

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



Институт природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность) – 21.04.01 «Нефтегазовое дело»  
 Профиль – «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»  
 Кафедра – Транспорта и хранения нефти и газа

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
«Оптимизация конструкции адсорбера с внутренней огнеупорной изоляцией в технологиях подготовки газа к транспорту»

УДК 665.7.038:532.542.4

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5Б	Дедеев П.О.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Харламов С.Н.	д.ф.-м.н, профессор		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Шарф Ирина Валерьевна	К.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер	Маланова Наталья Викторовна	К.т.н., инженер		

Консультант-лингвист

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Коротченко Татьяна Валериевна	К.ф.н., доцент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТХНГ	Бурков Пётр Владимирович	Д.т.н., профессор, и.о. зав.кафедры		

Томск – 2017г.

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



Институт природных ресурсов  
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»  
 Профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»  
 Кафедра Транспорта и хранения нефти и газа

УТВЕРЖДАЮ:  
 И.о. зав. кафедрой  
 \_\_\_\_\_ Бурков П.В.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ5Б	Дедееву Павлу Олеговичу

Тема работы:

«Оптимизация конструкции адсорбера с внутренней огнеупорной изоляцией в технологиях подготовки газа к транспорту»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	19.04.2017, №2696/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p><b>Объект исследования:</b> адсорберы установок подготовки газа к транспорту;  <b>Сырьё:</b> природный газ  <b>Рабочие параметры установки подготовки газа к транспорту и адсорберов линии осушки:</b> диаметр адсорбера 3.6/4.4 м, расчетное давление 9.7 МПа, высота от входного отверстия крышки до выходного отверстия днища – 10/6 м, максимальная температура газа регенерации – 300 °С, перекачиваемая среда – природный газ с известным компонентным составом. Массовый расход газа -125700 кг/ч, плотность газа - 25.14 кг/м<sup>3</sup> при температуре газа регенерации 288 °С</p>
---	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Обзор по литературным источникам с целью выявления возможных путей оптимизации конструкции адсорберов установок подготовки газа к транспорту.</p> <p>Задача исследования: разработка рекомендации по конструкции адсорбера с внутренней изоляцией в технологиях подготовки газа к транспорту.</p> <p>Построение алгоритма расчета и отчет по проводимым расчетам</p> <p>Построение методики экономического расчета</p> <p>Обсуждение полученных результатов.</p> <p>Дополнительные разделы: социальная ответственность.</p> <p>Заключение по выполненной работе</p>
--	--

<p><b>Перечень графического материала</b></p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>-</p>
--	----------

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Шарф Ирина Валерьевна., к.э.н., доцент кафедры ЭПР
«Социальная ответственность»	Маланова Наталья Викторовна., к.т.н., инженер

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

1 Литературный обзор
2 Объект и методы исследования
3 Расчетно-аналитическая часть
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение
5 Результаты и их обсуждение
6 Социальная ответственность

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

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ТХНГ	Харламов Сергей Николаевич	д.ф.-м.н., профессор		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5Б	Дедеев Павел Олегович		

**ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ**  
**«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕДИНЕНИЕ И**  
**РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
2БМ5Б	Дедееву Павлу Олеговичу

<b>Институт</b>	<b>Природных ресурсов</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Транспорта и хранения нефти и газа</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	21.04.01 «Нефтегазовое дело», Профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Для формирования стоимости технологического оборудования (адсорберы установки подготовки газа к транспорту) использовать затратный подход с использованием метода поэлементного расчета.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Данные по методу определения стоимости технологического оборудования, в частности: - $\delta Ц_{э}$ – удельную приведенную стоимость 1 кг оборудования «индивидуального» изготовления определить на основании открытых данных о стоимости конструкционных сталей; - Коэффициенты $K_T$ (трудоемкости), $K_C$ (стоимости), $K_{\Sigma}$ (обобщенный показатель стоимости по группам материалов) определить на основе статьи “Праведников И.С. Сравнительный метод оценки стоимости нефтехимического оборудования.”
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Налоговый кодекс РФ Ф3-213 от 24.07.2009 в редакции от 19.12.2016 № 444-ФЗ

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	Подготовка экономических данных для итогового комплексного анализа рассчитанных вариантов адсорбера
2. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Исходные данные для экономического расчета Сформулировать исходные данные для проведения экономической части исследования. Формулировку провести на основе гидравлического, теплотехнического и прочностного расчета. Необходимо назначить – толщины обечайки, днища и крышки адсорбера, а также его массы в зависимости от толщины внутренней огнеупорной футеровки.
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Привести пример расчета адсорберов с рабочими параметрами: а) $D_{вн}=4.4$ м и $P=9,7$ МПа и б) $D_{вн}=3.6$ м и $P=9,7$ МПа (например, для толщины футеровки $h_f=100$ мм) Сформулировать рекомендации экономического характера для дальнейшего обсуждения в Главе 5 ВКР.

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

1. *Расчетные формулы:*
  - Полная себестоимость оборудования индивидуального изготовления
  - Формулы для расчета массы обечайки, днища и крышки.

<p>2. <i>Таблицы:</i>  Значение коэффициентов <math>K_T</math>, <math>K_C</math> и <math>K_\Sigma</math> по группам материалов</p> <p>3 <i>Рисунки:</i>  – Алгоритм экономического расчета  – Рассчитанные стоимости адсорберов для двух исполнений в интервале толщин изоляции 10-400 мм</p>
---

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭПР	Шарф И. В.	К.э.н, доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5Б	Дедеев Павел Олегович		

## ЗАДАНИЕ К РАЗДЕЛУ «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ5Б	Дедеев Павел Олегович

Институт	ИПР	Кафедра	Транспорта и хранения нефти и газа)
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	21.04.01 «Нефтегазовое дело», Профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»

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

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения
2. Описание рабочей зоны на предмет возникновения:
  - вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)
  - опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)
  - негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)
  - чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)
3. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме

1. Адсорберы в составе установки подготовки газа к транспорту – опасный производственный объект. В установке подготовки газа к транспорту ведётся глубокая осушка и отбензинивание природного газа.
2. При проектировании, эксплуатации и монтаже установок подготовки газа к транспорту (УПГТ) следует учитывать возможность возникновения в рабочей зоне следующих факторов:
  - **Вредных:** метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации.
  - **Опасных:** механическое травмирование рабочего персонала при несоблюдении техники безопасности или аварийном состоянии объектов УПГТ, термическое воздействие вследствие горения, взрывов горючих веществ, жидкостей и их паров. В результате проявления вышеперечисленных факторов возможно возникновение негативного влияния на **атмосферу, гидросферу, литосферу**. Кроме того:
  - Высока вероятность **ЧС** техногенного (аварийное состояние оборудования, инциденты на производстве), стихийного (неблагоприятные условия окружающей среды), экологического (превышение допустимых выбросов, сбросов, загрязнение почвы, атмосферы и литосферы) и социального (террористические акты) характеров.
3. **Законодательные и нормативные документы**  
 ГН 2.2.5.1313-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны  
 ВСН 34-91 «Отраслевые нормы искусственного освещения предприятий нефтяной и газовой промышленности»;  
 ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные факторы»;  
 ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности;  
 ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность»;  
 СанПиН 2.2.4.548 – 96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений»  
 ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»;  
 ГОСТ Р 51330.19 – 99 «Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 20: Данные по горючим газам и парам, относящиеся к эксплуатации электрооборудования»  
 ПБ 08-624-03 «Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности  
 ПТЭ Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей  
 ГОСТ 12.1.007 «Вредные вещества»;  
 ГОСТ 12.1.011-78\* «Классификация взрывоопасных смесей»;  
 РД 34.21.122-87 «Инструкция по молниезащите зданий и сооружений».  
 СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах»;  
 СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».  
 ФЗ от 28.12.13 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда», ст.147 ТК РФ и ст.117 ТК РФ  
 ФЗ от 28.12.2013 № 421-ФЗ «О рабочем времени», ст.94 ТК РФ

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. **Производственная безопасность:**  
1.1 Анализ вредных факторов при эксплуатации УПГТ;

- 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при эксплуатации УПГТ произвести в следующей последовательности:

<p>1.2 Анализ опасных производственных факторов при эксплуатации УПГТ;</p> <p>1.3 Обоснование мероприятий по защите персонала УПГТ от действия опасных и вредных факторов.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью;</li> <li>– предлагаемые средства защиты (КСЗ и ИСЗ).</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации УПГТ в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты)</li> </ul> <p>1.3. Перечислить превентивные меры по защите персонала УПГТ от действия опасных и вредных факторов.</p>
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <p>2.1 Анализ воздействия УПГТ на атмосферу и защитные меры;</p> <p>2.2 Анализ воздействия УПГТ на гидросферу и защитные меры;</p> <p>2.3 Анализ воздействия УПГТ на литосферу и защитные меры;</p> <p>2.4 Анализ воздействия УПГТ на селитебную зону и защитные меры.</p>	<p>УПГТ оказывает воздействие на окружающую среду:</p> <p>2.1 Атмосферу (выбросы метана, углекислого газа, предельных углеводородов и др., сжигание остатков нестабилизированного конденсата);</p> <p>2.2 гидросферу (сбросы в сточные воды отходов производственной деятельности);</p> <p>2.3 литосферу (захоронения отходов производственной деятельности).</p> <p>2.4 селитебную зону (при несоблюдении дистанции охранной зоны).</p> <p>В каждом пункте привести списки защитных мер по предотвращению воздействия на окружающую среду.</p>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p>	<p>Чрезвычайные ситуации:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Привести перечень возможных ЧС на объекте;</li> <li>– Разработать превентивные меры по предупреждению ЧС и по повышению устойчивости УПГТ к ЧС;</li> <li>– Разработать перечень действий в случае ЧС техногенного характера и мер по ликвидации её последствий.</li> </ul>
<p><b>4 Организационные мероприятия обеспечения безопасности на УПГТ:</b></p> <p>4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства;</p> <p>4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	<p>Среди мер по обеспечению безопасности на УПГТ проработать следующие пункты:</p> <p>4.1 Проанализировать и перечислить специальные правовые нормы трудового законодательства для рабочего персонала УПГТ;</p> <p>4.2 Перечислить существующие организационные мероприятия по компоновке рабочей зоны УПГТ</p>
<p><b>Перечень графического материала:</b></p>	
<p><i>При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)</i></p>	<p>-</p>

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Инженер	Маланова Наталья Викторовна	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5Б	Дедеев Павел Олегович		

**Планируемые результаты обучения магистрантов**

№	Результаты обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
1	2	3
<b>Р1</b>	Применять естественнонаучные, математические, гуманитарные, экономические, инженерные, технические и глубокие профессиональные знания в области современных нефтегазовых технологий для решения <i>прикладных междисциплинарных задач и инженерных проблем</i> , соответствующих профилю подготовки (в нефтегазовом секторе экономики)	ОК-1; ОК-2; ОК-3, ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-6; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-6; ПК-7; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-16; ПК-17; ПК-19; ПК-20; ПК-21; ПК-23
<b>Р2</b>	Планировать и проводить аналитические и экспериментальные <i>исследования</i> с использованием новейших достижений науки и техники, уметь критически оценивать результаты и делать выводы, полученные в <i>сложных и неопределённых условиях</i> ; использовать <i>принципы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности</i>	ОК-1; ОК-2; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-6; ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-15; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-20; ПК-22; ПК-23
<b>Р3</b>	Проявлять профессиональную <i>осведомленность о передовых знаниях и открытиях</i> в области нефтегазовых технологий с учетом <i>передового отечественного и зарубежного</i> опыта; использовать <i>инновационный подход</i> при разработке новых идей и методов <i>проектирования</i> объектов нефтегазового комплекса для <i>решения инженерных задач развития</i> нефтегазовых технологий, <i>модернизации и усовершенствования</i> нефтегазового производства.	ОК-1; ОК-2; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-3; ОПК-6; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-2; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-11; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-18; ПК-20; ПК-21; ПК-22; ПК-23

№	Результаты обучения	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
1	2	3
Р4	<i>Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные машины и механизмы для реализации технологических процессов нефтегазовой области, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда, выполнять требования по защите окружающей среды.</i>	ОК-2; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-3; ПК-6; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-14; ПК-16; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-21; ПК-22;
Р5	Быстро ориентироваться и выбирать оптимальные решения в многофакторных ситуациях, владеть методами и средствами математического моделирования технологических процессов и объектов	ОК-2; ОК-3; ОПК-1; ОПК-2; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-7; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-17; ПК-20;
Р6	Эффективно использовать любой имеющийся арсенал технических средств для максимального приближения к поставленным производственным целям при разработке и реализации проектов, проводить экономический анализ затрат, маркетинговые исследования, рассчитывать экономическую эффективность.	ОК-2; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-3; ПК-4; ПК-5; ПК-6; ПК-8; ПК-9; ПК-10; ПК-11; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-16; ПК-17; ПК-18; ПК-19; ПК-20; ПК-21; ПК-22; ПК-23
Р7	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя команды, умение формировать задания и оперативные планы всех видов деятельности, распределять обязанности членов команды, готовность нести ответственность за результаты работы	ОК-1; ОК-2; ОК-3; ОПК-1; ОПК-2; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-6; ПК-6; ПК-11; ПК-12; ПК-13; ПК-14; ПК-15; ПК-23
Р8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности; активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию и защищать результаты инженерной деятельности	ОК-1; ОК-2; ОК-3; ОПК-2; ОПК-3; ОПК-4; ОПК-5; ОПК-7, ОПК-8, ПК-1; ПК-8; ПК-23

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 150 с., 32 рис., 24 табл., 42 источника.

Ключевые слова: адсорбер, конструкция адсорбера, установка подготовки газа к транспорту, осушка газа, природный газ.

