

### Расчётная толщина стенки штуцера:

Расчетную толщину стенки штуцера, нагруженного как внутренним, так и наружным давлением, вычисляют по формуле:

$$s1'_p := \frac{P_r \cdot (d1 + 2 \cdot c)}{2 \cdot \sigma_{d1} \cdot \phi - P_r} = 0.369 \text{ мм}$$

### Расчётные длины штуцеров:

Расчетные длины внешней и внутренней частей круглого штуцера, участвующие в укреплении отверстий и учитываемые при расчете, вычисляют по формулам:

$$l_{1p} := \min\left[l1, 1.25 \cdot \sqrt{(d1 + 2 \cdot c) \cdot (s1 - c)}\right] = 48.121 \text{ мм - для внешней части штуцера;}$$

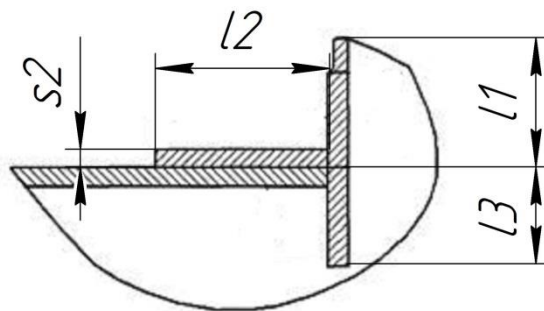


Рисунок 3.17. Укрепление отверстий при наличии проходящего штуцера

Т.к. в нашем случае штуцер проходящий, рис. 3.16, то

$$s_3 := s_1$$

$$l_{31p} := \min\left[l3, 0.5 \cdot \sqrt{(d1 + 2 \cdot c) \cdot (s_3 - 2 \cdot c)}\right] = 0 \text{ мм - внутренней части штуцера;}$$

### Расчётная ширина накладного кольца:

$$l_{21p} := \left[\sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)}\right] = 100 \text{ мм - расчетная ширина накладного кольца;}$$

Принимаем:

$$l_{21p} := 30 \text{ мм}$$

**Расчётная ширина зоны укрепления в обечайках и днищах при отсутствии торообразной вставки или вваренного кольца:**

$$l_{1p} := \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 63.246 \text{ ММ}$$

**Отношения допускаемых напряжений:**

**для внешней части штуцера**

$$\sigma_{d1} := \sigma_d$$

$$\sigma_{d2} := \sigma_d$$

$$\chi_1 := \min\left(1, \frac{\sigma_{d1}}{\sigma_d}\right) \quad \chi_1 = 1$$

**для внутренней части штуцера:**

$$\chi_2 := \min\left(1, \frac{\sigma_{d1}}{\sigma_d}\right) \quad \chi_2 = 1$$

**для накладного кольца**

$$\chi_3 := \min\left(1, \frac{\sigma_d}{\sigma_d}\right) \quad \chi_3 = 1$$

**Расчётный диаметр одиночного отверстия, не требующий дополнительного укрепления:**

$$d_{1op} := 0.4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)} = 25.298 \text{ ММ}$$

**Проверка необходимости укрепления отверстия**

$$P_{rov} := \begin{cases} \text{"Необходимо укрепление отверстия"} & \text{if } d_{1op} < d_1 \\ \text{"Укрепление не требуется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{rov} = \text{"Необходимо укрепление отверстия"}$$

**Проверка условия укрепления одиночного отверстия**

$A_{11} := l_{1p} \cdot (s_1 - s'_{1p} - c) = 295.014 \text{ мм}^2$  - площадь укрепляющего сечения внешней части штуцера;

$A_{21} := l_{21p} \cdot s_2 = 180 \text{ мм}^2$  – площадь поперечного сечения накладного кольца;

$A_{31} := l_{31p} \cdot (s_3 - c - c) = 0 \text{ мм}^2$  - площадь укрепляющего сечения внутренней части штуцера;

$$A_{1p,c} := l_{1p} \cdot (s - s_p - c) = 137.89 \text{ мм}^2$$

$$A_{1p} := 0.5(d_{1p} - d_{1op}) \cdot s_p = 184.435 \text{ мм}^2$$

**При укреплении отверстия утолщением стенки сосуда или штуцера накладным кольцом должно выполняться условие:**

$$\text{Summa1} := A_{11} \cdot \chi_1 + A_{21} \cdot \chi_2 + A_{31} \cdot \chi_3 + A_{1p,c} = 612.904 \text{ мм}^2$$

$$\text{Prov}' := \begin{cases} \text{"условие укрепления выполняется"} & \text{if Summa1} \geq A_{1p} \\ \text{"условие укрепления НЕ выполняется"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Prov}' = \text{"условие укрепления выполняется"}$$

**Допускаемое внутреннее избыточное давление:**

для цилиндрических обечаек:

$$K1 := 1$$

$$V := \min \left[ 1, \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot [(s_1 - c) \cdot \chi_1 + l_{21p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{31p} \cdot (s_3 - c) \cdot \chi_3]}{l_{1p} \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_0 - d_{1op}}{l_{1p}} + K1 \cdot \frac{d_1 + 2 \cdot c}{D_p} \cdot \frac{\phi \cdot l_{1p}}{\phi \cdot l_{1p}}} \right] = 1$$

$$P_{ди} := \frac{2 \cdot K1 \cdot (s - c) \cdot \phi \cdot \sigma_d \cdot V}{D_p + (s - c) \cdot V} = 1.478 \text{ МПа.}$$

Согласно требованиям [13] производится укрепление всех 4 отверстий избыточной толщиной оболочки, укрепление стенками штуцера, а также укрепление накладным кольцом шириной 30 мм

### 3.3.13 Расчёт стандартной опоры аппарата

#### Расчёт массы аппарата.

##### Масса обечайки:

$L_{об} := 4 \text{ м}$  - длина обечайки;

$D_{н} := 1.012 \text{ м}$  - наружный диаметр обечайки;

$D := 1 \text{ м}$  - внутренний диаметр обечайки;

$\rho_{ст} := 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  - плотность стали;

$s_{об} := 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - толщина стенки обечайки.

Масса обечайки, кг:

$$m_{об} := \frac{\pi}{4} (D_{н}^2 - D^2) \cdot L_{об} \cdot \rho_{ст} = 887.452$$

##### Масса эллиптического днища:

$m_{кр} := 55.4 \text{ кг}$

$V_{ёмк} := 170 \cdot 10^{-3} = 0.17 \text{ м}^3$

##### Масса плоской крышки:

$H_{кр} := 0.2 \text{ м}$  - высота крышки;

$s_{плк} := s_{плк} \cdot 10^{-3} = 0.025 \text{ м}$  - толщина плоской крышки;

$s_{кр} := 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - толщина крышки;

$D_{н} = 1.012 \text{ м}$  - диаметр крышки;

$h := 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  - высота цилиндрической части;

Масса плоской крышки:

$$m_{дн} := \frac{\pi}{4} \cdot D_{н}^2 \cdot s_{плк} \cdot \rho_{ст} = 156.85 \text{ кг.}$$

##### Масса трубок:

$d_{вн} = 0.021 \text{ м}$  - внутренний диаметр трубок;

$d_{нар} = 0.025 \text{ м}$  - наружный диаметр трубок.



Масса трубок, кг:

$$m_{\text{тр}} := N \cdot \left[ \frac{\pi}{4} (d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вн}}^2) \cdot L_{\text{об}} \cdot \rho_{\text{ст}} \right] = 4.342 \times 10^3$$

**Массы штуцеров и фланцев корпуса, кг:**

$$M_{\text{ш.и.ф}} := (m_{\text{п219х6}} + m_{\text{ф219}}) \cdot 4 + m_{\text{ф1000}} \cdot 5 = 411.116$$

**Масса трубных решеток:**

$$S_{\text{тр}} := S_{\text{тр}} \cdot 10^{-3} = 0.024 \text{ м} - \text{толщина трубной решётки};$$

$$d_{\text{отв}} := d_{\text{отв}} \cdot 10^{-3} = 0.026 \text{ м} - \text{диаметр отверстий в трубной решётке.}$$

Объём и масса трубных решеток:

$$V_{\text{реш}} := \left( \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot S_{\text{тр}} \right) - N \cdot \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{отв}}^2 \cdot S_{\text{тр}} \right) = 0.011$$

$$M_{\text{тр.р}} := 2 \cdot (V_{\text{реш}} \cdot \rho_{\text{ст}}) = 166.436$$

**Масса входной камеры, кг:**

$$L_{\text{в.к.}} := 600 \cdot 10^{-3} = 0.6$$

м - длина входной камеры.

$$m_{\text{в.к.}} := \frac{\pi}{4} (D_{\text{н}}^2 - D^2) \cdot L_{\text{в.к.}} \cdot \rho_{\text{ст}} = 88.745$$

**Масса перегородок:**

$$M_{\text{п}} := 100 \text{ кг}$$

**Масса воды при гидроиспытаниях:**

$$L := L_{\text{об}} + L_{\text{в.к.}} - \text{полная длина цилиндрической части аппарата};$$

Объём аппарата, м<sup>3</sup>:

$$V_{\text{в}} := \left( \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L \right) + V_{\text{ёмк}} = 5.354$$

Масса воды, кг:

$$\rho_{\text{в}} := 100 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right) - \text{ПЛОТНОСТЬ ВОДЫ};$$

$$m_B := V_B \cdot \rho_B = 5.354 \times 10^3$$

**Общая масса аппарата, кг:**

$$M_{\text{ап}} := (m_{\text{об}} + m_{\text{кр}} + m_{\text{дн}} + m_{\text{тр}} + M_{\text{ш.и.ф}} + M_{\text{тр.р}} + m_{\text{в.к.}} + M_{\text{п}}) = 6.208 \times 10^3$$

учётom прибавки 20 % массы аппарата и воды, кг:

$$M := M_{\text{ап}} \cdot 1.2 + m_B = 1.28 \times 10^4$$

Вес аппарата, Н:

$$G_{\text{ап}} := g \cdot M = 1.256 \times 10^5$$

Или МН:

$$G_{\text{ап}} := G_{\text{ап}} \cdot 10^{-6} = 0.126$$

Принимаем количество опор:

$$k := 2$$

Нагрузка на одну опору, МН:

$$G_{\text{наг}} := \frac{G_{\text{ап}}}{k} = 0.063$$

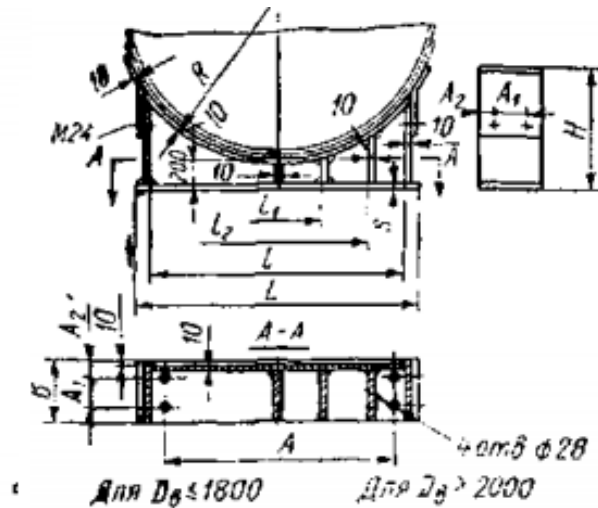


Рисунок 3.18. Опоры горизонтальных аппаратов

По полученной нагрузке на одну сторону аппарата выбираем подходящий тип опор. Выбор производим в соответствии с данными, указанными в [5,табл. 29.12]. На рисунке 3.18 представлена опора горизонтальных аппаратов.

В таблице 3.13 указаны основные сведения о выбранной опоре.

Таблица 3.13. Опоры горизонтальные.

Тип	$G \cdot 10^2$ , МН (тс)	$D_s$	$L$	$l$	$l_1$	$l_2$	мм						Масса, кг	
							$B$	$H$	$A$	$A_1$	$A_2$	$R$		$s$
<i>f</i>	14	1000	950	905	—	—	200	515	650	90	55	524	16	84,5

$$G_{\text{наг}} := G_{\text{наг}} \cdot 10^2 = 4.58 \text{ МН} \cdot 10^2.$$

### Расчёт опор.

Расчёт опор ведётся согласно методике, указанной в [11,29.2]

Реакция опор, МН:

$$P_A := 0.5 \cdot G_{\text{ап}} = 0.063$$

$$P_B := 0.5 \cdot G_{\text{ап}} = 0.063$$

Приведенная длина аппарата, м:

$$L_{\text{пр}} := L_{\text{об}} + L_{\text{в.к.}} + (H_{\text{кр}} + h + s_{\text{кр}}) + s_{\text{пк}} = 6.931$$

Расстояние между опорами, м:

$$l_1 := 0.207 \cdot L_{\text{пр}} = 1.435$$

$$l := L_{\text{пр}} - 2 \cdot l_1 = 4.062$$

Расчётный изгибающий момент от силы тяжести, МН\*м:

$$M_u := 0.0105 \cdot G_{\text{ап}} \cdot L_{\text{пр}} = 9.141 \times 10^{-3}$$

Напряжение на изгиб в корпусе от силы тяжести, МН/м<sup>2</sup>:

$$\sigma_u := \frac{M_u}{0.8 \cdot D^2 \cdot (s_{\text{об}} - c)} = 2.856$$

Напряжение мало, поэтому нет необходимости проверять корпус на устойчивость.

Выбираем ширину опоры:

$$b := 0.2 \cdot D = 0.2 \text{ м}$$

Момент сопротивления расчётного сечения стенки корпуса над опорой:

$$W := \frac{[b + 8 \cdot (s_{об} - c)] \cdot (s_{об} - c)^2}{6} = 6.187 \times 10^{-7} \text{ м}^3$$

Напряжение на изгиб в стенке аппарата от действия реакции опоры, МН/м<sup>2</sup>:

$$\sigma_U := \frac{0.02 \cdot P_A \cdot D}{W} = 2.03 \times 10^3$$

Для стали 16ГС допустимое напряжение при изгибе:  $\sigma_{ид} := 170 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$

$$Prov' := \begin{cases} \text{"не требуется усилить стенку над опорой"} & \text{if } \sigma_{ид} \geq \sigma_U \\ \text{"требуется усилить стенку над опорой"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Prov' = "требуется усилить стенку над опорой"

Требуемый момент сопротивления усиленного сечения элемента стенки:

$$W := \frac{0.02 \cdot P_A \cdot D}{\sigma_{ид}} = 7.388 \times 10^{-6}$$

$$W := \frac{0.02 \cdot P_A \cdot D}{\sigma_{ид}} = 7.388 \times 10^{-6}$$

$$4 \cdot \sigma_{ид} = 680 \text{ МПа} < \sigma_U = 2.03 \times 10^3 \text{ МПа}$$

Принимаем толщину подкладного листа:

$$S_H := 1.6s_{об} = 9.6 \times 10^{-3} \text{ м}$$

$$S_H := 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Расчётная площадь поперечного сечения стенки корпуса:

$$F_c := [b + 8 \cdot (s_{об} - c)] \cdot (s_{об} - c) = 9.28 \times 10^{-4} \text{ м}^2$$

Расчётная площадь сечения накладки:

$$F_H := (b + 4 \cdot S_H) \cdot S_H = 2.4 \times 10^{-3} \text{ м}^2$$

Момент инерции площади Fc:

$$J_c := \frac{F_c \cdot (s_{об} - c)^2}{12} = 1.237 \times 10^{-9} \text{ м}^4$$

Момент инерции площади Fн:

$$J_H := \frac{F_H \cdot (S_H)^2}{12} = 2 \times 10^{-8}$$

Расстояние от  $\text{м}^4$  нижней поверхности накладки до центра тяжести площади  $F_C + F_H$ :

$$y := \frac{F_C \cdot [S_H + 0.5 \cdot (s_{об} - c)] + 0.5 \cdot F_H \cdot S_H}{F_C + F_H} = 6.952 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Расчётный момент сопротивления усиленного накладкой сечения корпуса:

$$W_y := \frac{J_C + J_H + F_C \cdot [S_H + 0.5 \cdot (s_{об} - c) - y]^2 + F_H \cdot (y - 0.5S_H)^2}{y} = 7.772 \times 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$P_{гов} := \begin{cases} \text{"прочность обеспечена"} & \text{if } W_y \geq W \\ \text{"прочность НЕ обеспечена"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$P_{гов} = \text{"прочность обеспечена"}$

Прочность обеспечивается, если между опорами и корпусом подложить подкладной лист толщиной 10 мм.