Объектом исследования в настоящей работе являются адсорберы установок подготовки газа к транспорту.

Предмет исследования – пути оптимизации конструкции адсорберов. Для проведения расчетов используются следующие исходные данные.

Цель работы – разработка рекомендации по конструкции адсорбера с внутренней изоляцией в технологиях подготовки газа к транспорту.

В процессе исследования проводились гидравлические расчеты, теплотехнический расчет зависимости температуры стенки от толщины изоляции, прочностные расчеты с целью построения зависимостей толщины стенки обечайки, днища и крышки адсорбера в зависимости от температуры, толщины изоляции и конструкционного материала. Рассмотрены возможные способы оптимизации конструкции адсорбера на ранних стадиях проектирования. Показано, каким образом можно оптимизировать конструкцию адсорбера с точки зрения итоговой массы и стоимости изготовления адсорбера. Приведены опасные и вредные производственные факторы, которые могут возникнуть при эксплуатации адсорберов в установках подготовки газа к транспорту, а также перечислены мероприятия по охране труда и промышленной безопасности при их эксплуатации.

В результате исследования были составлены рекомендации по проектированию адсорберов в установках подготовки газа. Выявлено, что при использовании внутренней изоляции допускается оптимизировать конструкцию адсорбера за счет снижения температуры эксплуатации конструкционной стали.

Степень внедрения: настоящие рекомендации на текущий момент **не использовались** для проектирования адсорберов установок подготовки газа.

Область применения: адсорберы узла осушки установок подготовки природного газа к транспорту.

Экономическая эффективность/значимость работы заключается в возможности экономии в финансовом эквиваленте за счет выбора конструкционного материала и более точного теплотехнического и прочностного расчета.

В будущем планируется проведение нестационарного теплотехнического расчета для учета влияния твердого сорбирующего материала на температуру конструкционного материала. Кроме того, существует необходимость в точном расчете интервалов переключения адсорберов в режиме регенерации.

## Annotation

Master thesis, 150 pages, 32 figures, 24 tables, 42 sources.

Key words: adsorber, adsorber design, gas pre-treatment unit, gas drying, natural gas.

The research object is adsorbers of gas pre-treatment units.

The research subject is ways of adsorber design optimization.

The research task is to develop recommendations for the adsorber design taking into account internal fireproof insulation widely used in gas pre-treatment technologies.

In this research hydraulic calculations were carried out, the heat analysis of wall temperatures depending on insulation thickness was conducted, strength analysis for of shell, bottom and top section was also carried out. Several types of steels were considered as possible structural materials for adsorber design. Preferable ways of design optimization in the early stages of project initiation were considered. It was shown how to optimize the adsorber design in terms of the total mass and its estimated cost. Dangerous and harmful production factors that may arise during the operation in gas treatment facilities were listed, as well as measures to protect working staff and to ensure industrial safety during their operations.

As a research result, recommendations were provided on the adsorber design in gas pre-treatment facilities. It was revealed that the usage of internal insulation allows optimizing the adsorber design by reducing the operating temperature of structural steel.

Implementation level: these recommendations have not been used in designing adsorbers for gas pre-treatment units for present moment.

Implementation area: adsorbers of the natural gas dehydration units.

The economic efficiency/significance of the research is in the reduction of adsorber financial costs due to optimal choice of structural material and accurate heat and strength analysis.

In the future, a non-stationary heat analysis is going to be provided, which will take into account the effect of solid sorbing material on the steel wall temperature. In addition, there is a need of an accurate calculation of the adsorbers switching intervals in regeneration modes.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ГОСУДАРСТВЕННЫХ СТАНДАРТОВ

В настоящей выпускной квалификационной работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ВСН 315-80. Инструкции по проектированию футеровок тепловых агрегатов нефтеперерабатывающей промышленности из легкого жаростойкого бетона и теплоизоляционных материалов. – М.: ММСС СССР, 1981. – 22 с.
2. ВСН 34-91. Отраслевые нормы искусственного освещения предприятий нефтяной и газовой промышленности. – М.: Миннефтегазпром СССР, 1991. – 57 с.
3. ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
4. ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные факторы. – М.: ИПК Издательство Стандартов, 2000. – 4 с.
5. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2015. – 27 с.
6. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. – М.: ИПК Издательство Стандартов, 1996. – 83 с.
7. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – М.: Стандартинформ, 2008. – 50 с.
8. ГОСТ 12.1.007-76\* Вредные вещества. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 3 с.
9. ГОСТ 12.1.011-78\*. Классификация взрывоопасных смесей. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 22 с.
10. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Методы расчета на прочность. – М.: ИПК Издательство Стандартов, 2017. – 49 с.
11. ГОСТ 25215-82. Обечайки и днища. Нормы и методы расчета на прочность. – М.: Государственный Комитет СССР по стандартам, 1983. – 7 с.
12. ГОСТ 30319.3-2015. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о компонентном составе. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
13. ГОСТ Р 51274-99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и метод расчета на прочность. – М.: Стандартинформ, 2000. – 11 с.
14. ГОСТ Р 51330.19 – 99. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 20: Данные по горючим газам и парам, относящиеся к эксплуатации электрооборудования. – М.: Стандартинформ, 2007. – 24 с.
15. 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. – М.: Стандартинформ, 2007. – 23 с.
16. ПБ 08-624-03. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности. – М.: ПИО ОБТ, 2003. – 46 с.

17. ПТЭ Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. М.: Энергосервис, 2003. – 128 с.
18. РД 34.21.122-87. Инструкция по молниезащите зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 47 с.
19. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Минздрав России, 1997. – 25 с.
20. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 18 с.
21. СНиП 23-05-95\*. Естественное и искусственное освещение. – М.: ЦПП, 2011. – 70 с.
22. СТО Газпром 089-2010. Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия. – М.: Информационно-рекламный центр газовой промышленности, 2010. – 412 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	17
Глава 1 – Литературный обзор.....	19
1.1 Общее описание проблемы .....	19
1.2 Конструкция адсорбера .....	19
1.2.1 Технические сведения о конструкции адсорберов.....	19
1.2.2 Материалы адсорбера .....	21
1.2.2 Типы изоляционных покрытий адсорберов .....	25
1.3 Методика расчета адсорбера .....	26
1.3.1 Метод расчета динамической вязкости природного газа .....	26
1.3.2 Теплоотдача при вынужденном движении текучей среды .....	29
1.3.3 Тепловой поток через цилиндрическую стенку и расчет температуры многослойной стенки .....	32
1.3.4 Расчет толщины стенки адсорберов.....	34
1.4 Варианты использования адсорберов на примере проектов ПАО «Газпром» .....	38
1.4.1 Общие сведения о подготовке газа к транспорту.....	38
1.4.2 Требования к качеству подготовки природного газа на УПГТ .....	41
1.4.3 Общая схема установки подготовки газа к транспорту.....	41
1.4.4 Общие принципы расчета процесса адсорбции.....	43
1.4.5 Процесс компании basf Catalyst Germany .....	43
1.4.6 Процесс компании «Advantica Technologies Ltd».....	44
1.5 Выводы по Главе 1 и возможные пути оптимизации конструкции адсорбера .....	45
Глава 2 Объект и методы исследования.....	47
2.1 Исходные данные для проведения расчетов.....	47
2.2 Алгоритм проведения расчетов.....	48
2.3 Методы исследования.....	49
Глава 3 Расчетно-аналитическая часть.....	50
3.1 Обработка экспериментальных данных .....	50
3.2 Газодинамический расчет .....	51
3.3 Тепловой расчет адсорбера .....	51
3.3.1 Расчет коэффициента теплоотдачи “газ-стенка” .....	51
3.3.2 Вычисление зависимости температуры металла стенки от толщины изоляции.....	52
3.4 Прочностной расчет .....	54
3.4.1 Анализ и подбор аппроксимирующих функций для физических характеристик сталей адсорберов .....	55
3.4.2 Зависимость толщины стенки адсорбера от толщины изоляции и типа стали ...	59
3.4.3 Зависимость толщины стенки адсорбера от давления с учетом температуры и типа стали .....	60
Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	62
4.1 Теоретическая справка .....	62
4.2 Исходные данные для экономического расчета .....	63
4.3 Алгоритм экономического расчета .....	64
4.4 Расчет адсорбера с $D_{вн}=4.4$ м и $P=9,7$ МПа .....	66
4.5 Расчет адсорбера с $D_{вн}=3.6$ м и $P=9,7$ МПа .....	66
4.6 Выводы по Главе 4 и Обсуждение некоторых результатов .....	67
Глава 5 Результаты и их обсуждение.....	69
5.1 Зависимость изменения температуры вдоль толщины стенки обечайки.....	69

5.2	Зависимость изменения температуры внутренней стальной стенки адсорбера от толщины внутренней изоляции .....	69
5.3	Зависимость толщины стенки адсорбера от давления с учетом температуры и типа стали .....	70
5.4	Зависимость толщины металлической стенки от типа стали и толщины изоляции ..	78
5.5	Зависимости массы адсорбера от типа стали и толщины изоляции.....	80
5.6	Зависимость рассчитанной стоимости адсорбера от типа стали и толщины изоляции .....	81
Глава 6 Социальная ответственность .....		83
6.1	Производственная безопасность.....	85
6.1.1	Анализ вредных факторов при эксплуатации УПГТ .....	85
6.1.2	Анализ опасных производственных факторов при эксплуатации УПГТ .....	88
6.1.3	Обоснование мероприятий по защите персонала УПГТ от действия опасных и вредных факторов .....	91
6.2	Региональная безопасность .....	96
6.2.1	Анализ воздействия УПГТ на атмосферу и защитные меры.....	96
6.2.2	Анализ воздействия УПГТ на гидросферу и защитные меры .....	97
6.2.3	Анализ воздействия УПГТ на литосферу и защитные меры .....	99
6.2.4	Анализ воздействия УПГТ на селитебную зону и защитные меры .....	100
6.3	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	100
6.4	Организационные мероприятия обеспечения безопасности на упгт .....	103
6.4.1	Специальные правовые нормы трудового законодательства .....	103
6.4.1	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.....	104
Заключение .....		106
Список публикаций .....		109
Список использованных источников .....		112
Приложение А – Схема адсорбера .....		115
Приложение Б – Функция для расчета допускаемых напряжений для стали 09Г2С .....		116
Приложение В – Функция для расчета допускаемых напряжений для стали 15Х5М .....		117
Приложение Г – Функция для расчета допускаемых напряжений для стали SA-533М ....		118
Приложение Д – Функция для расчета допускаемых напряжений для стали AISI 304SS		119
Приложение Е – Расчет динамической вязкости в iPython 3.6.....		120
Приложение Ж – Газодинамический и теплотехнический расчет .....		122
Приложение З – Прочностной расчет адсорбера с $D_{вн}=4.4$ м и $P=9.7$ МПа.....		126
Приложение К – Прочностной расчет адсорбера с $D_{вн}=3.6$ м и $P=9.7$ МПа.....		129
Приложение Л – Экономический расчет адсорберов .....		132
Приложение М – Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке.....		136
5.1	Temperature analysis of tank wall.....	137
5.2	'Temperature vs insulation thickness' analysis.....	137
5.3	Thickness of steel wall as a function of pressure, temperature and types of steel ....	138
5.4	Dependencies of wall thickness on steel types and insulation thickness.....	146
5.5	Dependency of tank mass on steel type and insulation thickness.....	148
5.6	Estimated cost vs insulation thickness, mass and steel type.....	149

## **ВВЕДЕНИЕ**

Прежде чем дойти до потребителя, природный газ проходит сложный и продолжительный путь – от месторождения до газораспределительной станции. В результате перед подачей газа на экспорт в нём скапливаются нежелательные примеси – вода и тяжелые углеводороды. Перед подачей природного газа потребителю их содержание необходимо снизить, чтобы предотвратить образование опасных кристаллогидратов. С этой целью применяются установки подготовки газа к транспорту.

На установках подготовки газа к транспорту с помощью циклического процесса осуществляется осушка природного газа. Осушка происходит в сосудах под давлением – адсорберах. Из-за больших объёмов перекачки газа и значительного объема загружаемого адсорбента масса адсорберов может достигать несколько сотен тонн. В виду того, что на установках подготовки газа к транспорту ПАО «Газпром» обычно комплектуется имеется несколько линий осушки по 5÷6 адсорберов в каждой, то общая масса оборудования увеличивается на порядок.

Современные технологические тренды требуют от новых проектов ресурсоэффективности и ресурсосбережения, и установки подготовки газа к транспорту не являются исключением. Даже небольшое снижение толщины стенки или расхода топливного газа ведёт к значительному сбережению ресурсов. Это придаёт актуальности вопросу оптимизации конструкции адсорбера.

Известно, что определяющими факторами в конструировании адсорберов являются давление и конструкционный материал, но важную роль играют также и попутные факторы – тип изоляционного покрытия и расчетная температура. В настоящей работе авторы задались вопросом – как же все эти факторы влияют на итоговую конструкцию адсорбера, и какие рекомендации можно дать по конструкции адсорбера для учета в будущих проектах. Поэтому цель исследования была сформулирована следующим образом.

**Цель:** разработка рекомендаций по конструкции адсорбера с внутренней изоляцией в технологиях подготовки газа к транспорту.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи:**

1. Провести аналитический обзор возможностей оптимизации адсорберов в технологиях подготовки газа к транспорту;
2. Описать методику и программу расчета теплопередачи через стенку адсорбера с внутренней изоляцией
3. Экспериментально определить порозность слоя сорбента в адсорбере;
4. Определить зависимость расчетной температуры стенки адсорбера от толщины внутренней изоляции;
5. Определить зависимость толщины стенки адсорбера от толщины внутренней изоляции и марок стали для сталей 09Г2С, SA-533М, 15Х5М и AISI 304SS;
6. Рассчитать стоимость адсорберов с различной толщиной внутренней изоляции и марок стали;

7. Определить оптимальную стоимость адсорбера в зависимости от толщины стенки, толщины изоляции и вида стали.
8. Разработать рекомендации по оптимизации адсорберов в технологиях подготовки газа к транспорту.

**Объектом исследования** в настоящей работе являются адсорберы установок подготовки газа к транспорту.

**Предмет исследования** - пути оптимизации конструкции адсорберов.

**Научная новизна** заключается в анализе влияния широкого интервала толщины изоляции и давления на толщину стенки обечайки, крышки и днища адсорбера.

**Практическая значимость** выпускной квалификационной работы заключается в возможности использования рекомендаций по конструкции адсорберов в проектирующих организациях газовой промышленности (ПАО «Газпром» - «Газпром Проектирование»), инженерно-научными коллективами, проектно-конструкторскими бюро и т.д.

**Апробация работы** производилась на Всероссийском конкурсе научных работ студентов выпускного курса, проводимого Санкт-Петербургским Минерально-Сырьевым Горным Университетом, где была удостоена дипломом II степен

# ГЛАВА 1 – ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Общее описание проблемы

Перед подачей газа Заказчику, необходимо предварительно провести осушку и отбензинивание природного газа. Для этих целей служат установки подготовки газа к транспорту. Помимо общей сложности технологического процесса, такие установки являются весьма металлоёмкими. Например, масса одного адсорбера из блока осушки может достигать 400 тонн. Даже незначительное уменьшение толщины стенки адсорбера вызывает большие изменения итоговой массы, а, следовательно, и снижение общей металлоёмкости. Таким образом, оптимизация адсорберов УПТГ может осуществляться множеством способов, но один из самых эффективных – снижение металлоёмкости.

Факторами, влияющими на массу адсорбера, являются давление и конструкционный материал, но важную роль играют также и попутные факторы – тип изоляционного покрытия и расчетная температура. Кроме этих факторов, на задачу оптимизации конструкции адсорбера влияют и современные тренды рынка и политики импортозамещения. Возникает задача замены зарубежных разработок аналогичными российскими, из-за чего необходимо не только найти аналогичные материалы, но и оптимизировать их так, чтобы сократить материальные и финансовые расходы. Для установок подготовки газа это касается изоляции и материала адсорбера.

Для анализа факторов, влияющих на конструкцию адсорбера, требуется сформировать исходные данные к расчетам. Для формулировки исходных данных необходимо предварительно проанализировать конструкционные особенности адсорберов, свойства материалов, технологические схемы, используемые в осушке газа, методы расчета адсорберов, а также варианты использования адсорберов в газовой промышленности. Именно этим темам посвящена Глава 1

## 1.2 Конструкция адсорбера

### *1.2.1 Технические сведения о конструкции адсорберов*

Конструктивно адсорбер состоит из следующих частей: подводный и отводящий трубопроводы, соединяемые фланцами с крышкой и днищем, крышка и днище приварены к толстостенному цилиндру – обечайке цилиндрического типа [1]. Изоляция бывает как внутреннего, так и наружного исполнения. Внутри засыпается адсорбент в два слоя: основной и вспомогательный, последний в силу своих влагоотталкивающих свойств играет роль защитного слоя при попадании влаги внутрь адсорбера.

В то же время днище представляет собой литое/сварное соединение с опорой адсорбера. Помимо основных, предусмотрено несколько вспомогательных отверстий. Адсорбер относится к классу аппаратов высокого давления, толстостенных, с коэффициентов толстостенности больше 1,2. Детальный чертеж адсорбера приведён в Приложении А.

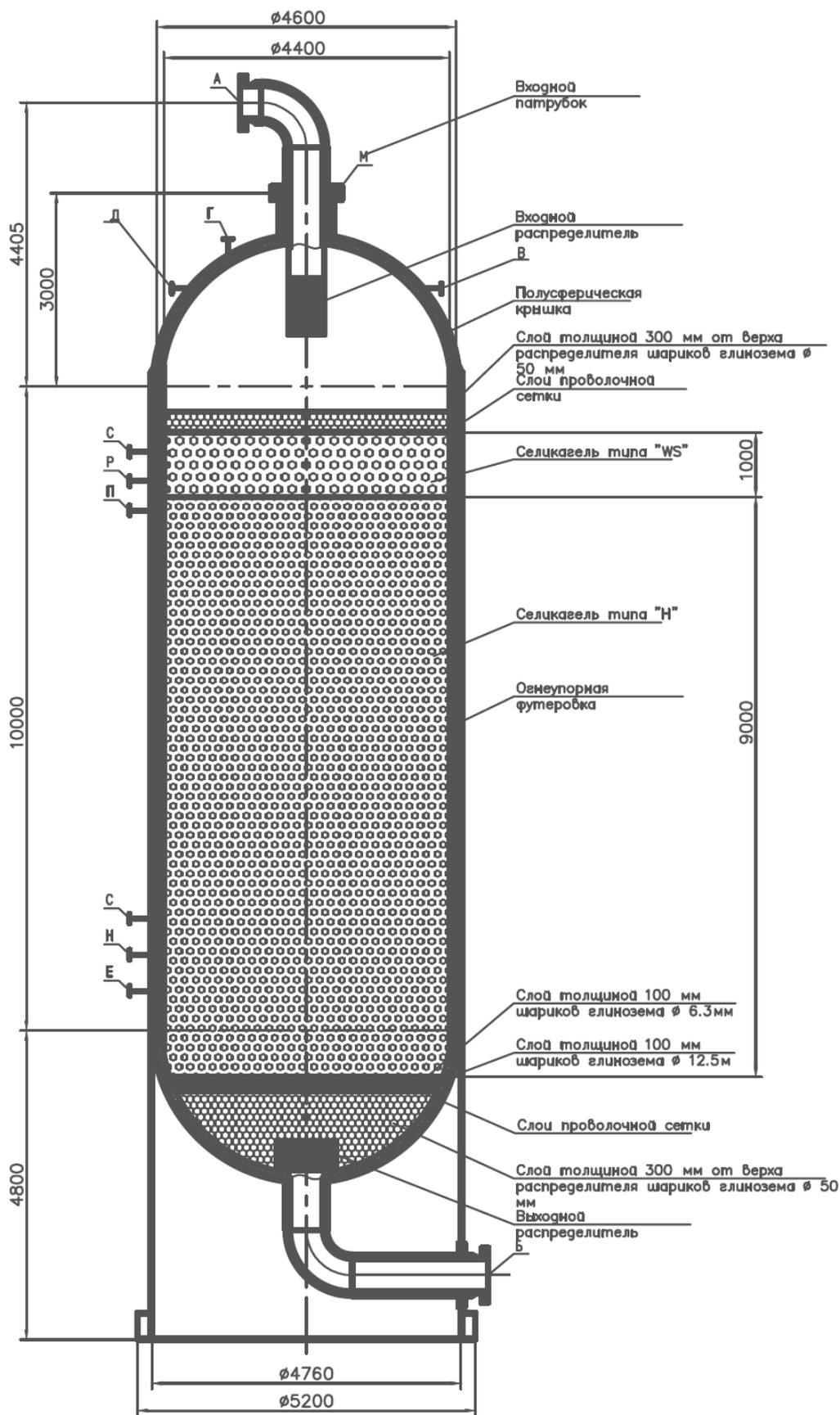


Рисунок 1.1 – Эскиз адсорбера

Типичные технические характеристики адсорберов, используемых в ходе подготовки газа (диаметры, толщины, рабочие и расчетные параметры, и пр), представлены в Таблице 1.1.

**Таблица 1.1 – Технические данные по конструкции адсорберов**

Параметр	Значение
Внутренний диаметр адсорбера, мм	3380÷4600
Высота/длина от касс. до касс.,мм.	8000÷10000
Рабочий вес, кг	203000÷384000
Рабочее давление, МПа	5,8÷9,8
Рабочая температура, °С	мин. температура газа на входе УПГТ/330
Расчетное давление, МПа	9,8
Расчетная температура, °С	абс. минимум атм. воздуха/330
Толщина обечайки, мм.	83÷140
Марка стали днища, обечайки и крышки	см. раздел 1.4.2
Толщина внутренней футеровки	90÷100
Тип футеровки	Firelite LWSH или аналог

### 1.2.2 Материалы адсорбера

Материалы для изготовления сосудов и аппаратов высокого давления обычно выбирают в соответствии со спецификой их применения. Ввиду того, что в установке подготовки газа к транспорту отсутствуют химические реакции, но температуры составляют порядка 280 – 330°С, то для изготовления конструктивных элементов адсорбера использовались стали, приведенные в таблице 1.2.

**Таблица 1.2 – Материал конструктивных частей адсорбера**

Конструктивная деталь	Сталь (ATME)	Сталь (ГОСТ)	Сталь (AISI)	Сталь (ГОСТ)
Обечайка	SA-533M Gr.B Cl2 (Mn-1/2Mo- 1/2Ni)	09Г2С	304 SS	15Х5М
Крышка и днище	SA-533M Gr.B Cl2 (Mn-1/2Mo- 1/2Ni)	09Г2С	304 SS	15Х5М

Химический состав сталей приведен в таблице 1.3.

**Таблица 1.3 – Химический состав сталей**

Марка стали	SA-533M Gr.B	09Г2С	304 SS	15Х5М
Химический стандарт				
C	≤0.250	≤0.120	≤0,8	≤0,150
Si	0.130-0.450	0.500- 0.800	≤0,8	≤0,500
Mn	1.070-1.650	1.300- 1.700	≤0,2	≤0,500

Cr	-	≤0.300	17-19	4.500-6.000
Mo	0.410-0.640	-	-	0.450-0.600
Ni	0.370-0.730	≤0.300	9-11	≤0,600
V	-	-	-	≤0,050
P	≤0.025	≤0.035	≤0,035	≤0,030
S	≤0.035	≤0.040	≤0,020	≤0,025
Ti	-	-	-	≤0,030
Al	-	-	-	-
Cu	-	≤0.300	≤0,300	≤0,2

Для проведения прочностного расчета необходимы данные о физических свойствах материалов. На основе данных [1-3] в Таблицах 1.4-1.6 приведены сведения касательно основных физических свойств используемых сталей.

**Таблица 1.4 – Физические свойства стали SA-533M Gr.B Cl2 (Mn-1/2Mo-1/2Ni)**

Температура, °C	E [N/mm <sup>2</sup> ]	α [1/°C]	k, [Wmm °C]	R <sub>e</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
20	200029	12.59e-05	4.100e-02	259.0	482.533
65	197853	12.96e-06	4.055e-02		464.389
100	195087	13.14e-06	4.060e-02		452.379
125	194536	13.17e-06	4.047e-02		445.125
150	192998	13.33e-06	4.047e-02		438.948
175	191757	13.49e-06	4.031e-02		433.363
200	193516	13.65e-06	4.651e-02		427.778
225	188765	13.58e-05	3.983e-02		422.959
250	186933	13.80e-05	3.945e-02		418.305
275	184855	13.95e-05	3.907e-02		413.551
300	182683	14.04e-05	3.859e-02		408.997
325	180160	14.10e-05	3.822e-02		403.991
350	177057	14.22e-05	3.775e-02		398.241
375	173762	14.25e-05	3.729e-02		391.746
	Модуль Юнга	Линейный коэффициент теплового расширения	Коэффициент теплопроводности	Статический предел прочности	Динамический предел прочности

**Таблица 1.5 – Физические значение стали 09Г2С (согласно данным [2])**

Температура °C	E 10 <sup>-5</sup> МПа	α 10 <sup>6</sup> 1/°C	λ Вт/(м·град)	ρ кг/м <sup>3</sup>	C Дж/(кг·град)
20	2,1		80	7850	
100		11,4			
200		12,2			
300		12,6			
400		13,2			
500		13,8			

**Таблица 1.6 – Физические значения стали 304 SS (согласно данным [2])**

Температура	$E \cdot 10^{-5}$	$\alpha \cdot 10^6$	$\lambda$	$\rho$	C
°C	МПа	1/°C	Вт/(м·град)	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг·град)
20	1,96		17	7850	
100		16			504
200		17			
300		17			
400		18			
500		18			

**Таблица 1.7 – Физические значения стали 15X5M (согласно данным [2])**

Температура	$E \cdot 10^{-5}$	$\alpha \cdot 10^6$	$\lambda$	$\rho$	C
°C	МПа	1/°C	Вт/(м·град)	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг·град)
20	2.11			7750	
100		11,3	37	7730	483
200		11,6	36	7700	
300		11,9	35	7670	
400	1.78	12,2	34	7640	
500	1.45	12,3	33	7610	
600	1.02	12,5		7580	

**Таблица 1.8 – Расчетное значение предела текучести  $R_e$  (МПа) и значения временного сопротивления  $R_m$  (МПа) для стали 09Г2С (согласно данным [4])**

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °C	$R_e$ (МПа)		$R_m$ (МПа)	
	Толщина, мм		Толщина, мм	
	Толщина до 32	Толщина свыше 32	Толщина до 32	Толщина свыше 32
20	300	280	470	440
100	265,5	240	425	385
150	256,5	231	430	430
200	247,5	222	439	439
250	243	218	444	444
300	226,5	201	445	445
350	210	185	441	441
375	199,5	174	425	425
400	183	158		
410		156		
420		138		

**Таблица 1.9 – Расчетное значение предела текучести  $R_{p0,2}$  (МПа) и значения временного сопротивления  $R_m$  (МПа) для стали 15X5M (согласно данным [4])**

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	$R_{p0,2}$ (МПа)	$R_m$ (МПа)
20	220	400
100	210	380
150	207	355
200	201	330
250	190	320
300	180	318
350	171	314
375	164	312
400	158	310
410	155	306
420	152	300

**Таблица 1.10 – Расчетное значение предела текучести  $R_{p0,2}$  (МПа) и значения временного сопротивления  $R_m$  (МПа) для стали 304 SS (согласно данным [4])**

Расчетная температура стенки сосуда или аппарата, °С	$R_{p0,2}$ (МПа)	$R_m$ (МПа)
20	210	520
100	195	480
150	180	455
200	173	430
250	165	424
300	150	417
350	137	408
375	133	405
400	129	402
410	128	400
420	128	398
430	127	396
440	126	394
450	125	392

Известно, что в районах эксплуатации УПГТ температуры могут опускаться до -40 и ниже. В силу того, что расчет прочности в области низких температур затруднён, экспериментальным путём исследуется ударная вязкость (KCV), и устанавливается предельная температура эксплуатации для каждой стали. Для стали 09Г2С предельно низкая температура эксплуатации составляет -80°С, что позволяет использовать адсорберы из этой стали в российских климатических зонах [2].