### 3.5 Расчёт тепловой изоляции

Расчёт тепловой изоляции производится по методике, изложенной в учебном пособии [5].

Принимаем температуру стенки равной температуре среды в межтрубном пространстве:

$$t_{ст} := 60 \text{ } ^\circ\text{C};$$

Температура изоляции:

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

Температура окружающей среды:

$$t_{окр} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Разность между температурой поверхности слоя изоляции и температурой окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ :

$$\Delta t := t_{\text{из}} - t_{\text{окр}} = 20$$

В качестве теплоизоляционного материала принимаем «совелит»:  $\lambda_{\text{из}} := 0.098$

Толщину тепловой изоляции находим из равенства удельных тепловых потоков через слой изоляции от поверхности изоляции к окружающей среде

$$\alpha_{\text{н}} := 9.74 + 0.07 \cdot \Delta t = 11.14 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

$$\delta_{\text{из}} := \frac{\lambda_{\text{из}}}{\alpha_{\text{н}}} \cdot \frac{(t_{\text{ст}} - t_{\text{из}})}{(t_{\text{из}} - t_{\text{окр}})} = 8.797 \times 10^{-3} \text{ м}$$

Следовательно, толщину изоляции примем равной 10 мм

### 3.6 Гидравлический расчёт

Расчёт производится по методике, указанной в пособии [21,1.5.3.]

**Гидравлическое сопротивление трубного пространства.**

$$d_{\text{вн}} = 0.021 \text{ м}; \quad \text{Re}_1 = 2 \times 10^4 ; \quad N_{\text{ход}} := \frac{N}{6}; \quad \rho_1 := 997.6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Скорость движения оборотной воды в трубах, м/с:

$$\omega_1 := \frac{\text{Re}_1 \cdot \mu_1}{d_{\text{вн}} \cdot \rho_1} = 0.929$$

Коэффициент сопротивления трения:

$$\text{Re}_1 = 2 \times 10^4$$

При турбулентном режиме движения потока:

$$\lambda := \frac{0.316}{\text{Re}_1^{0.25}} = 0.027$$

Скоростное давление в трубах, Па:

$$\Delta p_{\text{скт}} := \frac{\omega_1^2 \cdot \rho_1}{2} = 430.833$$

Потеря давления на преодоление трения в трубах:

Число ходов по трубному пространству:

$$n := 6$$

Длина труб, м:

$$L := 6$$

Коэффициент местных сопротивлений  $\Sigma\xi$  определяют опытным путем. Ниже приведены значения:

входная и выходная камера (удар и поворот)	1,5
поворот на 180° между ходами и секциями	2,5
вход в трубы или выход из них	1
вход в межтрубное пространство под углом 90°	1,5
поворот на 90° в межтрубном пространстве	1

$$\Sigma\xi := 1.5 + 1 + 1 + 2.5 + 1 + 1 + 2.5 + 1 + 1 + 2.5 + 1 + 1 + 1.5 + 2.5 + 2.5 = 23.5$$

Общее гидравлическое сопротивление трубного пространства, Па:

$$\Delta p_{\text{тр.пр}} := \lambda \cdot \left( \frac{n \cdot L}{d_{\text{вн}}} + \Sigma\xi \right) \cdot \Delta p_{\text{скт}} = 1.989 \times 10^4$$

**Гидравлическое сопротивление межтрубного пространства.**

$$D := 1 \text{ м}; \quad N := 718 \text{ шт}; \quad Re_2 = 1.295 \times 10^5$$

Эквивалентный диаметр, м:

$$d_{\text{экв}} := \frac{4 \cdot \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} - N \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{нар}}^2}{4} \right)}{D + N \cdot (\pi \cdot d_{\text{нар}})} = 0.037$$

Скорость движения оборотной воды в межтрубном пространстве, м/с:

$$w_2 := \frac{Re_2 \cdot \mu_2}{d_3 \cdot \rho_2} = 3.089$$

Коэффициент сопротивления трения:

$$Re_2 = 1.295 \times 10^5$$

При турбулентном режиме движения потока

$$\lambda := \frac{0.316}{Re_2^{0.25}} = 0.017$$

Скоростное давление, Па:

$$\Delta p_{\text{скт}} := \frac{\omega_2^2 \cdot \rho_2}{2} = 4.749 \times 10^3$$

Потеря давления на преодоление трения в трубах:

Число поперечных перегородок в межтрубном пространстве:

$$x := 10$$

Коэффициент местных сопротивлений  $\Sigma \xi$  определяют опытным путем. Ниже приведены значения:

входная и выходная камера (удар и поворот)	1,5
поворот на $180^\circ$ между ходами и секциями	2,5
вход в трубы или выход из них	1
вход в межтрубное пространство под углом $90^\circ$	1,5
поворот на $90^\circ$ в межтрубном пространстве	1

$$\Sigma \xi := 1.5 + x \cdot 1.5 + 1.5 = 18$$

Общее гидравлическое сопротивление трубного пространства, Па:

$$\Delta p_{\text{мжтр.пр}} := \lambda \cdot \left( \frac{n \cdot L}{d_{\text{вн}}} + \Sigma \xi \right) \cdot \Delta p_{\text{скт}} = 2.186 \times 10^5$$

Мощность насоса для подачи оборотной воды:

Объёмный расход

$$V_{\text{о.в.}} := \frac{G_{\text{о.в.}}}{\rho_1} = 0.04 \quad \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

к.п.д. зададимся:

$$\eta := 0.65$$

$$N_{\text{нас}} := \frac{V_{\text{о.в.}} \cdot \Delta p_{\text{тр.пр}}}{1000 \cdot \eta} = 1.237 \quad \text{кВт}$$

**Подбор насоса для деминерализованной воды:**

Мощность насоса для подачи деминерализованной воды:

Объёмный расход



$$V_{\text{д.в.}} := \frac{G_{\text{д.в.}}}{\rho_2} = 0.05 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

к.п.д. зададимся:

$$N_{\text{нас}} := \frac{V_{\text{д.в.}} \cdot \Delta p_{\text{мжтр.пр}}}{1000 \cdot \eta} = 16.893 \text{ кВт}$$

Выбираем по [5,38]: выбрали насос X45/54,  $Q=1,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $H=42 \text{ м}$ ,  $n=48.3 \text{ с}^{-1}$ ,  $\eta_n=0,60$ , электродвигатель тип: АО2-71-2,  $N_n=22 \text{ кВт}$ ,  $\eta_{\text{дв}}=0,88$ .

## **4. Гранулирование порошкообразных отходов полипропилена**

### **4.1 Литературный обзор**

Полипропилен – синтетический термопластичный полимер, используемый для производства огромного количества товаров. Этот материал задействован в строительстве, аграрном и бытовом секторах, автомобильной, пищевой и медицинской отраслях. Но вместе с популярностью пластика растёт и тревога экологов: для полного разложения отходов полипропилена естественным путём требуется до 500 лет.

С потреблением растёт и количество отходов данного вида полимера, которые при неправильной утилизации приводят к серьёзным последствиям для человека и окружающей среды. Чтобы в ближайшем будущем человечество не утонуло в пластиковых отходах, уже сегодня необходимы безопасные способы их утилизации.

Такие способы, как рекультивация и сжигание, не подходят для полипропилена. Так как при его захоронении выделяется газ, который провоцирует возникновение парникового эффекта. Основным эффективным методом утилизации полипропилена является вторичная переработка, так как материал сохраняет при этом все свои свойства, что позволяет сокращать цикл производства новых товаров, а значит и их стоимость. Зачастую полипропилен плавят, в результате чего образуется гранулы, из которых будут производиться пластмассовые изделия.

Процесс переработки полипропилена включает в себя сбор, сортировку, очистку и непосредственно переработку.

Для переработки полипропилен важно отделить от других полимеров. Это можно сделать за счёт использования такого свойства материала как удельная плотность. Она отличается от удельной плотности других полимеров и составляет  $0,86 \text{ г/см}^3$ . Поэтому, когда все другие пластики и примеси будут тонуть, этот пластик может оказаться на поверхности. Ещё полимеры можно отделить друг от друга благодаря разным индексам текучести расплава.

Вторичный полипропилен после переработки годен для изготовления волокна для морских канатов, пленки и ленты, изоляционных материалов, упаковочной тары, ведер для пищевых продуктов и лакокрасочных изделий.

Также полипропилен пригоден для производства дорожного покрытия, шумоизоляционных материалов, электроизоляции и даже нитей для изготовления основы ковровых покрытий.

В настоящее время технология переработки изделий из полипропилена отлажена. Но технологией переработки бракованного полипропилена с заводов производителей мало изучена. Отходы появляются в ходе ремонтных работ, отборов проб, несоответствий технологическому режиму (брак). Суммарно за год на одном предприятии может накопиться до 200 т порошка. При этом часть порошка может быть хорошего качества, но так как он имеет посторонние примеси, то его утилизируют на полигоне.

Часто бывает так, что порошок загрязнён разнообразными механическими примесями: грязь, масла, металлическая стружка и т.д. По этой причине предприятия, перерабатывающие полипропилен, отказываются использовать данный продукт, т.к. это приводит к неисправности машин и аппаратов и влияет на качество готовой продукции. Кроме того, отходы производств полимеризации полипропилена не стабилизированы. То есть они находятся не в гранулах, как товарный полипропилен, а в виде порошка. В порошке соответственно нет специальных добавок, которые улучшают физико-механические свойства готовой продукции, и защищают его от воздействия кислорода. При правильном дозировании такой порошок можно добавлять и в товарный порошок без ущерба качеству.

Чтобы продать отходы порошкообразного ПП его необходимо очистить от механических примесей и сгранулировать для удобства транспортировки, дозирования и хранения.

## 4.2 Экспериментальная часть

В ходе научной работы необходимо было решить проблемы очистки и грануляции порошка полипропилена без плавления. Поскольку плавление полипропилена довольно сложный и опасный процесс.

На первом этапе исследования была предпринята попытка гранулирования порошка на тарельчатом грануляторе методом окатывания (рис. 4.1.).

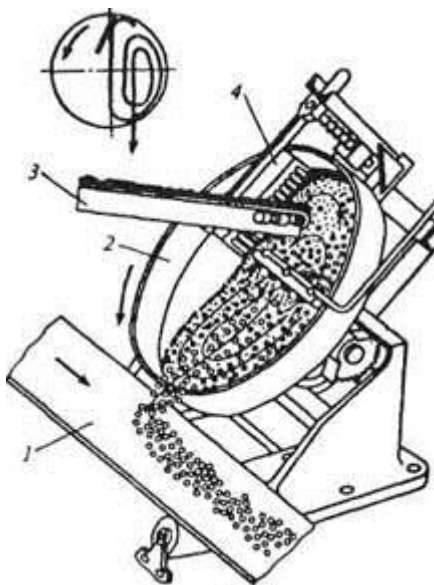


Рисунок 4.1. Тарельчатый гранулятор:

- 1 – конвейер для удаления гранул; 2 – тарель;  
3 – лоток подачи порошка; 4 – скребки.

Порошок полипропилена подается на тарель, вращающуюся со скоростью 30 об/мин. Угол наклона тарели – 60°. Гранулирование происходит в течение 30 минут. В качестве связующей жидкости использовался раствор атактического полипропилена в нефрасе и раствор дилаурилтиодипропионата (ДЛТДП –  $C_{12}H_{25}COO((CH_2)_9)_2S$ ) в нефрасе. При вращении тарели частицы порошка под влиянием центробежной силы отбрасываются к стенке. Часть порошка захватывается стенкой и поднимается на некоторую высоту, а затем падает и сползает вниз. При подъеме частицы движутся совместно со стенкой, практически не перемещаясь друг относительно друга. По достижению некоторой высоты,

зависящей от веса частицы, скорости вращения стенки и угла естественного откоса, гранулы под действием силы тяжести скатываются вниз.

В процессе окатывания образовалась однородная масса, которую не смогли сгранулировать. Очистка порошка от примесей также была не возможна.

На втором этапе исследований было принято решения изменить способ грануляции. Для получения гранул из отходов ПП был выбран метод гранулирования в жидкой среде (метод ГЖС). Сущность метода ГЖС заключается в том, что частицы ПП помещаются в дисперсионную среду, и затем добавляется связующая жидкость. На трехфазную систему накладываются гидродинамические воздействия, и через определенный промежуток времени образуются гранулы, которые отделяются от дисперсионной среды и сушатся. Реализация процесса ГЖС возможна только при соблюдении следующих правил: поверхность твердых частиц должна иметь полярность, противоположную полярности дисперсионной среды; связующая жидкость должна быть однополярной с поверхностью гранулируемых частиц.

В качестве дисперсионной среды использовалась дистиллированная вода, а связующей жидкостью являлся порошок ДЛТДП, который не растворяется в воде и спиртах и применяется в качестве антиоксиданта вторичного действия с пластифицирующими свойствами. Температура плавления ДЛТДП составляет 42 °С.

Методика эксперимента заключается в следующем. В стеклянный стакан объемом 600 мл заливается 200–250 мл воды, предварительно нагретой до 50–60 °С (рис. 4.2). В горячую воду засыпается навеска порошка ДЛТДП, который расплавляется до жидкого состояния и является связующей жидкостью. Затем включается пропеллерная мешалка, вращающаяся со скоростью 100–150 об/мин. Скорость вращения мешалки регулируется так, чтобы образовывались гранулы диаметром 3–5 мм. После этого засыпается навеска порошкообразного ПП и в течение 5–7 мин образуются гранулы.

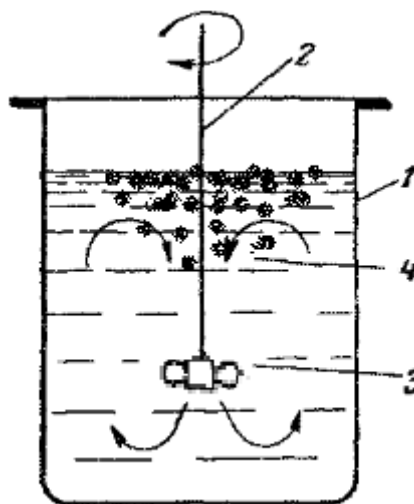


Рисунок 4.2. Установка для гранулирования в жидкости:

- 1 – стакан; 2 – вал мешалки; 3 – пропеллерная мешалка;  
4 – порошок полипропилена

После образования гранул в стакан наливается 200 мл холодной воды для снижения температуры дисперсионной среды до 20–25 °С и затвердевания гранул, которые с помощью сита отделяются от водной среды и сушатся при комнатной температуре.

В процессе экспериментов варьировалось массовое соотношение порошка ПП и ДЛТДП, а также количество дисперсионной среды (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Параметры экспериментов

Количество воды, мл	Навеска ПП, г	Навеска ДЛТДП, г	Содержание ДЛТДП в гранулах, %	Содержание твердой фазы в воде, %
250	2	1	33,3	1,2
	2,5	1	28,6	1,4
	3	1	25,0	1,6
	3,5	1	22,2	1,8
	4	1	20,0	2,0
	2	2	50,0	1,6
	6	2	25,5	3,2
150	3	1	25,5	2,6

Высушенные гранулы исследовались на прочность в статических условиях. Предварительно гранулы измерялись в двух сечениях и с помощью прибора МП–9С производилось равномерное нагружение гранулы до разрушения.

Полученные результаты приведены в таблице 4.2. По результатам расчётов был построен график зависимости прочности гранул от содержания связующей жидкости ДЛТДП (рис. 4.3).