Данные о свойствах материалов, используемых для снижения потерь тепла в адсорбере, представлены в следующей секции.

### **1.2.2 Типы изоляционных покрытий адсорберов**

Известные патенты [5-7] располагают обширными сведениями о способах улучшения производительности адсорбционного процесса, но в большинстве своем они сводятся к выбору адсорбирующего материала (силикагель, молекулярные сита, и пр.), либо к вариациям в процессе (подача горячего газа регенерации снизу-вверх, сверху-вниз). Однако процессы теплоотдачи в адсорбере также являются важными для анализа, и технически точный подбор изоляционных огнеупорных материалов снизит отвод тепла от адсорбера и увеличит производительность технологического процесса. Что касается изоляционных материалов, современной нормой стало использовать бетонную двухслойную футеровку (например, патент “Способ устройства футеровки из жаростойкого бетона, [5]”).

Таким образом, футеровка состоит из:

- 1) Первого слоя бетона;
- 2) Второго бетонного слоя, уложенного сверх первого слоя с приваренной арматурой (например, якоря – см. Рисунок 1.2).

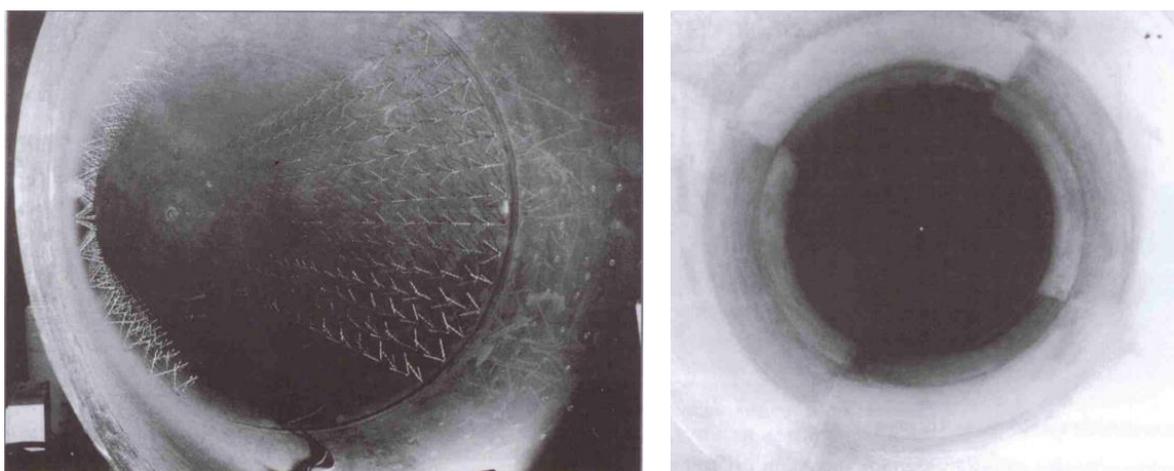


Рисунок 1.2 – приваренные якоря (слева) и итоговый вид бетонной футеровки (справа), изображения согласно [39]

При проектировании адсорбера и выборе изоляционного материала важно учитывать, какой коэффициент линейного расширения будет иметь изоляционный материал. От подбора материала с коэффициентом линейного расширения, близким к аналогичному коэффициенту у стали, зависит целостность и прочность крепления футеровки.

Материал, используемый в качестве изоляционного покрытия, имеет следующие характеристики.

---

Таблица 1.11 – Физические характеристики футеровки (Firelite LWHS или аналог)

Температура (°С)	Коэффициент теплопроводности К (Вт/м°С)	Плотность ρ (кг/м <sup>3</sup> )	Теплоемкость С (Дж/ кг°С)
200	0,31	1330	837
400	0,33		

Таблица 1.12 – Физические характеристики изоляционного материала (минеральная вата)

Температура (°С)	Коэффициент теплопроводности К (Вт/ м °С)	Плотность ρ (кг/м <sup>3</sup> )	Теплоемкость С (Дж/ кг°С)
50	0,040	240	660
100	0,044		
150	0,052		
200	0,061		
250	0,071		
300	0,082		

Требования к огнеупорным футеровкам, к материалам и способам изготовления представлены в **ВСН 315-80** “Инструкции по проектированию футеровок тепловых агрегатов нефтеперерабатывающей промышленности из легкого жаростойкого бетона и теплоизоляционных материалов” [8].

### 1.3 Методика расчета адсорбера

В адсорбере протекает цепь взаимосвязанных физических процессов. В силу того, что непосредственный расчет толщины стенки обечайки, крышки и днища адсорбера производится в конце, необходимо предварительно произвести расчет следующих физических процессов:

- **Динамики сжатого нагретого природного газа**, который, в свою очередь, сводится к определению следующих величин: коэффициента динамической вязкости газа (см. подробнее секцию 1.3.1), порозности слоя адсорбента (см. подробнее секцию 3.1), эквивалентного диаметра и числа Рейнольдса (см. подробнее секцию 3.2);
- **Теплопередачи через цилиндрическую стенку**, которая, в свою очередь, сводится к определению числа Нуссельта и к вычислению теплового потока через стенку.

В следующих секциях подробнее рассмотрены методы определения упомянутых физических процессов.

#### 1.3.1 Метод расчета динамической вязкости природного газа

Согласно ГОСТ 30319.3 от 2015 [9], вязкость природного газа рассчитывают по формуле:

$$\mu = \mu_0 + \frac{2.63094 \cdot M_m^{1/2} \cdot p_{нк}^{2/3}}{T_{нк}^{1/6}} \cdot \Delta\mu \quad (1.1)$$

где  $\mu_0$  — вязкость природного газа в разреженном состоянии;  
 $M_m$  — молярная масса природного газа;  
 $p_{нк}$  — псевдокритическое давление природного газа;  
 $T_{нк}$  — псевдокритическая температура природного газа;  
 $\Delta\mu$  — избыточная составляющая вязкости природного газа.

Псевдокритическое давление природного газа рассчитывают по формуле [9]:

$$p_{нк} = 10^{-3} R \cdot \tilde{\rho}_{нк} T_{нк} \left( 0.291 - 0.08 \cdot \sum_{i=1}^{N_c} x_i \Omega_i \right) \quad (1.2)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная (см. таблицу 2 ГОСТ 30319.1);  
 $\tilde{\rho}_{нк}$  — псевдокритическая молярная плотность природного газа (см. формулу (36));  
 $\Omega_i$  — ацентрический фактор Питцера  $i$ -го компонента природного газа, значения  $\Omega_i$  для компонентов приведены в таблице А.5 (приложение А ГОСТ 30319.1);  
 $N_c$  — число компонентов природного газа

Вязкость природного газа в разреженном состоянии вычисляют по формуле [9]:

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{x_i \mu_{0i}}{\sum_{j=1}^{N_c} \frac{\left[ 1 + \left( \mu_{0i} / \mu_{0j} \right)^{1/2} \left( M_j / M_i \right)^{1/4} \right]^2}{\left[ 8 \left( 1 + M_i / M_j \right) \right]^{1/2}}} \quad (1.3)$$

где  $\mu_{0i}$  и  $\mu_{0j}$  — соответственно вязкость  $i$ -го и  $j$ -го компонентов природного газа в разреженном состоянии;

$M_i$  и  $M_j$  — соответственно молярная масса  $i$ -го и  $j$ -го компонентов природного газа, значения которых для каждого компонента приведены в таблицах А.1 и А.9 ГОСТ 30319.3-2015 [9].

Вязкость компонентов природного газа в разреженном состоянии ( $\mu_{0i}$ ) вычисляют по формуле:

$$\mu_{0i} = \sum_{k=0}^3 a_{ik} (T/100)^k, i = 1, 2, \dots, N_c; \quad (1.4)$$

где  $a_{ik}$  — коэффициенты, значения которых для каждого компонента приведены в таблице А.6 приложения А ГОСТ 30319.3-2015 [9];

$N_c$  — число компонентов природного газа.

Избыточную составляющую вязкости рассчитывают по формуле:

$$\Delta\mu = \sum_{n=1}^8 c_n \left( \phi_1 \cdot \omega_m^{\phi_2} \cdot \tau_m^{\phi_3} \right)^{\gamma_n} \left( \phi_4 \cdot \omega_m^{\phi_5} \cdot \tau_m^{\phi_6} \right)^{-t_n} \quad (1.5)$$

где  $c_n$ ,  $\gamma_n$ ,  $t_n$  — коэффициенты и показатели степеней, значения которых приведены в таблице А.7 (приложение А) ГОСТ 30319.3-2015 [9];

$\phi_1, \dots, \phi_6$  — параметры преобразований для приведенных значений плотности и температуры природного газа;

$\omega_m$  и  $\tau_m$  — приведенные плотность и температура природного газа (см. формулы (34), (35) в ГОСТ 30319.1);).

Параметры преобразований для приведенных значений плотности и температуры природного газа рассчитывают по формуле [9]:

$$\phi_i = \delta_i + \sum_{k=1}^{N_c} x_k d_{ik}, i = 1, 2, \dots, 6; \quad (1.6)$$

где  $\delta_i$  и  $d_{ik}$  — коэффициенты, значения которых приведены в таблице А.8 (приложение А ГОСТ 30319.1););

$N_c$  — число компонентов природного газа.

Приведенные плотность ( $\omega_m$ ) и температуру ( $\tau_m$ ) природного газа рассчитывают по формулам [9]:

$$\omega_m = \tilde{\rho} / \tilde{\rho}_{нк} \quad (1.7)$$

$$\tau_m = T / T_{нк} \quad (1.8)$$

где  $\omega_m$  и  $\tau_m$ , — псевдокритические молярная плотность и температура природного газа.

Псевдокритическую молярную плотность и температуру вычисляют по следующим формулам [9]:

$$\tilde{\rho}_{нк}^{-1} = 0.125 \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_c} x_i x_j \left[ \left( M_i / \rho_{кpi} \right)^{1/3} + \left( M_j / \rho_{кpj} \right)^{1/3} \right]^3 \quad (1.9)$$

$$T_{нк} = 0.125 \cdot \tilde{\rho}_{нк} \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_c} x_i x_j \left[ \left( M_i / \rho_{кpi} \right)^{1/3} + \left( M_j / \rho_{кpi} \right)^{1/3} \right]^3 \left( T_{кpi} T_{кpi} \right)^{1/2} \quad (1.10)$$

где  $\rho_{кpi}$ ,  $\rho_{кpj}$ ,  $M_i$ ,  $M_j$  и  $T_{кpi}$ ,  $T_{кpj}$  — критические плотности, молярные массы и критические температуры для компонентов (i, j) природного газа соответственно;

$N_c$  — число компонентов природного газа.

Значения критических параметров  $T_{крі}$ ,  $\rho_{крі}$  и молярной массы  $M_i$  для компонентов природного газа приведены в таблицах А.5 и А.1, А.9 (приложение А) ГОСТ 30319.3-2015 [9] соответственно.

### 1.3.2 Теплоотдача при вынужденном движении текучей среды

Задача о тепловом расчете адсорбера сводится к двум связанным друг с другом подзадачам: определение теплоотдачи при вынужденном движении текучей среды и к задаче определения теплового потока через стенку адсорбера. При наличии рассчитанного значения теплового потока можно определить температуры в многослойной стенке адсорбера.

Определение теплоотдачи необходимо проводить в рамках расчета конвективной составляющей под воздействием вынужденного движения текучей среды в трубах и каналах.

При движении жидкостей и газов в трубах и каналах существуют ламинарный ( $Re_{f,d} \leq 2300$ ), турбулентный ( $Re_{f,d} \geq 10^4$ ) и переходный от ламинарного к турбулентному ( $2300 < Re_{f,d} < 10^4$ ) режимы течения флюида. Определяющие параметры для расчета критерия Рейнольдса:

- $T_0 = T_{f,ср} = 0,5 (T_{f,вх} + T_{f,вых})$  – средняя температура флюида в трубе;
- $R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы (для адсорбера, заполненного сорбентом, необходимо брать эквивалентный диаметр);
- $w_0 = G/(\rho \cdot f)$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида

При ламинарном режиме течения в условиях стабилизированном течении и стабилизированном теплообмене может быть рассчитана в следующих случаях:

**Теплоотдача при ламинарном вязкостном режиме движения текучей среды в трубах ( $Re_{f,d} \leq 2300$ ;  $Ra < 8 \cdot 10^5$ )**

Средний по внутренней поверхности трубы длиной  $l$  коэффициент теплоотдачи рассчитывают по формуле Б.Г. Петухова, которая получена при  $l/(Re \cdot d) \leq 0.05$  и  $0.07 \leq \mu_w/\mu_f \leq 1500$

$$\overline{Nu} = 1.55 \cdot (Pe \cdot d_{вн} / l)^{1/3} \cdot (\mu_f / \mu_w)^{0.14} \cdot \overline{\varepsilon}_l \quad (1.11)$$

Определяющие параметры:

$$T_0 = 0.5 \cdot (T_w + \overline{T}_f), \text{ где } \overline{T}_f = 0.5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых});$$

$R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы;

$w_0 = G/(\rho \cdot f)$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

Замечание. Значение  $\mu_w$  выбирают для флюида при температуре стенки  $T_w$ .

Величина  $\overline{\varepsilon}_l$  – поправка, учитывающая влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена:

$$\text{При } l/(Re \cdot d) < 0.1 \rightarrow \overline{\varepsilon}_l = 0.6 \cdot \left[ \frac{l}{(Re \cdot d)} \right]^{-1/7} \cdot [1 + 2.5 \cdot l/(Re \cdot d)]; \quad (1.12)$$

$$\text{При } l/(Re \cdot d) \geq 0.1 \rightarrow \bar{\varepsilon}_l \approx 1$$

Где  $l$  – длина трубы.

Определяющие параметры для формул (2.3) и (2.4) такие же, как для формулы (2.2).

Для **ламинарного вязкостно-гравитационного режима течения** ( $Re_{f,d} \leq 2300$ ;  $Ra > 8 \cdot 10^5$ ) средний коэффициент теплоотдачи при может быть рассчитан по критериальному уравнению М. А. Михеева:

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0.15 \cdot Re_{f,d}^{0.33} \cdot Pr_f^{0.33} \cdot (Gr_{f,d} \cdot Pr_f)^{0.1} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_l \quad (1.13)$$

Определяющие параметры:

$$T_0 = 0.5 \cdot (T_w + \bar{T}_f), \text{ где } \bar{T}_f = 0.5 \cdot (T_{f,ex} + T_{f,вых});$$

$R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы;

$w_0 = G/(\rho \cdot f)$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

Замечание. Поправку  $\varepsilon_t$ , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (1.19).

Поправочный коэффициент  $\bar{\varepsilon}_l$ , учитывающий влияние на теплоотдачу процесса гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена равен:

при  $l/d < 50$  значение  $\bar{\varepsilon}_l$  находят по данным таблицы 1.8;

при  $l/d > 50$  —  $\bar{\varepsilon}_l = 1$ .

Таблица 1.13 – значение  $\bar{\varepsilon}_l$  при вязкостно-гравитационном режиме течения флюида

$l/d$	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\bar{\varepsilon}_l$	1.9	1.7	1.44	1.28	1.18	1.13	1.05	1.02	1.0

При **турбулентном режиме движения текучей среды** в ( $Re \geq 10^4$ ) средний коэффициент теплоотдачи в прямых гладких трубах рассчитывают по формуле М. А. Михеева [22]:

$$\overline{Nu}_{f,d} = 0.021 \cdot Re_{f,d}^{0.8} \cdot Pr_f^{0.43} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_l \quad (1.14)$$

Замечание. Поправку  $\varepsilon_t$ , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (1.5).

Поправочный коэффициент  $\bar{\varepsilon}_l$ , учитывающий влияние на теплоотдачу процесса гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена равен:

$$\text{при } l/d < 50 - \bar{\varepsilon}_l \approx 1 + 2d/l;$$

$$\text{при } l/d > 50 - \bar{\varepsilon}_l = 1.$$

Более точные значения  $\bar{\varepsilon}_l$  в зависимости от критерия Рейнольдса приведены в табл. 1.14.

Таблица 1.14 – Значение  $\bar{\varepsilon}_l$  при турбулентном режиме течения флюида

Re	l/d							
	1	2	5	10	15	20	30	40
$1 \cdot 10^4$	1.65	1.50	1.34	1.23	1.17	1.13	1.07	1.03
$2 \cdot 10^4$	1.51	1.40	1.27	1.18	1.13	1.10	1.05	1.02
$5 \cdot 10^4$	1.34	1.27	1.18	1.13	1.10	1.08	1.04	1.02
$10 \cdot 10^4$	1.28	1.22	1.10	1.10	1.08	1.06	1.03	1.02
$100 \cdot 10^4$	1.14	1.11	1.05	1.05	1.04	1.03	1.02	1.01

Переходный режим течения ( $2300 < Re < 10^4$ ) характеризуется перемежаемостью ламинарного и турбулентного течений. В этом случае коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по формуле [22]:

$$\overline{Nu}_{f,d} = K_0 \cdot Pr_{f,d}^{0.33} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_l \quad (1.15)$$

где комплекс  $K_0$  зависит от числа Рейнольдса (см. табл. 2.3.), а поправку  $\bar{\varepsilon}_l$  рассчитывают также, как и при турбулентном режиме течения флюида.

Таблица 1.15 – Зависимость комплекса  $K_0$  от числа Рейнольдса

$Re \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
$K_0$	2,2	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Замечание. Поправку  $\varepsilon_t$ , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают по формуле (1.5).

Определяющие параметры:

$$T_0 = 0.5 \cdot (T_w + \bar{T}_f), \text{ где } \bar{T}_f = 0.5 \cdot (T_{f,вх} + T_{f,вых});$$

$R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы;

$w_0 = G/(\rho \cdot f)$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

**Для газов** критерий Прандтля  $Pr_f \approx 0.7 \div 1.0$  и в диапазоне температур, в которых эксплуатируются адсорберы, зависит от температуры, однако изменяется слабо, поэтому температурная поправка  $\varepsilon_t = (Pr_f/Pr_w)^{0.25} \approx 1.0$ . В этом случае уравнения упрощаются до вида:

$$\text{Ламинарный режим: } \overline{Nu}_{f,d} = 0.146 \cdot Re_{f,d}^{0.33} \cdot Gr_{f,d}^{0.1} \quad (1.16)$$

$$\text{Турбулентный режим: } \overline{Nu}_{f,d} = 0.018 \cdot Re_{f,d}^{0.8} \quad (1.17)$$

$$\text{Переходный режим: } \overline{Nu}_{f,d} = 0.86 \cdot K_0 \quad (1.18)$$

**Замечание.** При наличии больших температурных напоров и турбулентном режиме течения газов коэффициенты теплоотдачи могут отличаться от значений, вычисленных по уравнениям (1.13), (1.14) и (1.15). В этом случае расчет необходимо проводить по формулам (1.16), (1.17) и (1.18), принимая в качестве температурной поправки выражение:

$$\varepsilon_t = \left( \frac{\overline{T}_f}{\overline{T}_w} \right)^m \quad (1.19)$$

где  $\overline{T}_f$  – средняя температура газа в трубе, К;  $\overline{T}_w$  – средняя температура стенки трубы, К;  $m = 0,4$  если  $\overline{T}_w > \overline{T}_f$  и  $m = 0$ , если  $\overline{T}_w < \overline{T}_f$ .

Определяющие параметры:

Определяющие параметры:

$$T_0 = 0.5 \cdot (T_w + \overline{T}_f), \text{ где } \overline{T}_f = 0.5 \cdot (T_{f,ex} + T_{f,вых});$$

$R_0 = d_{вн}$  – внутренний диаметр трубы;

$w_0 = G/(\rho \cdot f)$  – средняя по сечению трубы скорость движения флюида.

### 1. 3.3 Тепловой поток через цилиндрическую стенку и расчет температуры многослойной стенки

Под термином теплопередача понимают процесс передачи теплоты между двумя средами через непроницаемую стенку любой геометрической формы в стационарном и нестационарном режимах теплообмена.

Согласно второму закону термодинамики процесс теплопередачи идет от среды с большей температурой (горячего флюида) к среде с меньшей температурой (холодному флюиду).

Теплопередача через непроницаемую стенку включает в себя следующие процессы:

а) теплоотдачу от горячей среды (горячего флюида) к стенке;

б) теплопроводность внутри стенки;

в) теплоотдачу от стенки к холодной среде (холодному флюиду).

Цель расчета теплопередачи (прямая постановка задачи) – определение теплового потока, проходящего через непроницаемую стенку от окружающей среды с большей температурой к окружающей среде с меньшей температурой при заданных условиях однозначности. Затем по рассчитанному тепловому потоку находят неизвестные по условию задачи температуры.

В расчетах теплопередачи через стенку цилиндрической формы удобно использовать тепловой поток, отнесенный к единице длины цилиндрической стенки – линейную плотность теплового потока,  $q_l = Q/l$ , где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $l$  – длина цилиндрической стенки, м.

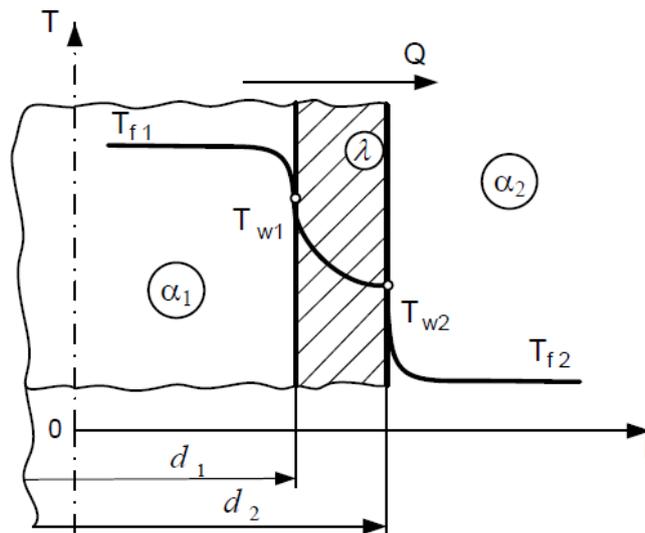


Рисунок 1.3 – теплопередача через цилиндрическую стенку

$$q_l = \frac{\pi(T_{f1} - T_{f2})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} = k_l \pi (T_{f1} - T_{f2}) = \frac{\pi(T_{f1} - T_{f2})}{R_l} \quad (1.20)$$

Где  $T_{f,1}$  и  $T_{f,2}$  – температура горячего и холодного флюидов, °С (К);  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи от горячего флюида к стенке и от стенки к холодному флюиду, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $d_1$  и  $d_2$  – внутренний и наружный диаметры цилиндрической стенки, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м·К);  $k_l$  – линейный коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку, Вт/(м·К);  $R_l$  – линейное термическое сопротивление теплопередачи через стенку цилиндрической формы, (м·К)/Вт.

Из анализа формулы (1.20) следует, что  $k_l$  и  $R_l$  рассчитывают по формулам

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}$$

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2} \quad (1.21)$$

Линейное термическое сопротивление теплопередачи равно сумме линейного термического сопротивления теплоотдачи от горячего флюида к стенке, линейного термического сопротивления теплопроводности цилиндрической стенки и линейного термического сопротивления теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю.

Линейную плотность теплового потока при теплопередаче через цилиндрическую стенку, состоящую из  $n$  слоев разной толщины и с разными физическими свойствами, рассчитывают по формуле

$$q_l = \frac{\pi(T_{f1} - T_{f2})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{n+1}}} \quad (1.22)$$

где  $\lambda_i$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го слоя, Вт/(м·К);  $d_i$  и  $d_{i+1}$  – внутренний и наружный диаметры  $i$ -го слоя цилиндрической стенки, м.

При теплопередаче через однослойную стенку (рис. 2) неизвестными являются температуры на границах стенки  $T_{w,1}$  и  $T_{w,2}$ . Для расчета неизвестных температур выберем участок теплообмена таким образом, чтобы на одной его границе была известная температура, а на другой – искомая. Например, если для расчета температуры  $T_{w,1}$  использовать температуру горячего флюида  $T_{f,1}$ , а для расчета температуры  $T_{w,2}$  – температуру холодного флюида  $T_{f,2}$ , то получим:

$$q_l = \frac{\pi(T_{f1} - T_{w1})}{R_{l,1}} \Rightarrow T_{w,1} = T_{f,1} - q_l \frac{R_{l,1}}{\pi}$$

$$q_l = \frac{\pi(T_{w,2} - T_{f,2})}{R_{l,3}} \Rightarrow T_{w,2} = T_{f,2} - q_l \frac{R_{l,3}}{\pi} \quad (2.24)$$

В результате решения задачи по расчету теплопередачи через цилиндрическую стенку найден тепловой поток (линейная плотность теплового потока) и неизвестные температуры стенки. Для промежуточных слоев стенки (при наличии таковых), для расчета неизвестной температуры можно использовать вычисленное значение температуры предыдущего слоя.

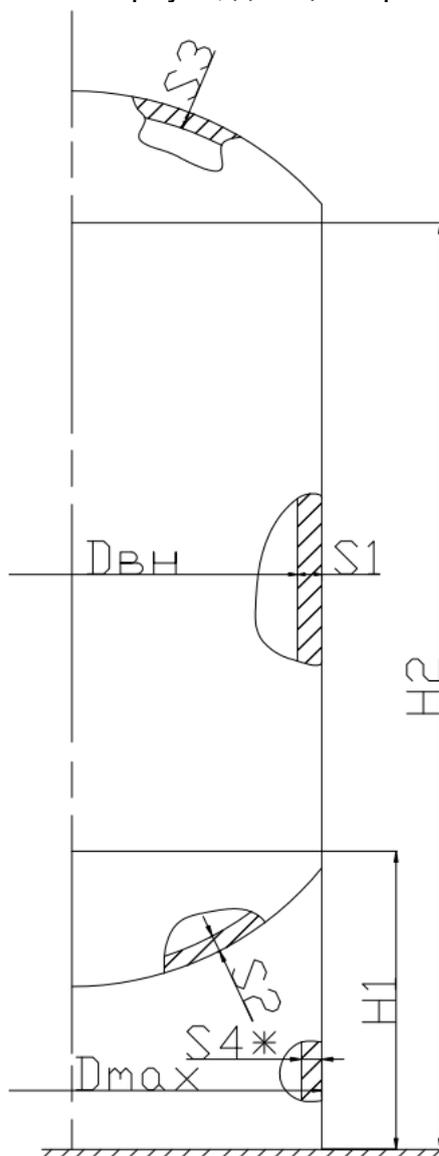
### 1. 3.4 Расчет толщины стенки адсорберов

Основными документами, регламентирующими расчет толстостенных аппаратов под давлением, являются ГОСТ 25215-82 “Обечайки и днища. Нормы и методы расчета на прочность” [10], ГОСТ 14249-89 “Сосуды и аппараты. Методы расчета на прочность” [4], ГОСТ Р 51274-99 “Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и метод расчета на прочность” [11].