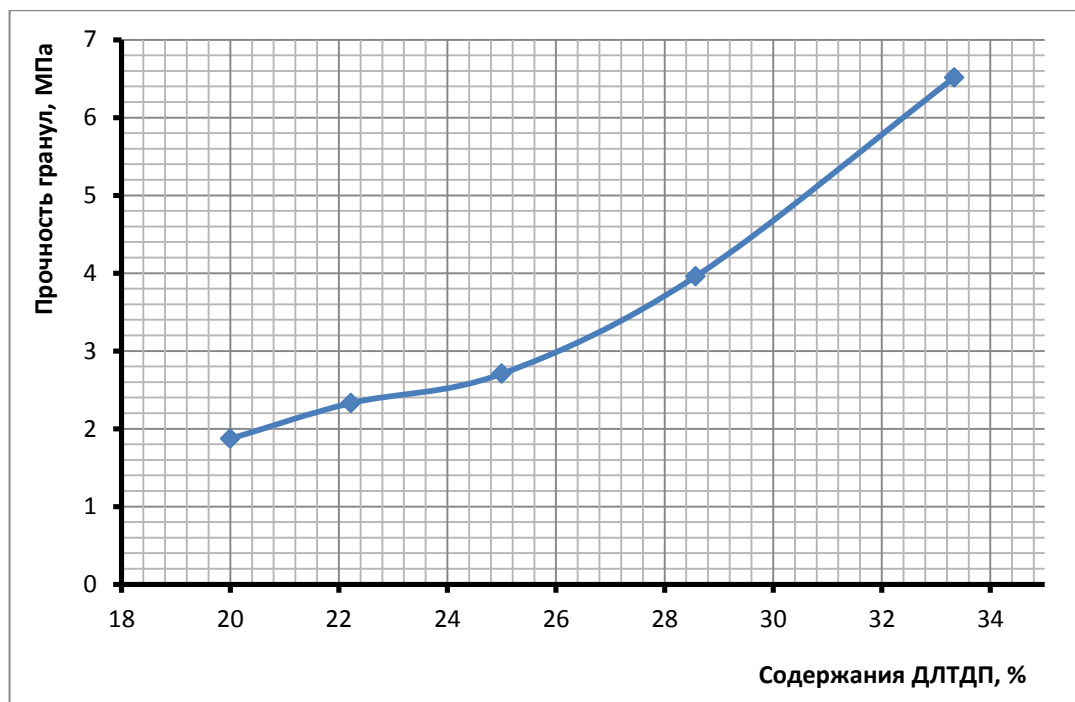


Рисунок 4.3. Зависимость прочности гранул от содержания ДЛТДП

Из графика видно, что прочность гранул повышается с увеличением концентрации ДЛТДП в грануле. Так, при 20 % содержании ДЛТДП в грануле прочность на раздавливание составляет 1,87 МПа, а при 33 % содержании связующей жидкости прочность гранул увеличивается в 3,3 раза и составляет 6,52 МПа. Как показали результаты, полученные гранулы являются достаточно прочными для дальнейшей их эксплуатации: транспортировке, дозирования и пр. Поэтому увеличение содержания связующей жидкости в гранулах нецелесообразно, т. к. приводит к увеличению расхода ДЛТДП.

Таблица 4.4 – Прочность гранул на раздавливание



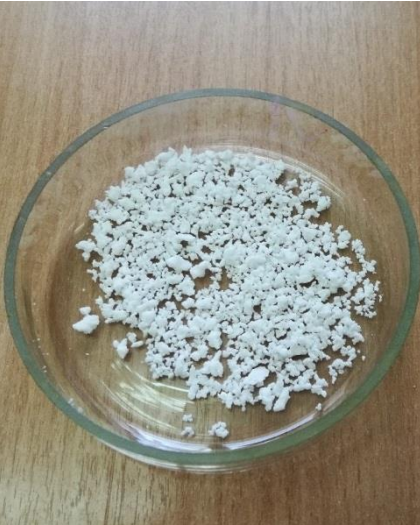

Массовое соотношение ПП/ДЛТДП	№ образца	d1, мм	d2, мм	d ср, мм	S, мм <sup>2</sup>	S, м <sup>2</sup>	Нагрузка, г	Нагрузка, Н	Прочность, МПа	Средняя прочность, МПа
2 //1	1	4	3,5	3,75	11,04	1,1E-05	705	6,909	6,26	6,51
	2	3,2	3,6	3,4	9,07	9,07E-06	510	4,998	5,51	
	3	2,1	3	2,55	5,10	5,1E-06	405	3,969	7,77	
2,5//1	1	5,9	3	4,45	15,54	1,55E-05	520	5,096	3,28	3,96
	2	3,1	6,1	4,6	16,61	1,66E-05	650	6,37	3,83	
	3	3,2	4,8	4	12,56	1,26E-05	610	5,978	4,76	
3//1	1	5,2	3,4	4,3	14,51	1,45E-05	520	5,096	3,51	2,71
	2	7,1	4,3	5,7	25,50	2,55E-05	550	5,39	2,11	
	3	5,9	4,3	5,1	20,42	2,04E-05	520	5,096	2,50	
3,5//1	1	3,1	5,1	4,1	13,20	1,32E-05	410	4,018	3,04	2,33
	2	3,9	3,5	3,7	10,75	1,07E-05	290	2,842	2,64	
	3	4,1	5,7	4,9	18,85	1,88E-05	250	2,45	1,30	
4//1	1	4	3,8	3,9	11,94	1,19E-05	220	2,156	1,81	1,87
	2	5,1	5,3	5,2	21,23	2,12E-05	430	4,214	1,99	
	3	3,2	5,4	4,3	14,51	1,45E-05	270	2,646	1,82	



Образцы гранул, полученных при различных режимах, представлены на фотографиях 1-8.

### **Выводы**

1. Подобран оптимальный режим гранулирования порошкообразных отходов полипропилена методом ГЖС: температура дисперсионной среды 50–60 °С, скорость вращения мешалки – 150 об/мин, время гранулирования – 7 мин.
2. Осуществлен выбор связующей жидкости – порошок дилаурилтиодипропионата, имеющий температуру плавления 42 °С.
3. Массовое соотношение дисперсионная среда : осадок : связующая жидкость – вода:ПП:ДЛТДП –составляет 150–250 : 1 : 2–4.
4. Определена прочность гранул на раздавливание в статических условиях, составляющая 1,87–6,51 МПа.

			
Фотография 1. Соотношение ПП/ДЛДТП: 2,5/1	Фотография 2. Соотношение ПП/ДЛДТП: 2/1	Фотография 3. Соотношение ПП/ДЛДТП: 2/2	Фотография 4. Соотношение ПП/ДЛДТП: 3,5/1



Фотография 5.  
Соотношение  
ПП/ДЛДТП: 3/1 V=150  
мл



Фотография 6.  
Соотношение  
ПП/ДЛДТП: 3/1



Фотография 7.  
Соотношение  
ПП/ДЛДТП: 4/1



Фотография 8.  
Соотношение  
ПП/ДЛДТП: 6/2

## 5. Ресурсоэффективность и финансовый менеджмент

### 5.1 Обоснование необходимых инвестиций для внедрения инженерных решений

В этом разделе определяем сумму инвестиций для осуществления проекта модернизации узла термостатирования. В первую очередь определяем потребность в основных фондах исходя из стоимости оборудования, измерительных и регулирующих приборов и других основных фондов, а также их количества (табл. 5.6). Расчёт ведётся согласно указаниям методического пособия [41].

Таблица 5.1 - Объекты и направления инвестиций

Основные фонды	Кол-во единиц	Общая стоимость, тыс. руб	Примечание
1. Здания, сооружения производственного назначения	-	-	Оборудование устанавливается на место имеющегося оборудования
2. Передаточные устройства	6	60	Подвод и отвод оборотной воды, деминерализованной воды, пара и конденсата.
3. Машины и оборудование:			-
3.1. Силовые машины	-	-	Не требуются
3.2. Рабочие машины и оборудование	1	1500	Кожухотрубчатый теплообменник
3.3. Измерительные и регулирующие приборы	6	500	Модернизация обвязки оборудования
3.4. Прочие	-	100	-
4. Транспортные средства	-	-	Не требуются
5. Инструмент со сроком службы более 1 года	4	20	Для обслуживания оборудования
6. Производственный инвентарь и принадлежности	4	10	Для обслуживания оборудования
7. Хозяйственный инвентарь	4	50	Для обслуживания оборудования
8. Прочие	-	10	
<b>Итого</b>	<b>2100</b>		

Также необходимо учесть затраты на монтаж и установку оборудования (табл. 5.7). Затраты рассчитывается в зависимости от стоимости модернизируемого оборудования, а именно от цены кожухотрубчатого теплообменника.

Таблица 5. 2 - Расходы на наладку и монтаж оборудования

Наименование нормативов	% от стоимости оборудования	Стоимость монтажа и установки
1. На устройство фундаментов	10	150
2. На технологические трубопроводы	20	300
3. На антикоррозионные работы	5	75
4. На кабельные разводки	5	75
5. На КИПиА	10	150
6. На монтаж оборудования	22	330
8. На вспомогательное оборудование	5	75
<b>Итого</b>		<b>1155</b>

Определение затрат на сырье, материалы и энергию производим исходя из принятого объема производства, удельных норм расхода сырья и материалов и планово-заготовительных цен (табл. 5.3 и 5.4).

Таблица 5.5 - Расчёт годовой потребности в сырье и материалах

Наименование сырья	Цена за 1 тонну, тыс. руб	Расход на 1 тонну готовой продукции, т	Стоимость на 1 тонну продукта, тыс. руб
1. Пропилен	41	1,41	57,81
2. Этилен	65	0,0425	2,7625
3. Водород	665	0,000009991	0,006644
4. Нефрас	85	0,05	4,25
5. Катализатор	12500	0,00016	2
6. Раствор ТЭА	504	0,0134	6,7536
7. Донор	330	0,0031	1,023
<b>Итого</b>			<b>74,60574</b>

Таблица 5.3 - Расчет потребности в электроэнергии

Наименование оборудования	Мощность, кВт	Суммарно-потребляемая электроэнергия, кВт*ч	Энергопотребление на 1 тонну продукта, кВт*ч	Стоимость на 1 тонну продукта, руб.
1. Мешалка реактора полимеризации	28,5	232560	10,57090909	34,35545
2. Насосы термостатирования	15,2	124032	5,637818182	18,32291
3. Освещение	5	40800	1,854545455	6,027273
4. Прочие расходы	1	8160	0,370909091	1,205455
<b>Итого</b>	<b>49,7</b>	<b>405552</b>	<b>18,43418182</b>	<b>59,91109</b>

Одноставочный тариф на электроэнергию в Томске 3.25 руб за 1 кВт.ч  
 Эффективный фонд времени оборудования, ч : 8160  
 Планируемая мощность реактора, т/год: 22000

Таблица 5.4 - Потребность в оборотных средствах

Наименование оборотных средств	Затраты на производство 1 тонны продукта, тыс. руб	Объем выпуска продукции в год, тонн	Рыночная стоимость 1 тонны готового продукта на рынке, тыс. руб	Кол-во оборотных средств на весь годовой выпуск, тыс. руб.	Затраты на оборотные средства, тыс. руб.
Сырье	88,14324	22000	105	2310000	1642644,32
Энергия	0,05991109				

Итоговые данные внесём в обобщённую таблицу и посчитаем общую сумму необходимых инвестиций (табл. 5. 6).

Таблица 5.5- Объекты и направления инвестиций

Наименование объекта	Кол-во	Цена за единицу	Общая стоимость	Подробно
1. Строительство (аренда) производственных помещений, м <sup>2</sup>	-	-	-	Прим.1,2
2. Приобретение оборудования и других основных фондов	1	2100	2100	Табл.1
3. Расходы на монтаж и наладку оборудования	1	1155	1155	Табл.2
4. Расходы на оборотные средства	Взять на 2 месяца	-	273774,1	табл.5
5. Организационные расходы	-	-	147	7% от стр.2
<b>Всего инвестиций, тыс. руб.</b>			<b>277176,1</b>	

## 5.2 Расчет затрат на производство продукции

### 5.2.1 Расчёт себестоимости продукции до модернизации

Рассчитаем себестоимость продукции и определим точку безубыточности до модернизации. Производительность в год 16000 т.

Таблица 5.6 - Калькуляция себестоимости при Q=16000 т.

Наименование затрат	Ед. изм.	Цена, тыс. руб.	Расход		Затраты	
			на 1 т	на Q	на 1 т	на Q
<b>Переменные издержки</b>	тыс.р.	-	-	-	<b>74,70379527</b>	<b>1195260,724</b>
<b>1. Сырье:</b>						
1.1. Пропилен	тыс.р.	41	1,41	22560	57,81	924960
1.2. Этилен	тыс.р.	65	0,0425	680	2,7625	44200
1.3. Водород	тыс.р.	665	0,00000999	0,159856	0,006644015	106,30424
1.4. Нефрас	тыс.р.	85	0,05	800	4,25	68000
1.5. Катализатор	тыс.р.	12500	0,00016	2,56	2	32000
1.6. Раствор ТЭА	тыс.р.	504	0,0134	214,4	6,7536	108057,6
1.7. Донор	тыс.р.	330	0,0031	49,6	1,023	16368
<b>2. Энергия всех видов:</b>						
2.1. Э/энергия	тыс.р.	0,00325	14,785	236560	0,04805125	768,82
2.2. Вода обратная	тыс.р.	0,01	5	80000	0,05	800
<b>Постоянные издержки</b>					<b>16,99375</b>	<b>271900</b>
<b>3. ЗП основных рабочих</b>	тыс.р.	35	44	-	1,155	18480
3.1. Отчисления на соц. нужды основных раб.	тыс.р.	30% ЗП	-	-	0,3465	5544
<b>4. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования (РСЭО)</b>	тыс.р.	-	-	-	1	16000
4.1. Амортизация активной части основных фондов (АЧОФ)	тыс.р.	-	-	-	1,5	24000
4.2. Затраты на ремонт АЧОФ	тыс.р.	-	-	-	0,5	8000

4.3. Заработная плата вспомогательных рабочих	тыс.р.	25	10	-		0,1875	3000
4.4. Отчисления на социальные нужды	тыс.р.	30% ЗП	-	-		0,05625	900
5. Цеховые расходы	тыс.р.	-	-	-		3	48000
5.1. Амортизация пассивной части основных фондов (ПЧОФ) или арендная плата	тыс.р.	-	-	-		1,5	24000
5.2. Заработная плата ИТР, служащих, МОП	тыс.р.	50	10	-		0,375	6000
5.3. Отчисления на социальные нужды	тыс.р.	30% ЗП	-	-		0,1125	1800
5.4. Охрана труда и техника безопасности	тыс.р.	15% ЗП всех	-	-		0,257625	4122
5.5. Вода на бытовые и хозяйственные нужды	тыс.р.	0,01	0,1	1600		0,001	16
5.6. Отопление помещений	тыс.р.	0,05	0,015	240		0,00075	12
5.7. Освещение помещений	тыс.р.	0,003 25	0,5	8000		0,001625	26
<b>6. Цеховая себестоимость</b>	тыс.р.					<b>84,69754527</b>	<b>1355160,724</b>
7. Общезаводские (общепроизводственные)	тыс.р.	3 % Ц.С.	-	-		2,750926358	44014,82173
8. Коммерческие расходы	тыс.р.	1% Ц.С.	-	-		0,846975453	13551,60724
8.1. Реклама	тыс.р.	0,5% Ц.С.	-	-		0,423487726	6775,803621
8.2. Сбыт продукции	тыс.р.	0,05 % Ц.С.	-	-		0,002117439	33,87901811
8.3. Налоги в дорожные фонды	тыс.р.	2,5 % Ц.С.	-	-		2,117438632	33879,01811
9. Прочие расходы	тыс.р.	0,1% Ц.С.	-	-		0,002117439	33,87901811
<b>Полная себестоимость, в т.ч.</b>	тыс.р.					<b>90,63060831</b>	<b>1450089,733</b>



<b>Условно-переменные затраты</b>	тыс.р.		<b>74,70379527</b>	<b>1195260,724</b>
<b>Условно-постоянные затраты</b>	тыс.р.		<b>9,99375</b>	<b>159900</b>

Определим цену единицы готовой продукции, а также найдём точку безубыточности.

Цена единицы готовой продукции:

$$Ц_0 = C_0 * \left(1 + \frac{P}{100}\right), \text{ где } P=25\%, C_0 = \text{Полн. себ.} * Q$$

Точка безубыточности:

1. Аналитический способ.

$$Q_{кр} = \frac{U_{пост. Q}}{Ц_0 - U_{пер. г. п. Q}}$$

$$Впр = Ц_0 * Q$$

Таблица 5. 7 - Точка безубыточности

<b>Выпуск продукции, т./год</b>	<b>Q</b>	<b>16000</b>
Постоянные издержки на весь объём реализуемой продукции, тыс.р.	U <sub>пост. Q</sub>	159900
Удельные переменные издержки , тыс.р	U <sub>пер.г.п.</sub>	74,70379 527
Цена единицы готовой продукции, тыс.р.	Ц <sub>0</sub>	113,289
Точка безубыточности, тонн	Q <sub>кр</sub>	5006,155
Стоимость готовой продукции, тыс.р.	Впр	1812612

## 2. Графический способ.

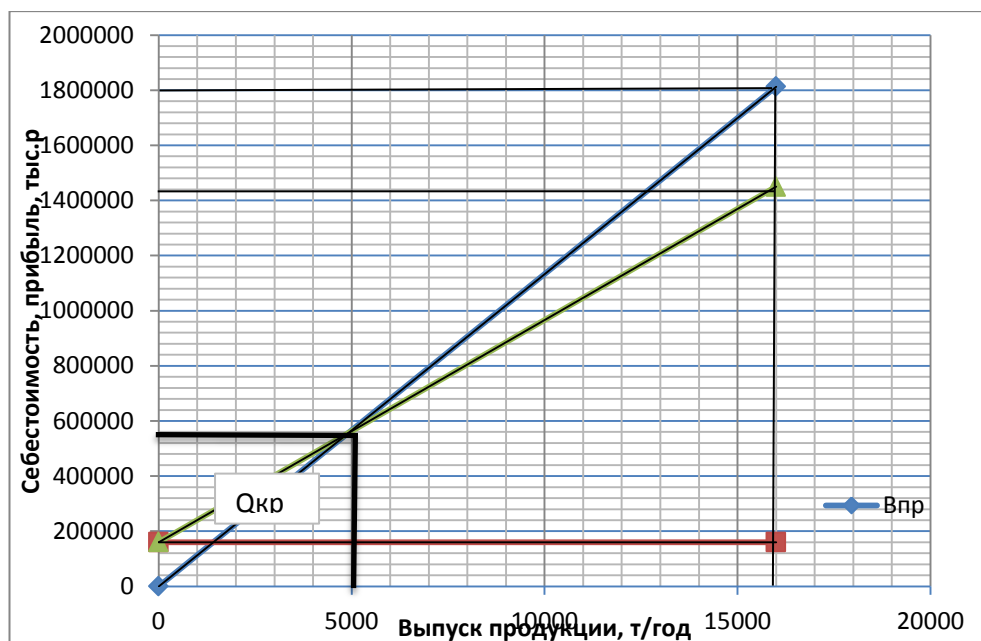


Рисунок 5.1. Зависимость себестоимости и прибыли от выпуска продукции.

### 5.2.2 Расчёт себестоимости продукции после модернизации

Рассчитаем себестоимость продукции и определим точку безубыточности после проведения модернизации. Производительность в год 22000 т.

Таблица 5.8. Калькуляция себестоимости при  $Q=22000$  т.

Наименование затрат	Ед. изм.	Цена, тыс. руб.	Расход		Затраты	
			на 1 т	на Q	на 1 т	на Q
<b>Переменные издержки</b>	тыс.р.	-	-	-	<b>74,70379527</b>	<b>1643483,496</b>
<b>1. Сырье:</b>						
1.1. Пропилен	тыс.р.	41	1,41	31020	57,81	1271820
1.2. Этилен	тыс.р.	65	0,0425	935	2,7625	60775
1.3. Водород	тыс.р.	665	0,000009991	0,219802	0,006644015	146,16833
1.4. Нефрас	тыс.р.	85	0,05	1100	4,25	93500
1.5. Катализатор	тыс.р.	12500	0,00016	3,52	2	44000
1.6. Раствор ТЭА	тыс.р.	504	0,0134	294,8	6,7536	148579,2
1.7. Донор	тыс.р.	330	0,0031	68,2	1,023	22506
<b>2. Энергия всех видов:</b>						
2.1. Э/энергия	тыс.р.	0,00325	14,785	325270	0,04805125	1057,1275
2.2. Вода оборотная	тыс.р.	0,01	5	110000	0,05	1100

<b>Постоянные издержки</b>					<b>9,99375</b>	<b>204900</b>
3. ЗП основных рабочих	тыс.р.	35	44	-	1,155	18480
3.1.Отчисления на соц. нужды основных раб.	тыс.р.	30% ЗП	-	-	0,3465	5544
4. Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования (РСЭО)	тыс.р.	-	-	-	1	22000
4.1. Амортизация активной части основных фондов (АЧОФ)	тыс.р.	-	-	-	1,5	33000
4.2. Затраты на ремонт АЧОФ	тыс.р.	-	-	-	0,5	11000
4.3. Заработная плата вспомогательных рабочих	тыс.р.	25	10	-	0,1875	3000
4.4. Отчисления на социальные нужды	тыс.р.	30% ЗП	-	-	0,05625	900
5. Цеховые расходы	тыс.р.	-	-	-	3	66000
5.1. Амортизация пассивной части основных фондов (ПЧОФ) или арендная плата	тыс.р.	-	-	-	1,5	33000
5.2. Заработная плата ИТР, служащих, МОП	тыс.р.	50	10	-	0,375	6000
5.3. Отчисления на социальные нужды	тыс.р.	30% ЗП	-	-	0,1125	1800
5.4. Охрана труда и техника безопасности	тыс.р.	15% ЗП всех	-	-	0,257625	4122
5.5. Вода на бытовые и хозяйственные нужды	тыс.р.	0,01	0,1	1600	0,001	16
5.6. Отопление помещений	тыс.р.	0,05	0,015	240	0,00075	12
5.7. Освещение помещений	тыс.р.	0,003 25	0,5	8000	0,001625	26
<b>6. Цеховая себестоимость</b>	тыс.р.				<b>84,69754527</b>	<b>1848383,496</b>

7. Общезаводские (общепроизводственные)	тыс.р.	3 % Ц.С.	-	-	2,540926358	55451,50487
8. Коммерческие расходы	тыс.р.	1% Ц.С.	-	-	0,846975453	18483,83496
8.1. Реклама	тыс.р.	0,5% Ц.С.	-	-	0,423487726	9241,917479
8.2. Сбыт продукции	тыс.р.	0,05 % Ц.С.	-	-	0,002117439	46,2095874
8.3. Налоги в дорожные фонды	тыс.р.	2.5 % Ц.С.	-	-	2,117438632	46209,5874
9. Прочие расходы	тыс.р.	0,1% Ц.С.	-	-	0,002117439	46,2095874
<b>Полная себестоимость, в т.ч.</b>	тыс.р.				<b>90,63060831</b>	<b>1977862,76</b>
<b>Условно-переменные затраты</b>	тыс.р.				<b>74,70379527</b>	<b>1643483,496</b>
<b>Условно-постоянные затраты</b>	тыс.р.				<b>9,99375</b>	<b>204900</b>

Определим цену единицы готовой продукции, а также найдём точку безубыточности.

Цена единицы готовой продукции:

$$Ц_0 = C_0 * \left(1 + \frac{P}{100}\right), \text{ где } P=25\%, C_0 = \text{Полн. себ.} * Q$$

Точка безубыточности:

1. Аналитический способ.

$$Q_{кр} = \frac{U_{пост. Q}}{Ц_0 - U_{пер. г. п. Q}}$$

$$В_{пр} = Ц_0 * Q$$

Таблица 5.9 - Точка безубыточности.

<b>Выпуск продукции, т./год</b>	<b>Q</b>	<b>22000</b>
Постоянные издержки на весь объём реализуемой продукции, тыс.р.	U <sub>пост. Q</sub>	204900
Удельные переменные издержки, тыс.р	U <sub>пер.г.п.</sub>	74,715
Цена единицы готовой продукции, тыс.р.	Ц <sub>0</sub>	113,288

Точка безубыточности, тонн	Qкр	5310,427
Стоимость готовой продукции, тыс.р.	Впр	2492342

## 2. Графический способ.

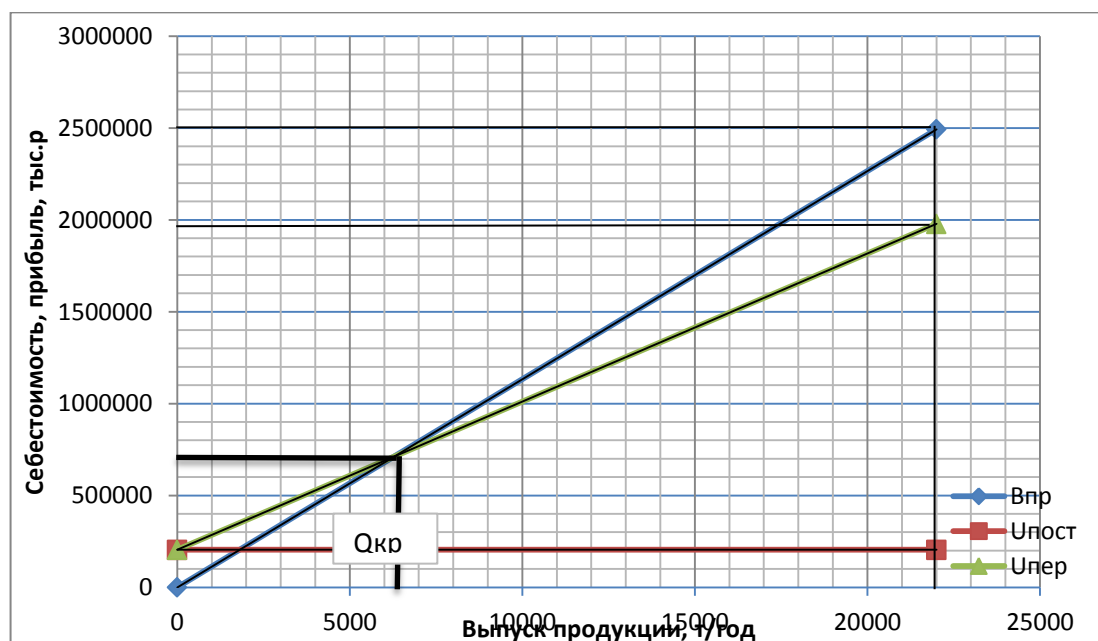


Рисунок 5.2. Зависимость себестоимости и прибыли от выпуска продукции.

## 5.3 Расчет экономической эффективности инвестиционных показателей в случае внедрения инновационного проекта

### 5.3.1 Расчет чистого денежного потока

Таблица 5.10 - Расчет чистого денежного потока.

Наименование показателя	Ед. измерения	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
1. Объем продаж	тыс. т.	22000	22000	22000	22000	22000
2. Цена 1 тонны	тыс.руб.	113,288	113,288	113,288	113,288	113,288
3. Выручка от продаж	тыс.руб.	2492336	2492336	2492336	2492336	2492336
4. Суммарные издержки	тыс.руб.	1848383,49	1848383	1848383	1848383	1848383
5. Норма амортизации	%	12	12	12	12	12
6. Остаток по кредиту	тыс.руб.	277176,1	221740,9	166305,7	110870,4	55435,22
7. Процент за кредит	тыс.руб.	41576,415	33261,13	24945,85	16630,57	8315,283
8. Прибыль до вычета налогов	тыс.руб.	602376,089	610691,4	619006,7	627321,9	635637,2
9. Налог на прибыль	тыс.руб.	120475,217	122138,3	123801,3	125464,4	127127,4
10. Выплата кредита	тыс.руб.	55435,22	55435,22	55435,22	55435,22	55435,22
11. Чистая прибыль	тыс.руб.	481900,871	488553,1	495205,3	501857,6	508509,8
12. Чистая прибыль без	тыс.руб.	426465,651	433117,9	439770,1	446422,3	453074,6

кредита						
13. Амортизация	тыс.руб.	81261,132	81261,13	81261,13	81261,13	81261,13
14. Чистый денежный поток от операц. деят-ти	тыс.руб.	507726,783	514379	521031,2	527683,5	534335,7

### 5.3.2 Расчет чистого дисконтированного дохода, индекса доходности, внутренней ставки доходности и срока окупаемости проекта

Условием эффективности инвестиционного проекта по Чистому Дисконтированному Доходу (**NPV**) является выполнение следующего неравенства: ЧДД > 0.

Чем больше ЧДД, тем больше влияние инвестиционного проекта на экономический потенциал предприятия, реализующего данный проект, и на экономическую ценность этого предприятия.

Если инвестиции носят разовый характер, то ЧДД определяется по формуле:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_{опт} - I_0}{(1+i)^t}$$

Где **ЧДП<sub>опт</sub>** – чистые денежные поступления от операционной деятельности;

**I<sub>0</sub>** – разовые инвестиции, осуществляемые в нулевом году;

**t** – номер шага расчета (t = 0, 1, 2...n);

**n** – горизонт расчета;

**i** – ставка дисконтирования (желаемый уровень доходности инвестируемых средств).

Индекс Доходности (**PI**) показывает, сколько приходится дисконтированных денежных поступлений на рубль инвестиций. Расчет этого показателя осуществляется по формуле:

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{ЧДП_t}{I_0}$$

Условием эффективности инвестиционного проекта по данному показателю является выполнение **PI > 1**.

Таблица 5.61 - Расчёт ЧДД и ИД

Показатель	Ед. Изм.	1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
Чистый денежный поток от операц. деятельности	Тыс. руб.	507726,8	514379	521031,2	527683,5	534335,7
Инвестиции	Тыс. руб.	277176,1	0	0	0	0
ЧДД(t)	-	184393,71	425106,6	391458,5	360414,9	331780,4
ЧДД	-	1693154,13				
Индекс Доходности	-	1,665258307				
К расчету коэффициента дисконтирования						

i	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
1/(1+i)^t / Коэфф. Дисконтирования	-	0,909091	0,8264463	0,751315	0,683013	0,620921

Значение ставки, при которой обращается в нуль, носит название «внутренней ставки доходности». Формальное определение «внутренней ставки доходности» заключается в том, что это та ставка дисконтирования, при которой суммы дисконтированных притоков де нежных средств равны сумме дисконтированных оттоков или ЧДД = 0.

По разности между IRR и ставкой дисконтирования  $i$  можно судить о запасе экономической прочности инвестиционного проекта. Чем ближе IRR к ставке дисконтирования  $i$ , тем больше риск от инвестирования в данный проект. Для определения внутренней нормы доходности (IRR) необходимо рассчитать ЧДД при различных ставках дисконтирования  $n$  и построить график с осями координат:

X – ставка дисконта ( $n=0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9$ );

Y – ЧДД при соответствующей  $n$ .

Если ВНД > нормы дохода на вкладываемый капитал, то проект целесообразен.

Таблица 5.12 - Расчёт нормы доходности ВНД

Годы	1	2	3	4	5	ЧДД
ЧДД при $i=0.1$	184393,7	425106,6195	391458,5	360414,9	331780,4	<b>1693154</b>
ЧДД при $i=0.3$	23253,95	386460,5632	355871,3	327649,9	534335,7	<b>1627571</b>
ЧДД при $i=0.5$	61308,42	228612,8932	154379,6	104233,8	70365,19	<b>618899,9</b>
ЧДД при $i=0.7$	21486,71	177985,8165	106051,5	63179,73	37633,06	<b>406336,9</b>
ЧДД при $i=0.9$	-9951,48	142487,2603	75963,15	40491,05	21579,74	<b>270569,7</b>

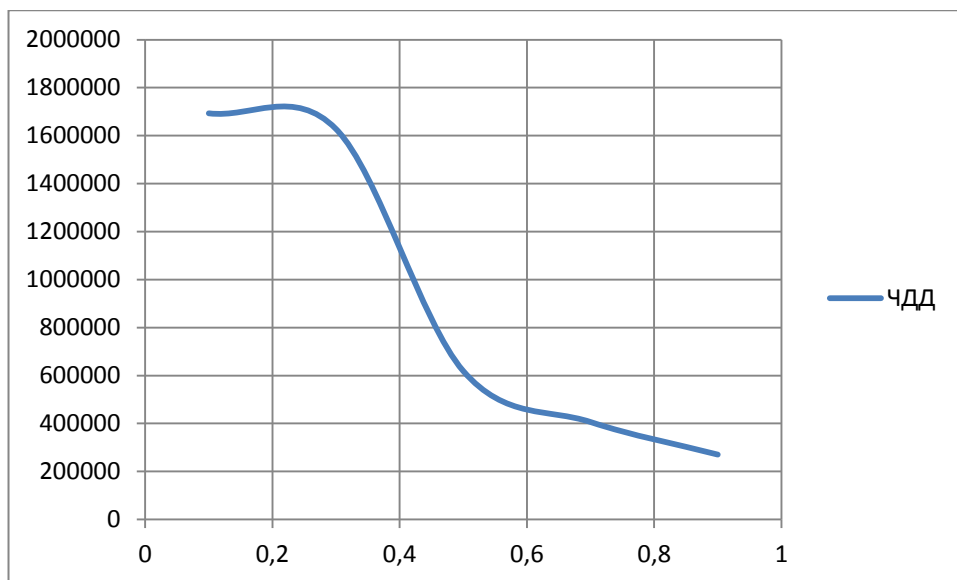


Рисунок 5.3. Графический метод определения ВНД.