Например, ГОСТ Р 51274-99 “Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и метод расчета на прочность” регламентирует расчет колонных аппаратов под внутренним или внешним давлением, но для настоящей работы он

избыточен, поэтому в основном были использованы ГОСТ 25215-82 и ГОСТ 14249-89.

При расчете аппарата проверяют сечения согласно приведённой схеме (Рис.1.4) – поперечные сечения корпуса, днища и крышки.



\*В настоящей работе не производится расчет опорной обечайки.

Рисунок 1.4 – Расчетная схема адсорбера

При расчете адсорбера необходимо учитывать следующие основные положения, регламентируемые государственными стандартами.

Расчетные давления – расчетные давления в рабочих условиях  $p_1$  и в условиях испытания  $p_2$  устанавливают по ГОСТ 14249;

Расчетная температура устанавливается согласно ГОСТ 14249.

В случае адсорберов УПГТ государственный стандарт обязует принять за расчетную температуру максимальную температуру по стенке, либо определить её путём теплотехнических расчетов. Выбор расчетной температуры влияет на выбор физико-механических свойств материалов и допускаемых напряжений.

За расчетные усилия и моменты принимают действующие для соответствующего состояния нагружения (например, при эксплуатации, испытании или монтаже), усилия и моменты, возникающие в результате действия собственной массы присоединенных трубопроводов, ветровой, снеговой и других

нагрузок. Следует учесть, что в данной работе не учитываются ветровые, снеговые и сейсмические нагрузки.

Допускаемое напряжение  $[\sigma]$  при расчете по предельным нагрузкам сосудов и аппаратов, работающих при статических однократных\* нагрузках, для углеродистых и низколегированных сталей определяют:

$$[\sigma] = \eta \cdot \min \left( \frac{R_e (\text{или}) R_{p0,2}}{n_\tau}; \frac{R_m}{n_\sigma}; \frac{R_{m/10^3}}{n_D}; \frac{R_{p1,0/10^3}}{n_D} \right) \quad (1.25)$$

При расчете сосудов и аппаратов необходимо учитывать прибавку  $c$  к расчетным толщинам элементов сосудов и аппаратов.

#### 1.4.3.1 Расчет стенки цилиндрической обечайки

Исполнительную толщину стенки элемента сосуда и аппарата должны определять по формуле:

$$s \geq s_p + c \quad (1.26)$$

где  $s_p$  - расчетная толщина стенки элемента сосуда и аппарата.

Прибавку к расчетным толщинам следует определять по формуле

$$c = c_1 + c_2 + c_3 \quad (1.27)$$

При поверочном расчете прибавку вычитают из значений исполнительной толщины стенки.

Если известна фактическая толщина стенки, то при поверочном расчете можно не учитывать  $c_2$  и  $c_3$

Расчетные формулы для обечаек, нагруженных внутренним избыточным давлением, применимы для обечаек с  $D > 200$  мм при следующем отношении толщины стенки к диаметру:

$$\frac{s - c}{D} \leq 0,1 \quad (1.28)$$

Расчетную толщину стенки элемента сосуда и аппарата следует рассчитывать по формуле:

$$s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi_p - p} \quad (1.29)$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление следует рассчитывать по формуле:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p (s - c)}{D + (s - c)} \quad (1.30)$$

#### 1.4.3.2 Расчет полусферических и эллиптических днищ

Толщину стенки  $s_1$  следует рассчитывать по формулам [12]:

$$s_1 \geq s_{1P} + c \quad (1.31)$$

где  $s_{1P}$  имеет следующий вид:

$$s_{1P} = \frac{pD}{2[\sigma]\varphi - 0,5p} \quad (1.32)$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление  $[p]$  следует рассчитать по формуле:

$$[p] = \frac{2(s_1 - c)\varphi[\sigma]}{R + 0,5(s_1 - c)} \quad (1.33)$$

Радиус кривизны в вершине днища равен:

$$R = \frac{D^2}{4H} \quad (1.34)$$

Где  $R = D$  – для эллиптических днищ с  $H \leq 0,25 D$

$R = 0,5 D$  – для эллиптических днищ с  $H > 0,25 D$

Для днищ, изготовленных из одной заготовки, коэффициент  $\varphi = 1$ .

### 1.4.3.3 Расчет сферической крышки

Толщину стенок крышек и днищ определяют методом последовательных приближений [12]. Предварительно толщину стенки следует определять по формуле:

$$s'_{1R} = \frac{pR}{2[\sigma]_I \varphi - p} \quad (1.35)$$

А затем по формуле:

$$s''_{1R} = \frac{pD\beta}{2\varphi[\sigma]_I - p} \quad (1.36)$$

Исполнительная толщина стенки должна соответствовать условию:

$$s_3 \geq s_{1R} + c \quad (1.37)$$

Допускаемое избыточное давление рассчитывается согласно:

$$[p] = \min\{[p_1]; [p_2]\} \quad (1.38)$$

Где  $[p_1]$  – допускаемое избыточное давление из условия прочности краевой зоны:

$$[p_1] = \frac{2(s_1 - c)\varphi_K[\sigma]_I}{D\beta + (s_1 - c)} \quad (1.39)$$

$[p_2]$  – допускаемое избыточное давление из условия прочности центральной зоны:

$$[p_2] = \frac{2(s_1 - c)\varphi_K[\sigma]_I}{R + (s_1 - c)} \quad (1.40)$$

Коэффициент  $\beta$  определяют по формуле [12]:

$$\beta = 0,5 + \frac{\text{tg}(\phi)}{\chi_K \frac{4A_K}{D(s_1 - c)} \sqrt{1 - \frac{M}{[M]} + 3 \sqrt{\frac{(s_1 - c)}{D} \left[ \frac{1}{\sqrt{\cos \phi}} + \left( \chi \frac{s - c}{s_1 - c} \right)^{3/2} + \left( \chi_2 \frac{s_2 - c}{s_1 - c} \right)^{3/2} \right]}}}} \quad (1.41)$$

При заданных размерах днищ тригонометрические величины определяют по формулам:

$$\cos \phi = \frac{D}{2R} \quad (1.42)$$

$$\operatorname{tg}(\phi) = \sqrt{\left(\frac{D}{2R}\right)^2 - 1} \quad (1.43)$$

Отношения допускаемых напряжений:

$$\chi_k = \frac{[\sigma]_k}{[\sigma]_l} \quad (1.44)$$

$$\chi = \frac{[\sigma]}{[\sigma]_l} \quad (1.45)$$

$$\chi_2 = \frac{[\sigma]_2}{[\sigma]_l} \quad (1.46)$$

Величины  $A_k$ ,  $M$  и  $[M]$  определяют согласно ГОСТ 25221-82, но в случае расчетной схемы, приведённой выше,  $A_k$ ,  $M$  и  $[M]$  не учитываются.

## 1.4 Варианты использования адсорберов на примере проектов ПАО «Газпром»

Адсорберы используются в составе установок адсорбционной осушки газа. В свою очередь, установки такого типа применяются в весьма широком круге задач: химическая промышленность, машиностроительные производства, медицинские аппараты специального назначения, а также в газовой промышленности для глубокого обезвоживания и отбензинивания природного газа. В этой секции рассмотрены примеры использования установок адсорбционной осушки газа на примере проектов ПАО «Газпром»

### 1.4.1 Общие сведения о подготовке газа к транспорту

Установки подготовки газа к транспорту (УПГТ) служат для обеспечения надежного (безгидратного) транспорта газа по газопроводам. В особенности актуальна такая подготовка газа при его подаче в морские участки газопроводов. На УПГТ производится извлечение тяжелых углеводородов, паров воды и механических примесей.

В России УПГТ установлены на следующих действующих газопроводах (согласно данным ПАО «Газпром», [13]):

- **Голубой поток (УПГТ КС «Краснодарская»);**

Газопровод «Голубой поток» предназначен для поставок российского природного газа в Турцию через акваторию Черного моря, минуя третьи страны. «Голубой поток» дополняет газотранспортный коридор из России в Турцию, который проходит через территорию Украины, Молдавии, Румынии и Болгарии.



Рисунок 1.5 – Действующие газопроводы «Голубой Поток» (слева) и «Северный Поток» (справа), а также перспективные газопроводы – «Турецкий Поток» (слева) и «Северный Поток 2» (справа)

– **Северный поток (УПГТ КС «Потовая»);**

«Северный поток» — экспортный газопровод из России в Европу через Балтийское море. Он напрямую связывает «Газпром» и европейских потребителей, минуя транзитные государства. «Северный поток» обеспечивает высокую надежность поставок российского газа в Европу.

Закачку газа в «Северный поток» осуществляет компрессорная станция (КС) «Портовая». Это уникальный объект мировой газовой отрасли по суммарной мощности (366 МВт).

Кроме того, есть ряд перспективных проектов, где имеется необходимость в подготовке газа:

– **Турецкий поток (УПГТ КС «Казачья»);**

«Турецкий поток» — новый экспортный газопровод из России в Турцию через Черное море. Первая нитка газопровода предназначена для поставок газа турецким потребителям, вторая — для газоснабжения стран Южной и Юго-Восточной Европы. Морской участок «Турецкого потока» пройдет от КС «Русская» в районе Анапы по дну Черного моря до побережья Турции. Протяженность — более 900 км. На настоящий момент сухопутная транзитная нитка до границы Турции с сопредельными странами уже построена. В связи с отсутствием необходимо пространства для строительства УПГТ в районе КС «Русская», УПГТ размещено на площадке КС «Казачья».

– **Северный поток - 2 (УПГТ КС «Славянская»), имеет статус проектируемого объекта:**

Северный поток — 2 — новый экспортный газопровод из России в Европу через Балтийское море.

Решение о создании газопровода «Северный поток — 2» основывается на успешном опыте строительства и эксплуатации газопровода «Северный поток». Новый газопровод также, как и действующий, напрямую свяжет «Газпром» и европейских потребителей и обеспечит высокую надежность поставок российского газа в Европу, что особенно важно в условиях падения добычи газа в Европе и роста спроса на его импорт.

Процесс подготовки газа может осуществляться множеством мер, однако наибольшее распространение получили установки с использованием адсорбционных процессов на основе твердых поглотителей, т.н. сорбентов [14]. Такое распространение обосновывается высокими производственными показателями наряду с меньшей чувствительностью к сезонным изменениям. Адсорбционный процесс обеспечивает [14]:

1. Высокую степень улавливания тяжелых углеводородов и воды;
2. Низкие затраты на процесс регенерации твердого сорбента;
3. Низкие материальные затраты за счет высокого насыпного веса;
4. Низкий физический износ ввиду гранулированной формы сорбента и его высокой механической прочности.

В силу обратимости адсорбционного процесса тяжелые углеводороды и воду можно выделять из адсорбента, на чем основан процесс регенерации. Это позволяет использовать сорбент множество циклов, в отличие от абсорбента, где улавливание тяжелых элементов производится всем объемом вещества, из-за чего процесс выделения тяжелых элементов становится затруднителен.

Наибольшее распространение при осушке природного газа твердыми сорбентами получил силикагель [14-19]. Силикагель характеризуется, как и все адсорбенты, большой площадью поверхности – в пределах нескольких сот квадратных метров на грамм. Более подробно базовые характеристики силикагелей приведены в Таблице 1.17.

Таблица 1.17 – Основные характеристики силикагелей, применяемых в газовой промышленности (согласно данным [18,19])

Параметры	Основной слой	Защитный слой
Химический состав, масс. %:		
1) SiO <sub>2</sub>	97	97
2) Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	3
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	750	650
Объем пор, см <sup>3</sup> /г	0,5	0,45
Размер зерна, мм	2-5	2-5
Прочность на сжатие, Н	230	230
Амортизация, масс. %	0,05	0,05
Водостойкость в жидкой фазе	Да	Нет
Торговая марка/производитель	Тип H/BASF /Салаватовский катализаторный завод	Тип WS/BASF

Основной слой служит для непосредственной осушки газа от воды и тяжёлых углеводородов.

Защитный слой служит для предотвращения попадания свободной воды на основной слой сорбента.

#### **1.4.2 Требования к качеству подготовки природного газа на УПГТ**

Природный газ, транспортируемый по магистральным газопроводам характеризуется следующими качественными показателями:

- точка росы по воде;
- точка росы по углеводородам.

Требования к показателям природного газа согласно СТО Газпром 089-2010 «Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия» [20], представлены в Таблице 1.18.

Таблица 1.18- Показатели газа горючего природного, поставляемого и транспортируемого по магистральным газопроводам

Наименование показателя	Значение для макроклиматических районов	
	умеренный	холодный
1 Температура точки росы по воде (ТТРВ) при абсолютном давлении 3,92 МПа (40,0 кгс/см <sup>2</sup> ), °С, не выше:		
- зимний период	-10,0	-20,0
- летний период	-10,0	-14,0
2 Температура точки росы по углеводородам (ТТРУв) при абсолютном давлении от 2,5 до 7,5 МПа, °С, не выше:		
- зимний период	-2,0	-10,0
- летний период	-2,0	-5,0

Требования к качеству подготовки газа перед подачей его в морскую часть могут отличаться от показателей, приведенных в таблице 1.12.