Таблица 5.13 - Определение срока окупаемости проекта.

Месяц	0	1	2	3	4	5	6
<b>Баланс окупаемости с кредитом</b>	0	-58547,5	-20083,3	18380,81	56844,96	95309,11	133773,3
<b>Баланс окупаемости с разовой инвестицией</b>	0	-238712	-200247,2	-161784	-123319	-84855,3	-46391,2
Месяц	7	8	9	10	11	12	-
<b>Баланс окупаемости с кредитом</b>	172237,4	210701,6	249165,7	287629,9	326094	364558,2	-
<b>Баланс окупаемости с разовой инвестицией</b>	-7927,05	30537,1	69001,25	107465,4	145929,6	184393,7	-



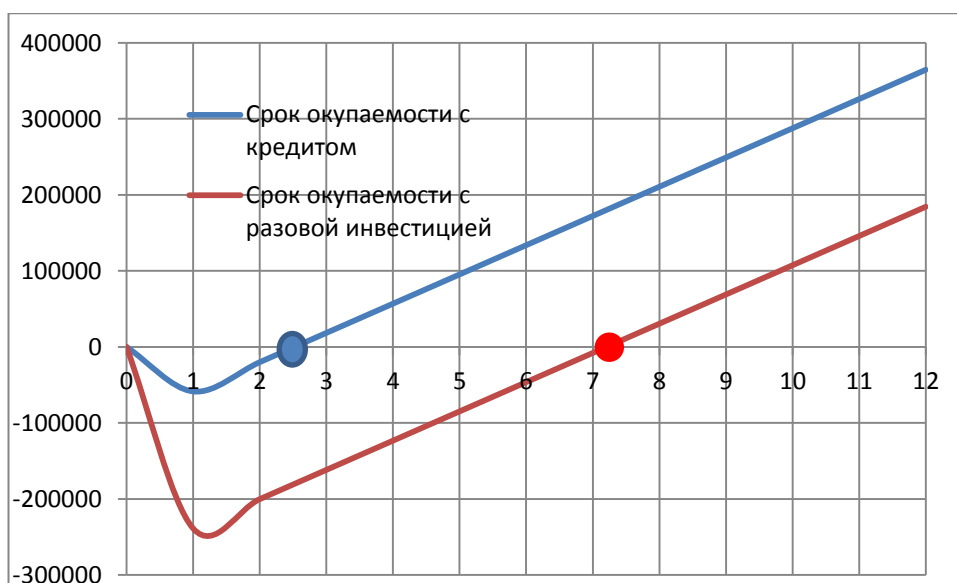


Рисунок 5.4 - Определение срока окупаемости проекта.

При необходимости брать кредит для инвестирования в проект срок окупаемости составляет: 2,5 месяца каждый год.

При привлечений средств из собственных ресурсов для инвестирования в проект срок окупаемости составляет: 7,2 месяца.

### 5.3.3 - Определение технико-экономических показателей

Таблица 5.147. Технико-экономические показатели

Наименование показателя	Ед. измерения	До модернизации	После модернизации	Изменение абс.	Изменение %
1. Объем производства	тонн	16000	22000	6000	37,5
2. Обём продаж	тонн	16000	22000	6000	37,5
3. Цена 1 тонны	тыс. руб.	113,289	113,288	-0,001	-0,0008827
4. Выручка от продажи	тыс. руб.	1812624	2492336	679712	37,49878629
5. Суммарные издержки	тыс. руб.	1355160,724	1848383,496	493222,772	36,39588746
5.1. Переменные издержки	тыс. руб.	1195260,724	1643483,496	448222,772	37,50000004
5.2. Постоянные издержки	тыс. руб.	159900	204900	45000	28,14258912
6. Операционная прибыль	тыс. руб.	457463,276	643952,504	186489,228	40,76594511
7. Налог на прибыль	тыс. руб.	91492,6552	128790,5008	37297,8456	40,76594511
8. Чистая прибыль	тыс. руб.	365970,6208	515162,0032	149191,3824	40,76594511
9. Себестоимость 1 тонны	тыс. руб.	90,63060831	90,63060831	0	0

10. Стоимость основных средств	тыс. руб.	4000000	4277176	277176	6,9294
11. Численность осн. Рабочих	чел.	44	44	0	0
12. Фондовооруженность	тыс. руб./чел.	0,453156	0,582705972	6299,454545	6,9294
13. Фондоотдача	руб./руб.	90909,09091	97208,54545	0,129549972	28,58838289
14. Фондоёмкость	руб./руб.	2,20674558	1,716131372	- 0,490614208	- 22,23247718
15. Производительность труда	тыс. руб./чел.	30799,10736	42008,71582	11209,60845	36,39588746
16. Рентабельность производства	%	27,00569861	27,87094801	0,865249401	3,203951185
17. Рентабельность продаж	%	20,19010125	20,66984561	0,479744361	2,376136481
18. Критический объём продаж	тонн	5006,155	5310,427	304,272	6,077958034
19. Критический объём продаж	тыс. руб.	567142,2938	601607,654	34465,36018	6,077021685

## **6. Социальная ответственность**

### **6.1 Производственная безопасность**

Производственная безопасность представляет собой систему организационных мероприятий и технических средств, уменьшающих вероятность воздействия на персонал опасных производственных факторов, вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режимов труда до приемлемого уровня.

Узел полимеризации пропилена предназначен для наработки порошка полипропилена (гомополимера и сополимеров пропилена с этиленом). Реакция полимеризации пропилена ведется непрерывно в реакторах в среде растворителя - нефраса. В качестве регулятора молекулярной массы используется водород. Катализатором реакции служит каталитический комплекс, состоящий из титаномагниевого катализатора, триэтилалюминия и донора (используемого в качестве стерео-регулятора). В ходе химической реакции выделяется большое количество тепла, которое отводится за счёт узла термостатирования реактора. [27]

Для анализа вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований необходимо выявить вредные и опасные производственные факторы. Выбор факторов производится с использованием ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». [28]

Выявленные факторы перечислены в таблице 6.1.

Таблица 6.8 - Вредные и опасные факторы

Источник фактора	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	вредные	опасные	
<p>1. Реактор полимеризации и его обвязка.                  2. Теплообменник узла термостатирования.                  3. Мешалка реактора полимеризации.                  4. Насосы узла термостатирования.                  5. Освещение рабочей зоны.</p>	<p>1. Повышенный уровень вибрации;                  2. Повышенная температура воздуха рабочей зоны;                  3. Повышенный уровень шума;                  4. Вещества, оказывающие токсическое и раздражающие влияние на человека.</p>	<p>1. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;                  2. Подвижные части производственного оборудования;                  3. Повышенная температура поверхности оборудования.</p>	<p>1. ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.                  2. ГОСТ 12.1.012–90 ССБТ. Вибрационная болезнь. Общие требования.                  3. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.                  4. ГОСТ 12.1.003–83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.                  5. ГОСТ 12.2.007.0-75 Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические. Общие требования безопасности                  6. СанПиН 2.2.4.1191-03 устанавливает требования к электромагнитным полям;                  7. ГОСТ 12.1.007-76 устанавливает требования безопасности вредных веществ.</p>

## 6.2 Анализ вредных выявленных факторов при эксплуатации проектируемого оборудования

Производственное оборудование должно обеспечивать безопасность работающих при монтаже (демонтаже), вводе в эксплуатацию и эксплуатации как в случае автономного использования, так и в составе технологических комплексов при соблюдении требований (условий, правил), предусмотренных эксплуатационной документацией. [29]

### 6.2.1 Опасность поражения дыхательных путей и кожных покровов химическими реагентами

В технологическом процессе производства полипропилена применяются следующие вещества: пропилен, этилен, нефрас, водород, триэтилалюминий, титаномагниевого катализатор, донор. В таблице 6.2 отражены ПДК и класс опасности веществ, участвующих в технологическом процессе.

Таблица 6.29 - Таблица веществ

Наименование сырья, реагентов, продукции	Класс опасности	ПДК рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Формула
Пропилен	4	100	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>
Этилен	4	100	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Водород	2	-	H <sub>2</sub>
Нефрас (Гептан)	4	300	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>
ТЭА	4,2	0,7 (по Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> Al
циклогексилметилдиметоксисилан (донор)	2	1	Si(OCH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (NR <sup>1</sup> R <sup>2</sup> )

Пропилен, этилен, водород, нефрас оказывают вредное воздействие на организм человека при превышении ПДК в воздухе рабочей зоны.

В качестве катализатора используется комплексная металлоорганическая система ТМК + ТЭА + донор. [27]

Раствор триэтилалюминия является токсичной, пожароопасной, пирофорной жидкостью. При контакте с воздухом, при разливе раствора ТЭА, может произойти самовоспламенение, вследствие его экзотермического окисления. При взаимодействии раствора ТЭА с водой происходит бурная экзотермическая реакция, возможно воспламенение. В результате реакции образуются такие вредные вещества как этан, этилен, аэрозоль оксида алюминия. [27]

Титаномагниевого катализатора при контакте с влагой выделяет пары соляной кислоты. [27]

Пары соляной кислоты вызывают ожоги кожных покровов, раздражают слизистые оболочки глаз и дыхательных путей, вызывают поражения легких.

Донор (циклогексилметилдиметоксисилан, Catylen D300, D400) относится к горючим жидкостям и имеет 3 класс опасности. При гидролизе образуется метанол. [27]

### **6.2.2 Производственный шум и вибрация**

Основными источниками шума в проектируемом цеху являются электродвигатели механических перемешивающих устройств, вентиляционная система, кондиционеры, осветительные приборы.

Воздействие производственной вибрации на человека вызывает изменения как физиологического, так и функционального состояния организма человека. Изменения в функциональном состоянии организма проявляются в повышении утомляемости, увеличении времени двигательной и зрительной реакции, нарушении вестибулярных реакций и координации движений. Все это ведет к снижению производительности труда. Изменения в физиологическом состоянии организма — в развитии нервных заболеваний, нарушении функций сердечно-сосудистой системы, нарушении функций опорно-двигательного аппарата, поражении мышечных тканей и суставов,

нарушении функций органов внутренней секреции. Все это приводит к возникновению вибрационной болезни.

Согласно ГОСТ 12.1.003–2014 уровень звукового давления в данном производственном помещении не должен превышать 80 дБ, а ожидаемый уровень шума от вентиляционной системы здания не должны превышать допустимое значение звукового давления равному 85 дБ. [30]

Производственная вибрация может быть местной и общей. Местную вибрацию создают ручные машины ударного, ударно-вращательного действия. К источникам технологической вибрации в цехе относятся: электрические машины, оборудование, установки, насосы, вентиляторы и другие технологические агрегаты. Допустимые значения технологической вибрации рабочих мест составляют: виброскорость – 92 дБ; виброускорение – 58 дБ. [30]

### **6.2.3 Производственное освещение**

Одним из обязательных условий безаварийной работы на химических предприятиях является непрерывное наблюдение за показаниями контрольно- измерительных приборов, за механизмами и аппаратурой, трубопроводами, что неосуществимо без правильного освещения.

Недостаточная или неправильная освещённость территории, дорог, установок, подходов к аппаратам и лестничным пролётам может привести к падениям работающих и к несчастным случаям. Естественное освещение создаётся в производственных помещениях через оконные и другие остеклённые проёмы. Искусственное освещение создаётся светильниками и может быть: общее, предназначенное для освещения всего рабочего помещения, местное, освещающее только рабочее место, и комбинированное, состоящее из общего и местного освещения.

В таблице 3 представлены нормы освещенности и класс зрительных работ для разных видов помещений цеха.

Таблица 6.6 - Нормы освещенности и класс зрительных работ для разных видов помещений цеха

Вид производственных помещений	Класс зрительных работ	Нормы освещенности, лк
Производственные помещения для постоянной работы на установках	Средней точности	Не менее 300
Склады и кладовые помещения	Очень малой точности	Не менее 100
Гардероб, умывальные и ваннные комнаты, туалеты	Малой точности	Не менее 200
Операторские и помещения для точных измерений	Высокой точности	Не менее 500

В производственных помещениях химических заводов включается аварийное освещение на тот случай, если внезапно прекратится действие основного рабочего освещения. По своему назначению аварийное освещение подразделяется на два вида: для эвакуации людей из помещения и для продолжения работ. Аварийное освещение для эвакуации людей должно обеспечить освещённость на полу по линии основных проходов не менее 30 лк.

#### 6.2.4 Микроклимат помещения

Вентиляция является важным средством создания оптимальных условий на химических производствах. Для производственных условий в большинстве случаев характерно суммарное действие климатических факторов помещения. Климатические условия производственных помещений складываются из температуры воздуха, его влажности и скорости движения воздуха.

Климатические условия оказывают значительное влияние на самочувствие человека, его работоспособность и здоровье. По тяжести работы, производимые зоне производственного помещения, относятся к



работам средней тяжести. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 6.24 и таблице 6.25. [36]

Таблица 6.4 - Оптимальные параметры микроклимата.

Период года	Температура, оС	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	22–24	40–60	0,1
Теплый	23–25	40–60	0,1

Таблица 6.5 - Допустимые параметры микроклимата.

Период года	Температура, оС	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный и переходный	20,0–21,9	15–75	0,1
Теплый	20,0–21,9	15–75	0,1

### **6.3 Анализ опасных выявленных факторов при эксплуатации проектируемого оборудования**

#### **6.3.1 Поражение электрическим током**

На проектируемом производстве предполагается использование сетей, напряжением 220 и 380 В. В качестве тоководов планируется применение проводов и кабелей с поливинилхлоридной или резиновой изоляцией. Проектируемый цех относится к первому классу электробезопасности (помещения без повышенной опасности), т.к. соблюдается условия: температура ниже 35 °С, влажность ниже 75 %, наличие заземления.

При сборке, настройке, подключении и эксплуатации разрабатываемого устройства возможно поражение электрическим током, что является опасным фактором. Для минимизации опасности удара электрическим током разработан ряд требований безопасности к

электротехническим приборам, установленный ГОСТ 12.2.007.0-75 «Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические». Общие требования безопасности. Данный ГОСТ устанавливает требования для изоляции, защитного заземления, органов управления, блокировки, оболочки, зажимов и выводных устройств, экранов и прочих средств защиты от опасного и вредного влияния электромагнитных полей, теплового, оптического и рентгеновского излучения, предупредительных знаков, надписей, сигнализаций. Также, для минимизации риска, следует соблюдать технику безопасности при работе с электроприборами. [33]

Особенно опасно прикосновение человека к токоведущим частям находящимся под напряжением. [34]

Вследствие теплового воздействия электрического тока при непосредственном прикосновении человека к токоведущим частям и при воздействии электрической дуги возникают внешние местные поражения (ожоги). [34]

Ожоги могут быть поверхностные или глубокие, сопровождающиеся поражением не только кожных покровов, но и подкожной ткани, жира, глуболежащих мышц и кости.

Раны от ожогов заживают очень долго, а поражение 2/3 поверхности тела может привести к смертельному исходу. Возникают также механические повреждения — разрыв тканей и некоторых внутренних органов, это может быть следствием динамических перенапряжений при прохождении через тело человека электрического тока (практически — тока короткого замыкания) при случайном прикосновении одновременно к двум токоведущим шинам, напряжением выше 1000 В. [34]

Механическое повреждение может быть вызвано падением человека с высоты вследствие испуга при незначительном воздействии силы тока, практически безопасного, если не были выполнены меры безопасности при работе на высоте.

Наибольшую, опасность при всех видах поражения представляет электроудар, когда при прохождении тока через тело человека поражается весь организм в целом, возникают судороги, расстройство дыхания, аритмия работы сердца. Степень опасности силы тока зависит от силы тока, проходящего через организм. Если сила тока, проходящего через организм 1,5 мА (при постоянном напряжении), то в месте контакта с токоведущими частями ощущается зуд и нагрев. Такую силу тока называют порогом ощущения. [34]

Увеличение силы тока до 10 мА при переменном и до 50 мА при постоянном напряжении вызывает у человека сильные боли в пальцах и кистях рук. При такой силе тока человек еще может самостоятельно оторваться от токоведущих частей. Такую силу тока называют условно безопасной. [34]

Дальнейшее увеличение от 10 мА до 100 мА при переменном и от 50 мА до 100 мА при постоянном напряжении вызывает очень сильные боли, руки парализуются, наступает паралич дыхания, самостоятельно оторваться от токоведущих частей невозможно. Сила тока при снижении сопротивления человеческого тела постоянно возрастает и при достижении 100 мА, как при переменном, так и при постоянном напряжении наступает клиническая смерть (отсутствие внешних признаков жизни). [34]

### **6.3.2 Подвижные части производственного оборудования**

Движущиеся части производственного оборудования, являющиеся возможным источником травмоопасности, должны быть ограждены или расположены так, чтобы исключалась возможность прикасания к ним работающего или использованы другие средства, предотвращающие травмирование. [28]

### **6.3.3 Повышенная температура поверхности оборудования**

Теплоизоляционная конструкция должна обеспечивать нормативный уровень тепловых потерь оборудованием и трубопроводами, безопасную для человека температуру их наружных поверхностей, требуемые параметры теплохолодоносителя при эксплуатации. [35]

Конструкции тепловой изоляции трубопроводов и оборудования должны отвечать требованиям:

- энергоэффективности - иметь оптимальное соотношение между стоимостью теплоизоляционной конструкции и стоимостью тепловых потерь через изоляцию в течение расчетного срока эксплуатации;
- эксплуатационной надежности и долговечности - выдерживать без снижения теплозащитных свойств и разрушения эксплуатационные, температурные, механические, химические и другие воздействия в течение расчетного срока эксплуатации;
- безопасности для окружающей среды и обслуживающего персонала при эксплуатации.

Материалы, используемые в теплоизоляционных конструкциях, не должны выделять в процессе эксплуатации вредные, пожароопасные и взрывоопасные, неприятно пахнущие вещества в количествах, превышающих предельно допустимые концентрации, а также болезнетворные бактерии, вирусы и грибки. [35]

### **6.4 Обоснование мероприятий по защите персонала от действия опасных и вредных факторов**

Особое внимание на предприятиях и в организациях должно уделяться обоснованию мероприятий по безопасности и охране труда. В соответствии с международными стандартами необходимо вводить и поддерживать порядок непрерывного выявления опасных факторов, оценки риска и принятия мер для снижения уровня риска; разрабатывать

профилактические и корректирующие мероприятия на основе результатов мониторинга условий труда.

#### **6.4.1 Защита дыхательных путей и кожных покровов от воздействия химических реагентов**

Рабочий персонал, в зависимости от класса и вида работ, уровня и характера загрязнения воздуха, использования оборудования, где также возможен непосредственный контакт с опасными реагентами и продуктами производства, обеспечиваются средствами индивидуальной защиты. [36]

К средствам индивидуальной защиты (СИЗ) при работе с химическими веществами относятся: – спецодежда повседневного применения и спецодежда кратковременного использования (из нетканых материалов – комбинезоны и костюмы; из пленочных материалов и материалов с полимерным покрытием – полухалаты, полуккомбинезоны, фартуки, чехлы, бахилы и т.д.); – средства защиты органов дыхания – респираторы – ГОСТ 12.4.028–76 ; противогазы промышленные фильтрующие – ГОСТ 12.4.121–83 ; – спецобувь – ГОСТ 12.4.127–83 (основная дезактивируемая спецобувь, сапоги специальные резиновые формовые, защищающие от воды, нефтяных масел и механических воздействий – ГОСТ 12.4.072–79 ); – средства защиты глаз – ГОСТ 12.4.153–85 (защитные очки). – средства защиты рук – ГОСТ 12.4.010–75 (резиновые перчатки и хлопчатобумажные перчатки, рукавицы и т.д.) При работе с токсичными и вредными веществами запрещено допускать персонал к работе без спецодежды и защитных средств. [36]

#### **6.4.2 Защита от производственного шума и вибрации**

Главный способ защиты от вибрации и шума -ограничение времени воздействия этих факторов. Ограничение должно осуществляться путем установления для лиц опасных профессий внутрисменного режима труда, реализуемого в технологическом процессе. [37]

Основными мероприятиями по защите от шума является: – плавное соединение воздуховодов с вентиляционным агрегатом с помощью переходов и гибких вставок; – установка вентагрегатов в отдельных выгороженных помещениях – венткамерах, расположенных в удаленных от рабочих мест частях здания; – подбор диаметров воздуховодов по средним скоростям в магистральных воздуховодах для уменьшения сопротивления сети (4–8) м/с; – монтаж насосов и химического оборудования беспрокладочным методом с применением установочных винтов, удаляемых после подливки. Исключаются жёсткие связи между виброизолируемым агрегатом и строительными конструкциями. Питание к электродвигателям подведено гибкими кабелепроводами. [37]

Средства индивидуальной защиты от шума: – применение противошумных наушников, закрывающих ушную раковину снаружи; – применение противошумных вкладышей, перекрывающих наружный слуховой проход или прилегающие к нему; – противошумные шлемы и каски; – противошумные костюмы. [37]

Для устранения вибрации от устройств, их устанавливают на специальные платформы, снижающие уровень вибрации. Средствами индивидуальной защиты от вредного воздействия вибрации являются специальные перчатки, рукавицы, обувь. Рабочие места расположены вдали от источников вибрации. [37]

#### **6.4.3 Поддержание микроклимата помещения**

Мероприятия по нормализации параметров микроклимата:

- отведение тепла исходящего от оборудования, установленного на открытых площадках;
- в цехе существуют места для отдыха рабочих;
- для предупреждения простудных заболеваний у входа в цех оборудованы тамбуры и защитные стенки, которые нужны для предохранения от сквозняков, воздушные тепловые завесы устанавливаются

для защиты рабочих помещений от проникновения больших масс холодного воздуха;

- зимой температура поддерживается за счёт батарей центрального отопления. [38]

Таким образом, микроклимат в проектируемом цеху соответствует всем нормам согласно с ГОСТ 12.1.005-88 и СН 245-71.

#### **6.4.4 Поражение электрическим током**

Согласно требованиям ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности:

Конструкция производственного оборудования, приводимого в действие электрической энергией, должна включать устройства (средства) для обеспечения электробезопасности.

Технические средства и способы обеспечения электробезопасности (например ограждение, заземление, зануление, изоляция токоведущих частей, защитное отключение и др.) должны устанавливаться в стандартах и технических условиях на производственное оборудование конкретных групп, видов, моделей (марок) с учетом условий эксплуатации и характеристик источников электрической энергии.

Производственное оборудование должно быть выполнено так, чтобы исключить накопление зарядов статического электричества в количестве, представляющем опасность для работающего, и исключить возможность пожара и взрыва.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок заданного цеха:

– недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение токоведущих и электропоражающих частей); – покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;

– заземление корпусов всех установок через нулевой провод; –  
вывешивание плакатов, указывающих место работы;

– отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или  
вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению  
невозможности подачи напряжения к месту работы.

В проектируемом цеху к индивидуальным средствам защиты от  
поражения электрическим током относятся: а) Основные – оперативные  
штанги и токоизмерительные клещи, диэлектрические перчатки,  
инструмент с изолирующими ручками и указателем напряжений; б)  
Дополнительные – диэлектрические галоши, коврики. Как дополнительная  
изоляция используется спецодежда рабочего.

Соблюдение представленных требований позволяет не допускать  
несчастных случаев, связанных с поражением электрическим током, а также  
уменьшается вероятность преждевременного выхода оборудования из  
рабочего состояния. [29]

#### **6.4.5 Защита от подвижных части производственного оборудования**

Если функциональное назначение движущихся частей, представляющих  
опасность, не допускает использование ограждений или других средств,  
исключающих возможность прикасания работающих к движущимся частям,  
то конструкция производственного оборудования должна предусматривать  
сигнализацию, предупреждающую о пуске оборудования, а также  
использование сигнальных цветов и знаков безопасности. [29]

В непосредственной близости от движущихся частей, находящихся вне  
поля видимости оператора, должны быть установлены органы управления  
аварийным остановом (торможением), если в опасной зоне, создаваемой  
движущимися частями, могут находиться работающие. [29]

Конструкция зажимных, захватывающих, подъемных и загрузочных  
устройств или их приводов должна исключать возможность возникновения



опасности при полном или частичном самопроизвольном прекращении подачи энергии, а также исключать самопроизвольное изменение состояния этих устройств при восстановлении подачи энергии. [29]

Элементы конструкции производственного оборудования не должны иметь острых углов, кромок, заусенцев и поверхностей с неровностями, представляющих опасность травмирования работающих, если их наличие не определяется функциональным назначением этих элементов. В последнем случае должны быть предусмотрены меры защиты работающих. [29]

Части производственного оборудования (в том числе трубопроводы гидро-, паро-, пневмосистем, предохранительные клапаны, кабели и др.), механическое повреждение которых может вызвать возникновение опасности, должны быть защищены ограждениями или расположены так, чтобы предотвратить их случайное повреждение работающими или средствами технического обслуживания. [29]

Конструкция производственного оборудования должна исключать самопроизвольное ослабление или разъединение креплений сборочных единиц и деталей, а также исключать перемещение подвижных частей за пределы, предусмотренные конструкцией, если это может повлечь за собой создание опасной ситуации. [29]

#### **6.4.6 Повышенная температура поверхности оборудования**

При необходимости нахождения людей вблизи горячих частей оборудования должны быть приняты меры по их защите ожогов и действия высокой температуры (ограждение действующего оборудования, вентиляция, спецодежда и т.п.). [39]

Работы, при которых возможно бурное протекание химического процесса, разбрызгивание горячих или вредных веществ, а также работы под вакуумом должны выполняться в вытяжных шкафах на противнях или поддонах. При работе следует пользоваться специальными защитными

очками, спецодеждой, фартуками и перчатками из материалов, стойких к воздействию вышеназванных веществ. [39]

Все горячие части оборудования, трубопроводы, баки и другие элементы, прикосновение к которым может вызвать ожоги, должны иметь тепловую изоляцию. Температура на поверхности изоляции при температуре окружающего воздуха 25 °С должна быть не выше 45 °С. [39]

Окраска, условные обозначения, размеры букв и расположение надписей должны соответствовать Правилам устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды и ГОСТ 14202-69. Трубопроводы промышленных предприятий. Опознавательная окраска, предупреждающие знаки и маркировочные щитки.

Все горячие участки поверхностей оборудования и трубопроводов, находящиеся в зоне возможного попадания на них легковоспламеняющихся, горючих, взрывоопасных или вредных веществ, должны быть покрыты металлической обшивкой для предохранения тепловой изоляции от пропитывания этими веществами. [39]

Трубопроводы агрессивных, легковоспламеняющихся, горючих, взрывоопасных или вредных веществ должны быть герметичными. В местах возможных утечек (краны, вентили, фланцевые соединения) должны быть установлены защитные кожухи, а при необходимости - специальные устройства со сливом из них продуктов утечек в безопасное место. [39]

## **6.5 Экологическая безопасность**

### **6.5.1 Анализ влияния объекта исследования на атмосферу**

К газообразным отходам производства, загрязняющим окружающую среду, относятся пары реагентов и растворителей, участвующих в процессе полимеризации и образующихся в процессе полимеризации. Для снижения вредного воздействия на окружающую среду производственный процесс

ведется в закрытом помещении, оборудованном системой вентиляции. Для контроля содержания реагентов и растворителей в отделении полимеризации установлен газоанализатор СВК-3М, сблокированный с аварийной вытяжной вентиляцией.

При эксплуатации производственного оборудования полимеризации, нормальная воздушная среда в помещениях цеха обеспечивается системами отопления и вентиляции.

### 6.5.2 Анализ влияния объекта исследования на гидросферу

В цехе предусмотрена ливневая и хоз-бытовая канализация. В нее поступают сточные воды от мытья полов в помещениях. Основным загрязнителем сточных вод являются следы масел, по содержанию не превышающие ПДК.

Средний объем стоков на перекачку составляет 20 м<sup>3</sup>/сутки. Охлаждение теплообменного оборудования производится от закрытой системы оборотного водоснабжения. Характеристика сточных вод приведена в таблице 6.6.

Таблица 6.6 - Сточные воды

Наименование сбрасываемых сточных вод, отделение, аппарат	Место сбрасывания	Количество стоков, м <sup>3</sup> в сутки	Содержание контролируемых вредных веществ в сбросах (по компонентам), мг/дм <sup>3</sup>	Допускаемое количество сбрасываемых вредных веществ, кг в сутки
Стоки от промывки оборудования, смыва с полов, ливневые в случае превышения норм по содержанию вредных веществ	В химзагрязненную канализацию на локальную отчистку	48-240	Гептан -3 Мин.масла -5 Взвешенные -35	0,14 0,24 1,7

### 6.5.3 Анализ влияния объекта исследования на литосферу

Во время ремонта или демонтажа оборудования происходит образование отходов, характеристика которых представлена в таблице 7.

Преимущественно это металлические отходы, отходы ТБО и отходы порошка полипропилена. Металлические отходы продаются и утилизируются. Твёрдые бытовые отходы утилизируются на Томском полигоне ТБО. Отходы порошка полипропилена фасуются в мешки по 20 кг и продаются для вторичной переработки.

Таблица 6.7 - Характеристика твердых и жидких отходов.

Наименование отхода	Место складирования, транспорт, тара	Количество отходов,	Периодичность образования	Характеристика отходов		
				Химический состав, влажность, %	Физические показатели, плотность,	Класс опасности
Отходы порошка полипропилена, образующиеся в результате чистки оборудования, отборе проб	Отходы порошка фасуются в полиэтиленовые мешки и вывозятся на полигон токсичных отходов автомобильным транспортом	224	Периодически при ремонте и чистке оборудования	Порошок полипропилен Массовая доля растворителя (гептана) до 40%	Порошок белого цвета Плотность полипропилен а - 910 кг/м <sup>3</sup>	3

### 6.6 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования

В жизненный цикл любого изделия входят следующие этапы: разработка технических требований к создаваемому виду изделия; проектирование; подготовка и разработка технологических процессов;

производство; монтаж; ввод в действие; эксплуатация; техническое обслуживание и ремонт; проведение испытаний и обследований; снятие с эксплуатации; утилизация после завершения использования продукции.

Оборудование будет изготавливаться из нержавеющей стали. По завершении срока службы изделия и оборудование из нержавеющей стали проходит сортировку и сбор для отправки на вторичную переработку, что не сопряжено с какими-либо значительными экономическими вложениями и в полной мере является самокупающимся мероприятием. Нержавеющая сталь не обладает риском изнашивания и остаётся составляющей устойчивой системы закрытого контура. Её переработка – на фоне ряда других технологически полученных материалов – происходит без такого побочного эффекта, как деградация, что означает полную сохранность всех изначальных характеристик, при том, что получаемая из нержавеющей стали продукция проходит процесс удешевления. Прочность этого материала – это гарантия высоких гигиенических стандартов, что позволяет применение нержавеющей стали на предприятиях общепита. Выбор нержавеющей стали – это выбор продукта, который, благодаря повышенным механическим свойствам, может максимально содействовать охране природных ресурсов.

## **6.7 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды**

В рассматриваемой технологической цепочки в окружающую среду могут выделяться газообразный пропилен, этилен, водород, пары нефраса, а также твердый полипропилен. Избыточные газы отправляются на очистку с целью возвращения их в технологический процесс.

Профилактическими мерами по предупреждению вредных выбросов являются:

– организация технологических процессов с минимальным использованием загрязняющих веществ;

- организация эффективной системы сорбционной очистки выходящих газов и сточных вод в местах специализированного выброса;
- надежная герметизация оборудования;
- повышение общей культуры производства, организация производства на замкнутый технологический цикл.

## **6.8 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **6.8.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований**

Отличительной особенностью производства полипропилена по пожарной и взрывопожарной безопасности связано с опасностями при работе с углеводородами и катализаторными комплексами, которые характеризуются повышенной способностью к воспламенению и детонации.