В большей части требования к качеству подготовки газа перед подачей его в морскую часть зависят от характеристик (давление и температура) транспорта газа в морском участке газопровода и от требований покупателя газа.

Комплектация оборудования производится с учетом требуемых характеристик подготовленного газа.

#### **1.4.3 Общая схема установки подготовки газа к транспорту**

Подготовка газа к транспорту включает в себя несколько основных процессов [1-4]:

- очистка газа от механических примесей в Блоке очистки (см. Рис.1.6)

- дальнейшую его осушку от воды и тяжелых углеводородов в Блоке осушки,
- подача газа к транспортной сети.

Кроме того, имеется внутренний цикл регенерации, включающий в себя процессы:

- нагрева газа регенерации в Блоке нагрева,
- охлаждения газа регенерации в Блоке охлаждения,
- сепарации газа и конденсата в Блоке сепарации

Природный газ последовательно проходит вышеперечисленные блоки, после чего подаётся в газопровод.

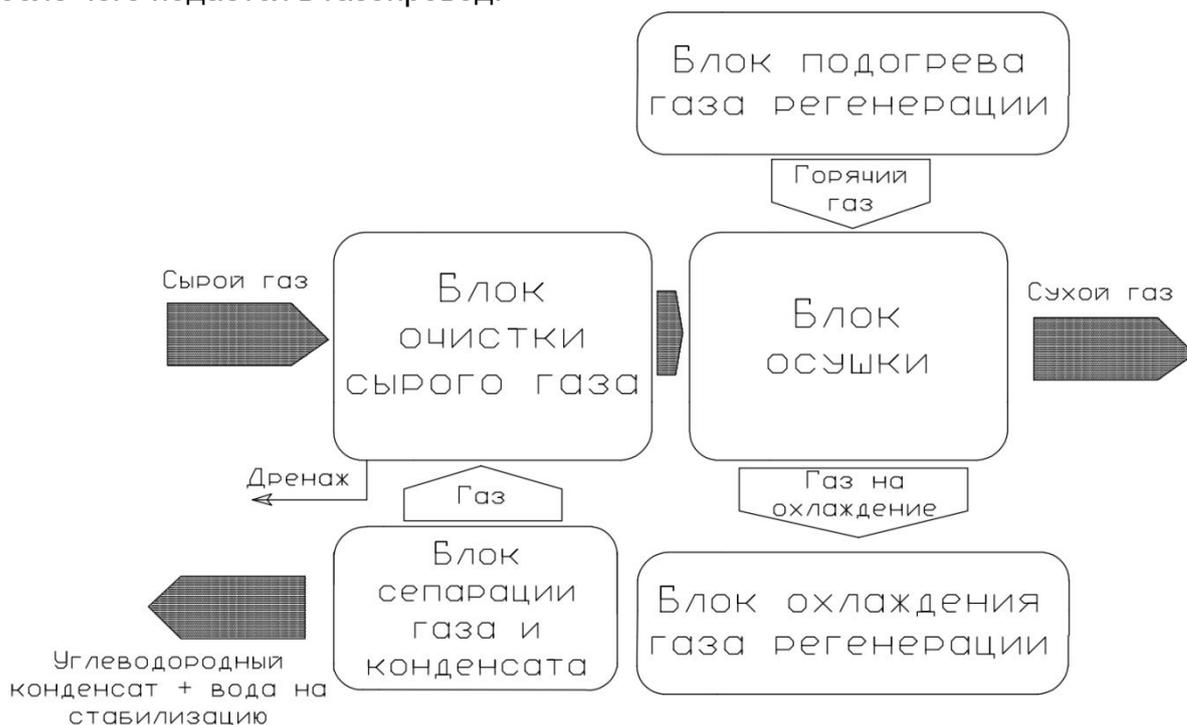


Рисунок 1.6 – Общая схема подготовки газа к транспорту

Блок очистки сырого газа представлен фильтрами, на которых осуществляется предварительная очистка газа от механических соединений. Блок подогрева газа регенерации включает в себя подогреватель газа, Блок охлаждения – аппарат воздушного охлаждения, Блок сепарации – сепараторы высокого и низкого давлений. Блок осушки является ключевым и самым металлоёмким, так как он представлен адсорберами, в которые засыпается влагоулавливающий агент, и именно на блок Осушки приходится большая часть материальных затрат.

В связи с этим возникает необходимость снижения материальных затрат в этом блоке, и одним из способов добиться экономии в материальном и денежном эквиваленте является снижение металлоёмкости проекта. Металлоёмкость адсорбера можно снизить путём уменьшения толщины стенки обечайки, крышки и днища, но при этом возникает вопрос о предельно-допустимых напряжениях и температуре, при которой необходимо считать толщину стенки.

Существенной технологической особенностью, влияющей на расчет толщины стенки адсорбера, является тип огнеупорной изоляции: внешний или внутренний [21,22]. В перспективе использование внутренней изоляции позволяет уменьшить толщину стенки. Для обоснования такой технологии необходимо провести сравнение расчета толщины стенки с использованием внешней и внутренней типов футеровок.

Прежде чем приступить к обзору методов расчета толщины стенки адсорбера, необходимо дать краткую техническую характеристику процесса подготовки газа к транспорту и описать технологические особенности УПГТ.

#### **1.4.4 Общие принципы расчета процесса адсорбции**

Основные расчетные показатели процесса адсорбции основаны на динамической адсорбционной емкости адсорбента. Динамическая адсорбционная емкость адсорбента рассчитывается по формуле [14-17]:

$$a = \frac{\tau_{np} \cdot Q \cdot C \cdot 100\%}{G} \quad (1.42)$$

где:  $\tau_{np}$  – время работы адсорбента в фазе адсорбции, ч;

$Q$  – расход исходной газовой смеси, м<sup>3</sup>/ч;

$C$  – количество поглощаемого адсорбентом жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$G$  – масса адсорбента, загруженного в адсорбент, кг;

100% - коэффициент пересчета в проценты.

В процессе работы УПГТ для силикагеля значение динамической адсорбционной емкости составляет ~ 10 % масс. Необходимо отметить, что в начальный период работы установки силикагель имеет высокую динамическую активность порядка 15-20% масс., которая в процессе эксплуатации может снизиться до 7% масс.

На настоящий момент крупные проекты (Северный поток, Северный поток-2 Голубой поток, Южный поток) используют технологии подготовки газа от компаний: BASF Catalyst Germany и Advantica Technologies Ltd.

#### **1.4.5 Процесс компании BASF Catalyst Germany**

Для подготовки газа к транспорту, компания BASF предлагает схему адсорбционной осушки с короткими циклами адсорбции. В этом случае линия адсорбции состоит из 6 адсорберов, соединенных параллельно, и включает собственный блок регенерации [14]. Процесс организован следующим образом:

- 4 адсорбера находятся в фазе адсорбции, обрабатывая сырой газ питания;
- 1 адсорбер на регенерации (нагрев);
- 1 адсорбер на охлаждении.

Принципиальная технологическая схема процесса подготовки газа к транспорту на основе технологии компании BASF представлена на рисунке 1.7.

Данная технология позволяет одновременно снижать точку росы природного газа по воде и тяжелым углеводородам (C<sup>5+</sup>). При такой компоновке оборудования

одной технологической линии обычно содержит от 3 и более адсорберов. Один (или несколько) действует как поглотители, второй находится в фазе нагрева (регенерируется) и третий охлаждается, при этом при регенерации сорбента организовано проточное (сверху вниз) движение газа регенерации. Давление, как правило составляет 3,5 – 9,0 МПа; температура колеблется от 15 - 35 °С; время адсорбции 20 - 70 минут и более. Компания BASF предлагает к использованию в данном процессе силикагели марки H и WS. WS применяется в качестве защитного слоя (порядка 10÷20% от общего объема силикагеля).

В виду длительности циклов регенерации для охлаждения и нагрева адсорбента достаточно в качестве газа регенерации использовать часть потока (отделяется от основного потока сырого газа) в количестве 6% от общего потока газа. Регенерация сорбента проводится при температуре не более 290 °С.

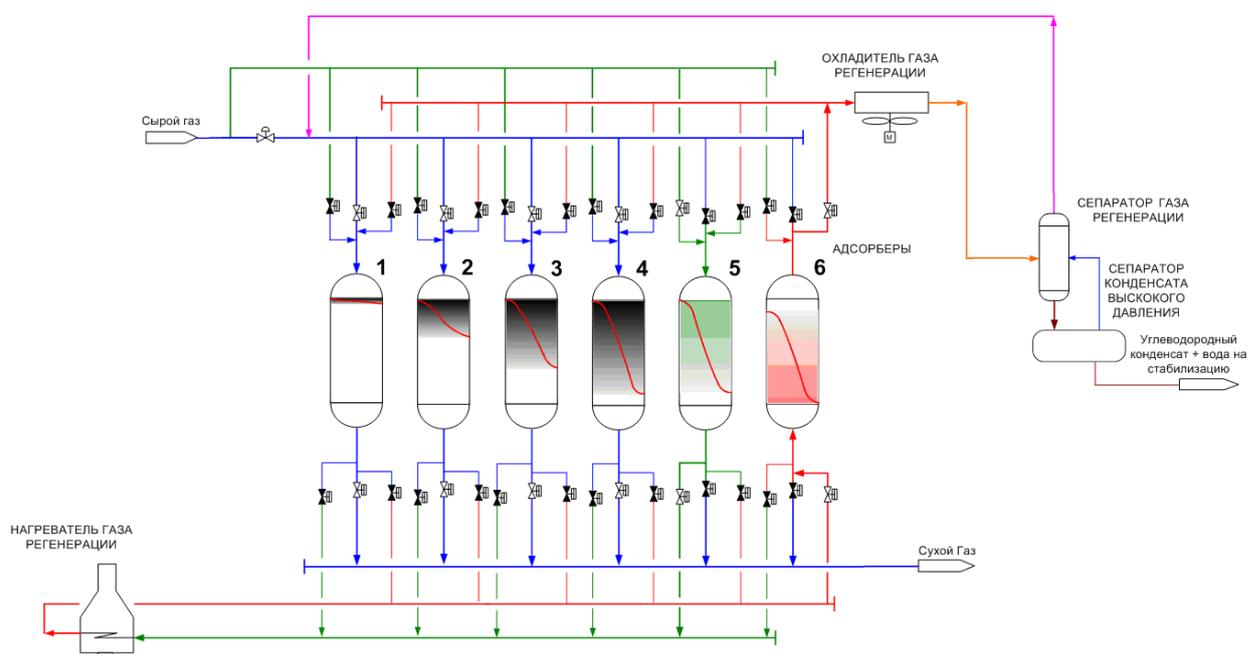


Рисунок 1.7 – Принципиальная технологическая схема процесса подготовки газа к транспорту на основе технологии BASF

#### 1.4.6 Процесс компании «Advantica Technologies Ltd»

Разработанная в 2000 году компанией Advantica Technologies Ltd. Технология очистки газа имеет название «Advanced Adsorption Process Technology» или ADAPT [16].

В процессе ADAPT природный газ, как правило, сушат под высоким давлением на установке, состоящей из двух или более адсорберов. Фаза десорбции (нагрев; охлаждение) адсорбента проводят в одном адсорбере. В данном процессе используются силикагели марки H и WS

Особенности технологии ADAPT:

- линия адсорбции состоит не менее чем из 3 адсорберов, соединенных параллельно, и включает блок регенерации.

- организация движения газа питания (сырого газа) и газа регенерации через адсорберы только сверху вниз;
- регенерация адсорбента, его нагрев и охлаждение, осуществляется в одном адсорбере.

Принципиальная технологическая схема процесса подготовки газа к транспорту на основе технологии компании ADAPT представлена на рисунке 1.8.

В качестве газа регенерации используется часть основного потока, которого достаточно для нагрева и охлаждения силикагеля при его регенерации.