Основные опасности при работе с углеводородами и катализаторными комплексами: [27]

1. Возгорание оборудования, трубопроводов и арматуры, работающих с углеводородами;
2. Возгорание одежды и волосяных покровов обслуживающего персонала, находившегося в среде с повышенным содержанием углеводородов;
3. Взрыв углеводородов и других взрывоопасных примесей при их утечке из реакторов, трубопроводов и др. оборудования при нарушении технологических параметров;
4. Раствор триэтилалюминия является токсичной, пожароопасной, пирофорной жидкостью. При контакте с воздухом, при разливе раствора ТЭА, может произойти самовоспламенение, вследствие его экзотермического окисления;
5. Загорание и взрыв баллонов, наполненных сжиженными углеводородами, при их разгерметизации.

Также при несоблюдении правил хранения и нарушений

противопожарных норм возможны загорания смазочных масел и обтирочных материалов. [27]

Для предотвращения возможных ситуаций необходимо соблюдать меры пожарной безопасности: [27]

1. Запрещается курить и применять открытый огонь в отделении полимеризации, а также в местах, где проходят трубопроводы и производятся работы с углеводородами. Курение разрешается только в специально отведенных и оборудованных местах, определенных приказом по предприятию.
2. В зданиях производства полипропилена и в местах расположения баллонов со сжиженными углеводородами должны быть установлены ванны самопомощи, заполненные водой. Допускается устройство противопожарных душевых кабин с автоматической подачей воды при входе человека в кабину.
3. При загорании производственного оборудования необходимо прекратить поступление углеводородов в помещение. Обслуживающий персонал должен быть выведен в безопасную зону. Для тушения загоревшегося оборудования должны применяться негорючие в кислороде средства пожаротушения: вода, пена, водяной пар, двуокись углерода, инертные газы (азот, аргон), порошковые составы на основе карбоната натрия и т.д.
4. Загрязнение производственного оборудования, трубопроводов и установленной на них арматуры жировыми и другими горючими веществами не допускается. Грузоподъемные устройства должны быть оборудованы защитными приспособлениями, исключающими попадание масла на производственное оборудование и арматуру.
5. При эксплуатации производственного оборудования должна исключаться возможность утечки углеводородов.
6. В процессе эксплуатации оборудования необходимо следить за герметичностью аппаратов, машин и коммуникаций. При обнаружении утечек газообразных или жидких продуктов работа оборудования должна

быть приостановлена и утечки ликвидированы. Определение мест утечек газа при помощи огня или тлеющих предметов запрещается.

8. Тепло- и звукоизоляция оборудования и трубопроводов должна выполняться из несгораемых или трудносгораемых материалов.

7. В помещениях, где осуществляется периодический контроль за содержанием углеводородов в воздухе, при повышении концентрации пропилена в воздухе более 100 мг/м<sup>3</sup> должны быть немедленно приняты меры по нормализации состава воздуха, для предотвращения возникновения повышенного содержания взрывопожароопасных газов и образование взрывопожароопасной среды.

9. Наружный отопитель арматуры должен производиться горячим воздухом, паром или горячей водой. Пользоваться для этой цели открытым огнем запрещается.

10. Использовать конструкции реакторов, пневмотранспортов и трубопроводов в качестве заземления при электросварочных работах не допускается.

11. Запрещается наполнять и опорожнять транспортные цистерны на площадках из асфальта и других органических покрытий.

12. Слив продуктов полимеризации следует производить в специально отведенное для этого место, возле которого должен быть установлен предупреждающий знак безопасности с поясняющей надписью "Место для слива продуктов полимеризации. Опасно. Не курить!" Слив продуктов полимеризации на грунт и асфальт запрещается.

13. Руки, а также одежда и обувь персонала, обслуживающего производственное оборудование, должны быть чистыми, без следов масла.

14. По окончании работ с углеводородами или в местах с их повышенным содержанием в окружающем воздухе запрещается в течение 30 минут приближаться к огню или раскаленным предметам и курить. Одежда, в которой производились работы, должна быть проветрена.



15. Ремонт оборудования разрешается производить только после тщательной продувки.

### **6.8.2. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

Наиболее возможными для цеха полимеризации пропилена являются источники чрезвычайных ситуаций антропогенного характера. В первую очередь это:[27]

- выделение продуктов полимеризации при разгерметизации оборудования, что приводит к возникновению взрыва и пожара;
- выделение углеводородов, катализаторных комплексов и продуктов полимеризации вызывает опасность удушья от недостатка кислорода;
- выделение углеводородов, катализаторных комплексов и продуктов полимеризации может привести к отравлению персонала;
- замыкание электропроводки и силовых кабелей, что приводит к возникновению пожара.

В соответствии с этим принимаются меры, направленные на минимизацию вероятности возникновения и последствий ЧС на промышленных объектах, которые включают в себя: [27]

1. Разработку технических и организационных мероприятий, уменьшающих вероятность возникновения чрезвычайной ситуации (снабжение технологического оборудования средствами взрыво- и пожарозащиты, электро- и молниезащиты, локализации и тушения пожаров).

2. Формирование планов действия в чрезвычайных ситуациях. Подготовка персонала, служб гражданской обороны и населения к действиям при чрезвычайных ситуациях.

В случае возникновения чрезвычайной ситуации в действие вступает План Ликвидации Аварийной Ситуации (ПЛАС). Он предусматривает порядок действия при возникновении чрезвычайной ситуации. Согласно ПЛАС в цеху должен находиться аварийный запас средств защиты в шкафу. Шкаф должен

быть окрашен в желтый цвет с надписью. Содержимое шкафа включает в себя шланговые противогазы ПТТ1 -1, промышленные фильтрующие противогазы ППФМ-92 с коробкой марки БКФ, самоспасатель ПДУ-3, респираторы, комплекты спецодежды, защитные очки, сапоги, перчатки и др.

Таблица 6.8. - Возможные производственные аварийные ситуации, способы их устранения.

Возможные производственные аварийные ситуации	Причины возникновения аварийных ситуаций	Действия персонала по предупреждению и устранению аварийных ситуаций
Отключение электроэнергии	Прекращение работы оборудования	Разгрузить через аварийные клапана реакционную среду из аппарата. Произвести аварийную остановку блока полимеризации в ручном режиме.
Прекращение подачи охлаждающей воды	Перегрев оборудования	Произвести аварийную остановку блока полимеризации в автоматическом режиме.
Разгерметизация оборудования и коммуникаций в случае пожара или взрыва	Нарушение режима работы оборудования. Аварийная остановка оборудования.	Произвести аварийную остановку блока полимеризации в автоматическом режиме. Принять исчерпывающие меры по локализации аварии. Оградить опасную зону и выставить посты. Прекратить все ремонтные, огневые и другие виды работ. Удалить в безопасное место лиц, не участвующих в ликвидации аварии. Оказать первую помощь пострадавшим. Приступить к ликвидации аварии и спасению людей
Розлив продуктов полимеризации (гептан, катализаторный комплекс, полипропилен)	Нарушение режима работы оборудования. Разрушение производственного оборудования и резервуаров для хранения жидких	Произвести аварийную остановку блока полимеризации в автоматическом режиме. Разгрузить через аварийные клапана реакционную среду из аппарата. Принять исчерпывающие меры по локализации аварии.

	продуктов разделения "физического взрыва" или аварии	Оградить опасную зону и выставить посты. Прекратить все ремонтные, огневые и другие виды работ. Удалить в безопасное место лиц, не участвующих в ликвидации аварии. Оказать первую помощь пострадавшим. Приступить к ликвидации аварии и спасению людей.
--	---	--

### **6.9 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Законодательство РФ об охране труда основывается на Конституции РФ и состоит из федерального закона, других федеральных законов и иных нормативных правовых актов субъектов РФ. Среди них можно выделить федеральный закон “Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний”. Для реализации этих законов приняты Постановления Правительства РФ “О государственном надзоре и контроле за соблюдением законодательства РФ о труде и охране труда”, “О службе охраны труда”, “О Федеральной инспекции труда” и др. [40]

Управление охраной труда осуществляет блок федеральных органов исполнительной власти, руководимый Министерством здравоохранения и социального развития Российской Федерации (Минздравсоцразвития). Оно осуществляет функции государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере здравоохранения и социального развития, социального страхования, условий и охраны труда и т. д.

Функции по контролю и надзору, которые ранее осуществлялись Санэпиднадзором Минздрава России, переданы Федеральной службе по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор).

Федеральная служба по труду и занятости (Роструд) осуществляет функции по надзору и контролю в сфере труда, а также государственный

надзор и контроль за соблюдением, в частности, трудового законодательства и нормативных правовых актов, содержащих нормы трудового права; установленного порядка расследования и учета несчастных случаев на производстве.

Федеральное агентство по здравоохранению и социальному развитию (Росздрав) организует деятельность по установлению связи заболевания с профессией, государственной службы медико-социальной экспертизы и др.

Федеральная служба по надзору в сфере здравоохранения и социального развития (Росздравнадзор) осуществляет контроль за порядком организации осуществления медико-социальной экспертизы; порядком установления степени утраты профессиональной трудоспособности в результате несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний и др.

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор) — государственный санитарно-эпидемиологический надзор за соблюдением санитарного законодательства; организует деятельность системы санитарно-эпидемиологической службы РФ.

В федеральном законе “О пожарной безопасности” (1994) определяются общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в России, дается регулирование отношений между органами государственной власти, органами местного самоуправления, предприятиями, организациями, крестьянскими хозяйствами и иными юридическими лицами независимо от форм собственности. Федеральный закон “О промышленной безопасности опасных производственных объектов” (1997) определяет правовые, экономические и социальные основы обеспечения безопасной эксплуатации опасных производственных объектов и направлен на предупреждение аварий на опасных производственных объектах и обеспечение готовности организаций к локализации последствий аварий.

## Заключение

В квалификационной работе был проведён расчёт реактора полимеризации полипропилена. В результате работы «Узел термостатирования реактора полимеризации пропилен с разработкой основного оборудования» был произведен расчет реактора полимеризации пропилен.

Произведены основные расчеты двух аппарата, такие как:

- Технологический расчёт;
- Расчет толщины стенки цилиндрической обечайки, а также толщины стенок эллиптических днищ;
- Расчет фланцевого соединения;
- Расчет укрепления отверстий в цилиндрической обечайке и эллиптических днищах;
- Выбор и расчет опор аппарата.

В разделе был описан эксперимент по получению гранулята порошка полипропилена при помощи метода гранулирования в жидкой среде.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» был произведен расчет затрат на модернизацию узла термостатирования реактора с увеличением мощности. Были рассчитаны затраты на приобретение, монтаж и эксплуатацию установки.

В разделе « Социальная ответственность», рассмотрена безопасность и экологичность нахождения сотрудников в цехе производства полипропилена, а также разработаны мероприятия по предотвращению воздействия на здоровье опасных и вредных факторов для работников цеха и созданы безопасные условия труда для обслуживающего персонала.

## СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Колесникова Андрея Евгеньевича

	Наименование научного труда	Руко-писн. или печ.	Издательство, журнал (номер, год)	Номер стр.	Фамилии соавторов
1	Влияние наполнителей на свойства полимерной композиции	Печ.	Материалы VI Международной научно-технической конференции молодых учёных аспирантов и студентов «Высокие технологии в современной науке и технике». – Томск, 2017.	256–257	Галеев В. Р.
2	Модифицирование порошкообразных наполнителей	Печ.	Труды XXI Международного научного симпозиума студентов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – Т. II	394–396	Курмель Г.В. Шипулин А. С.
3	Технология получения полипропилена	Печ.	Химия и химическая технология в XXI веке : материалы XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых им. профессора Л.П. Кулёва «Химия и химическая технология в XXI веке». Томск: Изд-во ТПУ, 2017.	479–480	

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И. Л. Иоффе Проектирование процессов и аппаратов химической технологии: Учебник для техникумов. – Л.: Химия, 1991. - 352 с., ил.
2. Краткий справочник физико-химических величин. Седьмое издание: под редакцией К.П. Мищенко и А.А. Равделя, Л.: Химия, 1974 г. 200 стр.
3. Кипер, Р.А. Свойства веществ: Справочник по химии / Р. А. Кипер. – Хабаровск, 2013. – 1016 с.
4. ГОСТ 20680-2002. Аппараты с механическими перемешивающими устройствами. Общие технические условия. — Изд. официальное. — М.: Издательство стандартов, 2002.
5. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/ Ю. И. Дытнерский, Г. С. Борисов, В. П. Брыков. – М.: Химия, 1991. – 496 с.: ил.
6. К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков – Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии/Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. – Л.: Химия, 1976. – 552 с.
7. Соколов В. Н., Доманский И. В., Исаков В. П., Островский Г. М. Машины и аппараты химических производств: Примеры и задачи. Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Машины и аппараты химических производств». Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. — 384 с., ил.
8. ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. — Изд. официальное. — М.: Издательство стандартов, 2007.
9. ГОСТ Р 52857.2-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. — Изд. официальное. — М.: Издательство стандартов, 2007.

10. В.М. Беляев, В.М. Миронов В. В. Тихонов. Конструирование и расчёт элементов оборудования отрасли. Часть I. Аппараты с механическими перемешивающими. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 95 с.
11. Лазинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчёта химической аппаратуры: Справочник. Под ред. Н.Н. Логинова - Л.: Машиностроение, 1970. 752 с.
12. ГОСТ Р 52857.8-2007. Сосуды и аппараты с рубашками. — Изд. официальное. — М.: Издательство стандартов, 2008.
13. В.М. Беляев, В.М. Миронов В. В. Тихонов. Конструирование и расчёт элементов оборудования отрасли. Часть I. Аппараты с механическими перемешивающими. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 162 с.
14. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
15. ГОСТ 8732-78. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент. — Изд. официальное. — М.: Издательство стандартов, 2007.
16. Каталог продукции. Закрытое акционерное общество научно производственное объединение "Сфера". [<http://www.sferams.ru/cms/images/katalog/katalog.pdf>]
17. ОСТ 26-2002-83. Люки с плоскими крышками стальных сварных сосудов и аппаратов. Конструкция. 1994.
18. ОСТ 26-467-84. Опоры цилиндрические и конические вертикальных аппаратов. Типы и основные размеры. 1984.
19. А.Г. Касаткин. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. -10-е изд. Стрелитипное, доработанное. – М.: ООО ТИД«АльЯнс», 2004. – 753с.



- 20.ГОСТ 15120-79. Холодильники кожухотрубчатые с неподвижными трубными решётками и кожухотрубчатые с температурным компенсатором на кожухе. Основные параметры и размеры. — Изд. официальное. — М.: Издательство стандартов, 1979.
- 21.Семакина О.К. Машины и аппараты химических производств. Учеб. Пособие. Часть 1 /Том. политехн. ун-т. – Томск, 2003. – 118 с.
- 22.ГОСТ 9929-82. Аппараты теплообменные кожухотрубчатые стальные. Типы, основные параметры и размеры. — Изд. официальное. — М.: Издательство стандартов, 1982.
- 23.ГОСТ Р 52857.4-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Расчёт на прочность и герметичность фланцевых соединений. — Изд. официальное. — М.: Издательство стандартов, 2007.
- 24.ГОСТ 31842-2012. Нефтяная и газовая промышленность. Теплообменники кожухотрубчатые. Технические требования. – М.: Издательство стандартов, 2012.
- 25.ГОСТ Р 52857.3-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлении. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер. - М.: Издательство стандартов, 2009.
- 26.ГОСТ 28759.2-90. Фланцы сосудов и аппаратов стальные плоские приварные. Конструкция и размеры. — М.: Издательство стандартов, 1992.
- 27.Рабочая инструкция № 101-р-1. Для аппаратчиков полимеризации пропилена 5, 6 разряда. ТНХК.
- 28.ГОСТ 12.0.003-74 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – Сб. Гостов. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.- 4с.

- 29.ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности.– официальное издание М.:Стандартинформ, 1993- 15с.
- 30.ГОСТ 12.1.003-76. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. — Изд. официальное. — М.: Издательство стандартов, 1977.
- 31.СП 52.13330.2011 .Свод правил. Естественное и искусственное освещение.
- 32.ГОСТ 30494-2011.Здания жилые и общественные.Параметры микроклимата в помещениях. – Сб. Гостов. - М.: ИПК Издательство стандартов, 2013.- 14с.
- 33.ГОСТ 12.2.007.0-75 «Система стандартов безопасности труда. Изделия электротехнические». – официальное издание М.: Стандартинформ, 1978- 15с.
- 34.Инструкция по охране труда по электробезопасности.
- 35.СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов.
- 36.СанПиН 2.6.1.07-03. Гигиенические требования к проектированию предприятий и установок атомной промышленности.
- 37.Макаров Г.В. Охрана труда в химической промышленности.- М.:Химия,1989-496с.
- 38.ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. - М.: Издательство стандартов, 1988.
- 39.РД 34.03.201-97 Правила техники безопасности при эксплуатации тепломеханического оборудования электростанций и тепловых сетей.
- 40.Федеральный закон "О пожарной безопасности" от 21.12.1994 N 69-ФЗ.
- 41.Креницына З.В., Видяев И.Г. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсо-сбережение: учебно-методическое пособие /Креницына З.В., Видяев И.Г.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.
42. АТК 24.201.17-90. «Мешалки. Типы, параметры, конструкция, основные размеры и технические требования».

## Приложение А

### **1. Granulation of polypropylene waste**

#### **1.1 Literary review**

Polypropylene is a synthetic thermoplastic polymer used to produce a huge amount of goods. This material is involved in construction, agrarian and household sectors, automotive, food and medical industries. But along with the popularity of plastic, the concern of environmentalists is also growing: for a complete decomposition of polypropylene waste, a natural way takes up to 500 years.

Consumption also increases the amount of waste of this type of polymer, which, if improperly recycled, leads to serious consequences for humans and the environment. In order to avoid drowning in plastic waste in the near future, safe methods of their utilization are needed today.

Such methods as reclamation and incineration are not suitable for polypropylene. Since during its burial, gas is released, which provokes the occurrence of the greenhouse effect. The main effective method of recycling polypropylene is secondary processing, since the material retains all its properties, which allows to shorten the cycle of production of new goods, and hence their cost. Often polypropylene is melted, resulting in the formation of granules, of which plastic products will be produced.

The process of processing polypropylene involves the collection, sorting, cleaning and direct processing.

For processing, polypropylene is important to separate from other polymers. This can be done by using such a material property as the specific density. It differs from the specific density of other polymers and is 0.86 g / cm<sup>3</sup>. Therefore, when all other plastics and impurities are drowned, this plastic may be on the surface. More polymers can be separated from each other due to different melt flow indexes.

Secondary polypropylene after processing is suitable for making fiber for marine ropes, film and tape, insulating materials, packaging containers, food buckets and paint and varnish products.

Also polypropylene is suitable for the production of road pavement, noise insulation materials, electrical insulation and even yarns for making the basis of carpeting.

At present, the technology of processing products from polypropylene is debugged. But the technology of processing defective polypropylene from manufacturers' factories has been little studied. Waste appears in the course of repair work, sampling, inconsistencies in the technological regime (marriage). In total, one plant can accumulate up to 200 tons of powder per year. At the same time, some of the powder can be of good quality, but since it has impurities, it is disposed of at the landfill.

It often happens that the powder is contaminated with a variety of mechanical impurities: dirt, oils, metal shavings, etc. For this reason, enterprises that process polypropylene refuse to use this product, because this leads to a malfunction of machines and apparatus and affects the quality of the finished product. In addition, the waste products of polymerization of polypropylene are not stabilized. That is, they are not in granules, as a commodity polypropylene, but in the form of a powder. In powder, accordingly, there are no special additives that improve the physical and mechanical properties of the finished product, and protect it from exposure to oxygen. With proper dosing, such a powder can be added to the commercial powder without compromising quality.

To sell wastes of powdered PP it must be cleaned of mechanical impurities and scraped for easy transportation, dosing and storage.

## 2. The experimental part

In the course of scientific work it was necessary to solve the problems of cleaning and granulation of polypropylene powder without melting. Because the melting of polypropylene is a rather complex and dangerous process.

At the first stage of the research, an attempt was made to granulate the powder on the pellet granulator by the rolling method (Figure 1.)

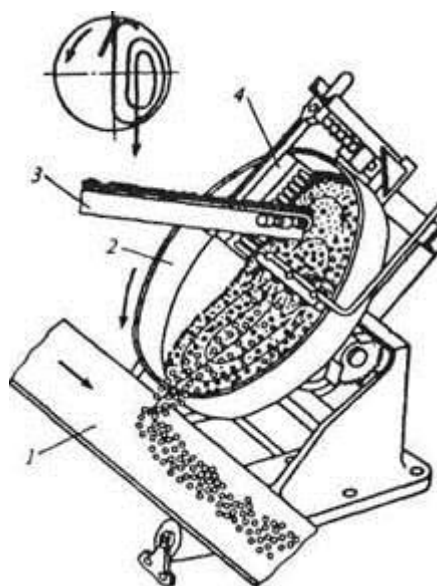


Figure 1. Disc pelletizer:

- 1- conveyor for removing granules; 2 - a plate;
- 3 - powder feeding tray; 4 - scrapers.

The polypropylene powder is fed to a disk rotating at a speed of 30 rpm. The angle of inclination of the plate is  $60^\circ$ . Granulation takes place within 30 minutes. As the binding liquid, a solution of atactic polypropylene in nephras and a solution of dilaurylthiodipionate ( $\text{DLTDP-C}_{12}\text{H}_{25}\text{COO} ((\text{CH}_2)_9)_2\text{S}$ ) in nephras was used. When the plate rotates, the powder particles are thrown back against the wall under the influence of the centrifugal force. Part of the powder is captured by the wall and rises to a certain height, and then falls and slides down. When lifting, the particles move together with the wall, practically not moving relative to each other. Upon reaching a certain height, depending on the weight of the particle, the

rotation speed of the wall and the angle of the natural slope, the granule under the action of gravity slides downward.

In the process of rolling, a homogeneous mass was formed, which could not be granulated. Cleaning of the powder from impurities was also not possible.

At the second stage of the research, it was decided to change the granulation method. To obtain granules from PP wastes, the method of granulation in a liquid medium (the GLM method) was chosen. The essence of the GLM method is that the PP particles are placed in a dispersion medium, and then the binding liquid is added. The three-phase system is subjected to hydrodynamic effects, and after a certain period of time granules are formed which are separated from the dispersion medium and dried. Implementation of the GLD process is possible only if the following rules are observed: the surface of solid particles must have a polarity opposite to the polarity of the dispersion medium; The binding liquid must be unipolar with the surface of the granulated particles.

As a dispersion medium, distilled water was used, and the binder liquid was a DLDDP powder that did not dissolve in water and alcohols and was used as a secondary antioxidant with plasticizing properties. The melting point of the DLTDP is 42 ° C.

The experimental procedure is as follows. In a glass beaker with a volume of 600 ml, 200-250 ml of water are poured in, preheated to 50-60 ° C (Figure 4.2). In the hot water, a sample of DLTDP powder is poured, which melts to liquid state and is a binder liquid. Then, a propeller agitator rotating at a speed of 100-150 rpm is turned on. The speed of rotation of the agitator is adjusted so that granules with a diameter of 3-5 mm are formed. After this, a sample of powdered PP is added and within 5-7 minutes granules are formed.

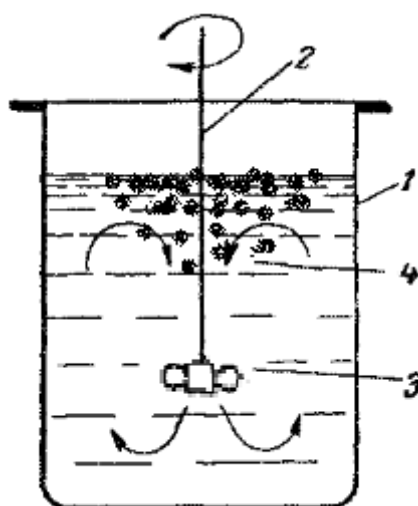


Figure 2. Installation for granulation in liquid:

- 1 glass; 2 - agitator shaft; 3- propeller stirrer;  
4 - polypropylene powder

After the granules are formed, 200 ml of cold water are poured into the beaker to lower the temperature of the dispersion medium to 20-25 ° C and solidify the granules that are separated from the aqueous medium by means of a screen and dried at room temperature.

In the course of the experiments, the mass ratio of the PP powder to the DLTDP was varied, as was the amount of the dispersion medium (Table 1).

Table 1 - Experiment Parameters

The amount of water, ml	Hinge of PP, g	Sling DLTDP, g	Content of DLTDP in granules, %	Solids content in water, %
250	2	1	33,3	1,2
	2,5	1	28,6	1,4
	3	1	25,0	1,6
	3,5	1	22,2	1,8
	4	1	20,0	2,0
	2	2	50,0	1,6
	6	2	25,5	3,2
150	3	1	25,5	2,6

The dried granules were tested for strength under static conditions. Previously, pellets were measured in two sections and with the help of the device MP-9C uniform loading of the granule was carried out before destruction.

The results are shown in Table 2. Based on the results of the calculations, a plot was constructed of the dependence of the strength of the granules on the content of the DLTDP binder liquid (Figure 3).

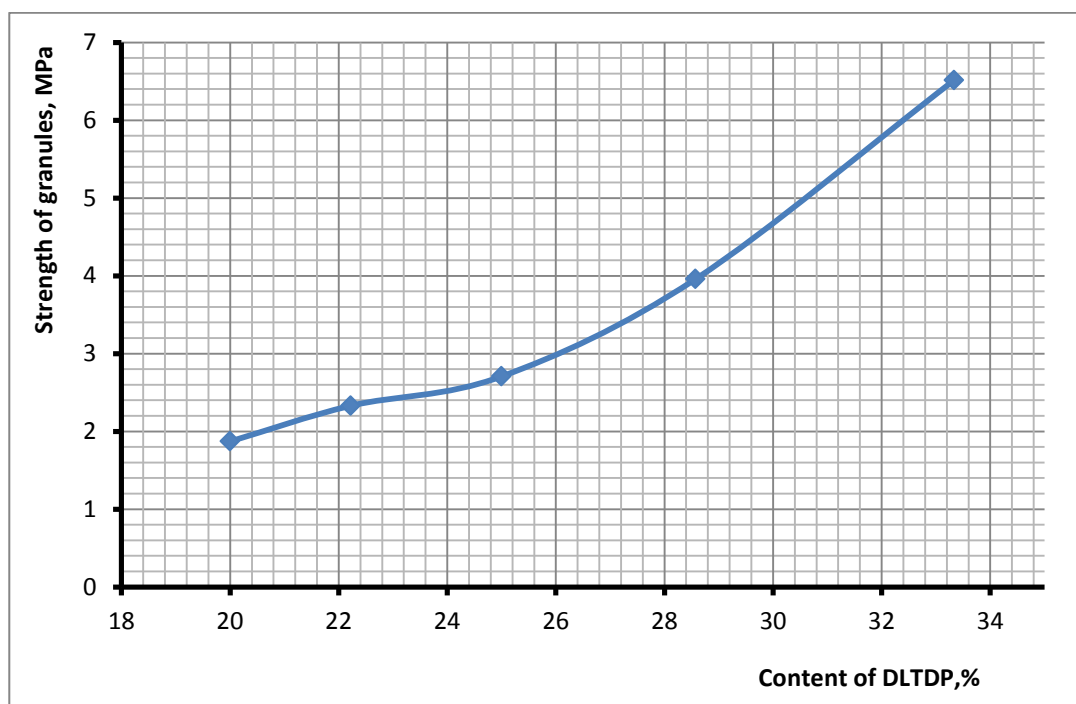


Figure 3. Dependence of the strength of granules on the content of DLTDP

It can be seen from the graph that the strength of the granules increases with increasing concentration of DLDDP in the granule. Thus, with a 20% content of DLDDP in the granule, the crushing strength is 1.87 MPa, and at 33% binder content the strength of the granules increases 3.3 times and is 6.52 MPa. As the results showed, the granules obtained are sufficiently strong for their further operation: transportation, dosing, etc. Therefore, an increase in the amount of binder liquid in the granules is impractical, since it leads to an increase in the consumption of DLTDP.

Samples of granules obtained under different regimes are presented in photo 1-8.









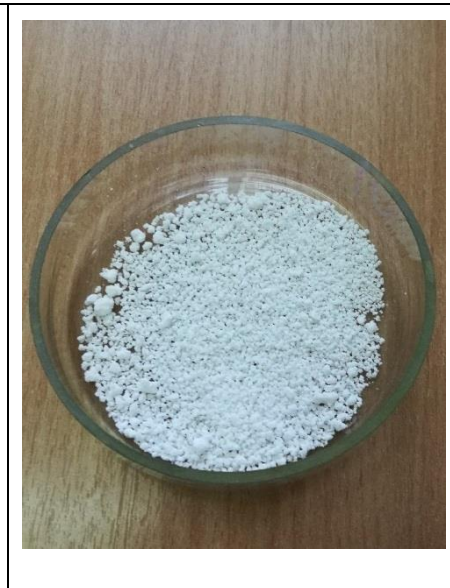

## Conclusions

1. The optimum mode of granulation of powdered polypropylene wastes by the method of GZHS is determined: the temperature of the dispersion medium is 50-60 ° C, the agitator rotation speed is 150 rpm, the granulation time is 7 min.
2. A binding fluid was selected, a dilaurylthiodipropionate powder having a melting point of 42 ° C.
3. Mass ratio dispersion medium: precipitate: binding liquid-water: PP: DLTDP-is 150-250: 1: 2-4.
4. The strength of granules for crushing under static conditions is determined to be 1.87-6.51 MPa

**Table 2. Results of testing the strength of granules.**

<b>Ratio: PP / DLDTP</b>	<b>Sample No.</b>	<b>d.1</b>	<b>d.2</b>	<b>d cp</b>	<b>S, mm<sup>2</sup></b>	<b>S, m<sup>2</sup></b>	<b>Load, g</b>	<b>Force, N</b>	<b>Hardness, Pa</b>	<b>Hardness, MPa</b>	<b>Medium hardness, MPa</b>
2 //1	1	4	3,5	3,75	11,03906	1,1E-05	705	6,909	625868,4	6,258684	6,513971256
	2	3,2	3,6	3,4	9,0746	9,07E-06	510	4,998	550768,1	5,507681	
	3	2,1	3	2,55	5,104463	5,1E-06	405	3,969	777554,9	7,775549	
2,5//1	1	5,9	3	4,45	15,54496	1,55E-05	520	5,096	327823,2	3,278232	3,957562388
	2	3,1	6,1	4,6	16,6106	1,66E-05	650	6,37	383490,1	3,834901	
	3	3,2	4,8	4	12,56	1,26E-05	610	5,978	475955,4	4,759554	
3//1	1	5,2	3,4	4,3	14,51465	1,45E-05	520	5,096	351093,6	3,510936	2,706710321
	2	7,1	4,3	5,7	25,50465	2,55E-05	550	5,39	211334	2,11334	
	3	5,9	4,3	5,1	20,41785	2,04E-05	520	5,096	249585,5	2,495855	
3,5//1	1	3,1	5,1	4,1	13,19585	1,32E-05	410	4,018	304489,7	3,044897	2,329774915
	2	3,9	3,5	3,7	10,74665	1,07E-05	290	2,842	264454,5	2,644545	
	3	4,1	5,7	4,9	18,84785	1,88E-05	250	2,45	129988,3	1,299883	
4//1	1	4	3,8	3,9	11,93985	1,19E-05	220	2,156	180571,8	1,805718	1,871322401
	2	5,1	5,3	5,2	21,2264	2,12E-05	430	4,214	198526,4	1,985264	
	3	3,2	5,4	4,3	14,51465	1,45E-05	270	2,646	182298,6	1,822986	

			
<b>Photo 1. Ratio: PP / DLDTP: 2.5 / 1</b>	<b>Photo 2. Ratio: PP / DLDTP: 2 / 1</b>	<b>Photo 3. Ratio: PP / DLDTP: 2 / 2</b>	<b>Photo 4. Ratio: PP / DLDTP: 3.5 / 1</b>

			
<p><b>Photo 5. Ratio: PP / DLDTP: 3 / 1, V=150 ml/</b></p>	<p><b>Photo 6. Ratio: PP / DLDTP: 3 / 1</b></p>	<p><b>Photo 7. Ratio: PP / DLDTP: 4 / 1</b></p>	<p><b>Photo 8. Ratio: PP / DLDTP: 6 / 2</b></p>