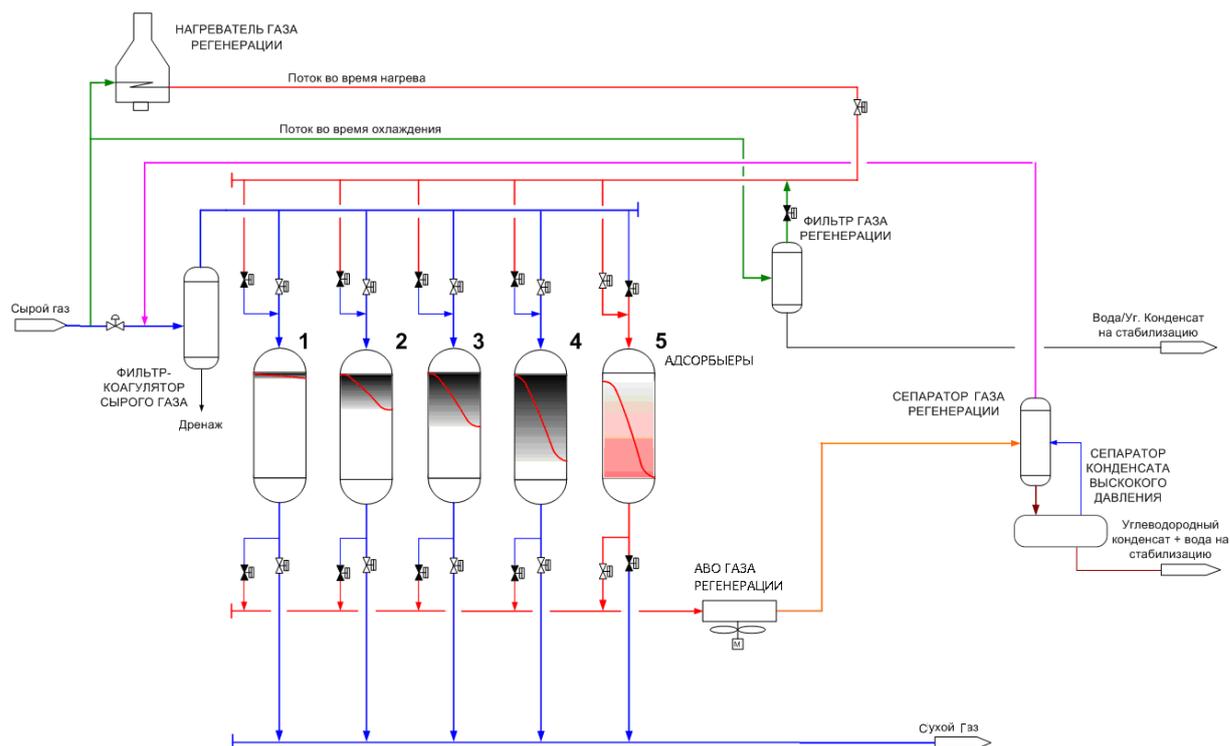


Рисунок 1.8 – Принципиальная технологическая схема процесса подготовки газа к транспорту на основе технологии Advantica

## 1.5 Выводы по Главе 1 и возможные пути оптимизации конструкции адсорбера

Процесс адсорбционной подготовки газа дает возможность получать требуемые характеристики качества подготовки газа по воде и углеводородам, а также позволяет удалять из природного газа такие примеси, как гликоли, метанол и сернистые соединения. Кроме того, процесс адсорбционной осушки, по сравнению с другими технологиями подготовки газа менее чувствителен к возможным сезонным скачкам производительности и к изменению параметров сырьевого газа, таким как температура и давление.

Широкое распространение данного процесса, главным образом обязано появлению новых сорбентов удовлетворяющего требованиям промышленности:

- Высокая адсорбционная емкость по воде и тяжелым углеводородам;

- Низкие затраты на регенерацию сорбента;
- Низкие материальные затраты за счет высокого насыпного веса;
- Низкий износ благодаря гранулированной форме и высокой механической прочности.

В итоге, на основе изучения литературных источников, патентного поиска и сведений от компаний можно судить, что оптимизация процесса осушки газа сводится к совершенствованию сорбирующего материала. В то же время есть и другие способы оптимизации технологического процесса, например, путём совершенствования конструкции адсорберов.

При проектировании адсорберов возникает возможность существенно уменьшить толщину стенки цилиндрической обечайки, крышки и днища за счет использования внутренней огнеупорной футеровки. Для этого возникает необходимость доказать расчетным путём, что футеровка адсорбера снижает температуру и впоследствии можно рассчитать толщину стенки адсорбера по сниженной температуре.

ГОСТ 14249 даёт определение расчетной температуры как максимальной температуры по стенке аппарата. В то же время, ГОСТ Р 51274-99 “Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и метод расчета на прочность” определяет, что термические напряжения нужно считать специальными методами.

Предварительно существует необходимость рассчитать параметры потока газа через пористую среду (слой сорбента) для определения характера течения и характеристик теплопередачи. Это позволит провести тепловой конструкции адсорбера, результатом которого будет итоговая расчетная температура толщины стенки адсорбера.

Главными факторами, влияющими на толщину стенки обечайки, днища и крышки адсорбера являются:

- Давление;
- Тип материала.

Кроме того, попутно на толщину также оказывают влияние:

- Толщина изоляции;
- Расчетная температура допускаемого напряжения стали.

Анализ проектной документации, научно-технической литературы позволил выявить возможные пути оптимизации конструкции адсорбера установки подготовки газа к транспорту:

- Снижение рабочего давления;
- Подбор оптимальной толщины изоляции;
- Подбор конструкционного материала (стали) исходя из дополнительных проектных данных – степени развития транспортной инфраструктуры, необходимости дополнительных затрат на транспортировки адсорбера, и прочее.

## ГЛАВА 2 ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования в настоящей работе являются адсорберы установок подготовки газа к транспорту.

Предмет исследования - пути оптимизации конструкции адсорберов. Для проведения расчетов используются следующие исходные данные.

### 2.1 Исходные данные для проведения расчетов

Исходные данные для гидродинамического, теплового и прочностного расчетов представлены в Таблице 2.1:

Таблица 2.1 – Данные для расчета адсорберов

Проект	Вариант 1	Вариант 2
Внутренний диаметр адсорбера, мм	3620	4600 (4400 с учетом футеровки)
Высота/длина цилиндрической обечайки, мм.	8400	10400
Расчетное давление, МПа	9,7	9,7
Расчетная температура, °С	94/300	94/330
Толщина внутренней футеровки	100	100
Тип футеровки	Firelite LWSH или аналог	Firelite LWSH или аналог

Кроме данных об адсорберах и рабочих условиях, также нужны данные о физических свойствах материалов, таких как:

- коэффициент линейного расширения  $\alpha$ ;
- Коэффициент теплопроводности  $k$ ;
- Пределы текучести  $R_{p2,0}$  и  $R_e$ ;
- Временное сопротивление  $R_m$ .

Сведения об этих данных представлены в разделе 1.4.2 в таблицах 1.4-1.6.

Для проведения газодинамических расчетов к рассмотрению принят типичный состав газа, транспортируемый по магистральным трубопроводам (см. табл. 2.2). Данный газ будет использоваться в ходе регенерации адсорбента на УПГТ.

Таблица 2.2 – Мольный состав газа регенерации

Компонент	Метан	Этан	Пропан	и-бутан	н-бутан	и-пентан
Мольная доля, %	97.5328	0.88	0.1399	0.015	0.0249	0.0174
Компонент	н-пентан	н-гексан	азот	углекислый		

				<b>газ</b>		
Мольная доля, %	0.0174	0.0194	0.9304	0.4101		

Температура газа регенерации была принята равной **288°С**. Кроме того, массовый расход газа регенерации на вход принят равным **125700 кг/ч** для **D=4.4 м**, и **67000 кг/ч** для **D=3.36 м**, а его массовая плотность – **25.14 кг/м<sup>3</sup>**.

Для дальнейшего расчета порозности были проведены измерения гранул сорбента.

**Таблица 2.3 – Размеры гранул сорбента**

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Максимальный продольный размер	4.39	4.94	4.15	5.34	3.38	4.86	4.88	3.82	4.34	4.53
Минимальный продольный размер	3.39	4.34	3.56	4.47	3.59	4.42	4.31	3.45	5.18	4.46

## 2.2 Алгоритм проведения расчетов

На основании данных государственных стандартов [4,9-12] и научно-технической литературы [1,21,22] был составлен алгоритм проведения расчетов.

### 1. Обработка экспериментальных данных

- 1.1 Определить осреднённый диаметр гранул;
- 1.2 Вычислить общую площадь гранул сорбента;
- 1.3 Вычислить порозность слоя.

### 2. Газодинамический расчет

- 2.2 Определить эквивалентный диаметр;
- 2.2 Вычислить скорость газа регенерации в слое;
- 2.3 Рассчитать вязкость газа;
- 2.4 Определить величину критерия Re.

### 3 Тепловой расчет

- 3.1 Рассчитать величину критерия Nu;
- 3.2 Определить коэффициент теплоотдачи “газ – стенка адсорбера”;
- 3.3 Вычислить тепловой поток через стенку адсорбера;
- 3.4 Построить зависимость температуры металла стенки от толщины изоляции.

### 4 Прочностной расчет

- 4.1 Определить зависимость толщины стенки от расчетной температуры;

4.2 Определить зависимость толщины стенки от толщины изоляции и допустимой прочности стали 09Г2С;

4.3 Определить зависимость толщины стенки от толщины изоляции и допустимой прочности стали SA-533М.

## 5. Экономический расчет

5.1 Определить зависимость стоимости адсорбера от толщины изоляции;

5.2 Рассчитать зависимость стоимости адсорбера от толщины стенки и типа стали;

5.3 Найти зависимость для оптимальной стоимости.

## 2.3 Методы исследования

В настоящей работе используются следующие методы:

- Для проведения литературного обзора по настоящей тематике: изучение литературы, анализ, синтез, сравнение и обобщение;
- Для построения методики: анализ, сравнение, идеализация;
- Для реализации алгоритма расчета – некоторые специальные математические методы (метод Ньютона, метод наименьшей суммы квадратов);
- Для выявления перспектив дальнейшего исследования: обобщение опыта, постановка проблем, аналогия.

Большинство методов являются общими и подходящими для любого рода деятельности. Остановимся на специальных методах:

- Метод Ньютона применялся для решения и построения неявных зависимостей, полученных на основании опытных данных и их обобщения;
- Метод наименьшей суммы квадратов применялся для поиска аппроксимирующих функций;

Для автоматизации и упрощения расчетов использовалось следующее программное обеспечение:

- Matlab R2016a (academic version) – для упрощения расчетов путем автоматизации вычисления, использованием программных функций и программирования;
- Jupyter Notebook – веб-оболочка для высокоуровневого языка программирования IPython 3.6. Используется для реализации сложных математических операций в алгоритме расчета динамической вязкости;

## ГЛАВА 3 РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 3.1 Обработка экспериментальных данных

Измерения гранул сорбента проводились микрометром. Результаты измерений приведены в Таблице 3.1

**Таблица 3.1** – Размеры гранул сорбента и результаты вычислений осреднённого значения

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Максимальный продольный размер	4.39	4.94	4.15	5.34	3.38	4.86	4.88	3.82	4.34	4.53
Минимальный продольный размер	3.39	4.34	3.56	4.47	3.59	4.42	4.31	3.45	5.18	4.46
Средние величины	3.80	4.55	3.765	4.815	3.395	4.55	4.505	3.545	4.67	4.405
Осреднённое значение	4.20									
N.B.: Количество гранул в образце измерялось вручную и составило 357 шт.										

Средние величины вычислялись как среднее арифметическое от максимального и минимального продольного размеров. Осреднённое значение диаметра гранулы сорбента вычислялось как среднее по выборке.



**Рисунок 3.1** – Измеряемые гранулы сорбента производства BASF

Затем была измерена площадь образца, а общая площадь гранул была вычислена как произведение площади осреднённой гранулы на количество гранул в образце.

Итоговый показатель порозности слоя вычислялся следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{S_a}{S} = \frac{\pi \cdot N_{об} \cdot d_{cp}^2 / 4}{\pi \cdot d_{об}^2 / 4} = \frac{N_{об} \cdot d_{cp}^2}{d_{об}^2} = \frac{357 \cdot 4.2^2}{89^2} = 0.783 \quad (3.1)$$

Где  $S_a$  – площадь гранул в образце,  $S$  – площадь поверхности образца.

## 3.2 Газодинамический расчет

С учетом порозности слоя, эквивалентный диаметр для проведения газодинамических расчетов можно найти следующим образом:

$$d_s = (1 - \varepsilon) \cdot d \quad (3.2)$$

Где  $d$  – диаметр адсорбера. Соответственно, для  $D_{вн}=4,4$  м эквивалентный диаметр составляет **0.955** м, а для  $D_{вн}=3,6$  м – **0.781** м.

Для определения  $Re$  необходимо знать вязкость газа регенерации, а также его скорость.

Среднемассовую скорость смеси природного газа следует рассчитать следующим образом:

$$\text{Для } D_{вн}=4,4 \text{ м} \quad w_0 = \frac{4 \cdot G_1}{\rho \cdot \pi \cdot d_e^2 \cdot 3600} = 1.94 \text{ м/с} \quad (3.3)$$

$$\text{Для } D_{вн}=3,6 \text{ м} \quad w_0 = \frac{4 \cdot G_2}{\rho \cdot \pi \cdot d_e^2 \cdot 3600} = 0.97 \text{ м/с} \quad (3.4)$$

Для вычисления вязкости газа в программном обеспечении Python 3.5 был выполнен расчет согласно ГОСТ 30319.3 2015 [16]. Для температуры и газа регенерации ( $288^\circ\text{C}$ ) и с учетом его мольного состава было вычислено следующее значение вязкости газа – **1343.65 мкПа\*с**.

Таким образом, в предположении, что цилиндрическая обечайка адсорбера представляет собой прямую короткую трубу, можно рассчитать  $Re$  следующим образом:

$$\text{Для } D_{вн}=4,4 \text{ м} \quad Re = \frac{w_0 \cdot R_0}{\mu / \rho} \equiv \frac{w_0 \cdot d_e}{\mu / \rho} = \frac{1.94 \cdot 0.955}{1343.65 \cdot 10^{-6} / 25.14} = 34664 \quad (3.5)$$

$$\text{Для } D_{вн}=3,6 \text{ м} \quad Re = \frac{w_0 \cdot R_0}{\mu / \rho} \equiv \frac{w_0 \cdot d_e}{\mu / \rho} = \frac{0.97 \cdot 0.781}{1343.65 \cdot 10^{-6} / 25.14} = 42376 \quad (3.5)$$

Таким образом, несмотря на небольшую скорость газа, в адсорбере наблюдается турбулентный режим течения газа.

## 3.3 Тепловой расчет адсорбера

### 3.3.1 Расчет коэффициента теплоотдачи “газ-стенка”

Данные о режиме течения газа позволяют выбрать расчетную формулу для определения критерия  $Nu$ .

$$Nu_{f,d} = 0.021 \cdot Re_{f,d}^{0.8} \cdot Pr_f^{0.43} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_l \quad (3.6)$$

Поправку  $\varepsilon_t$ , учитывающую изменение физических свойств среды в зависимости от температуры, рассчитывают для температуры потока и для температуры стенки канала, однако в виду того, что в настоящей работе в адсорбере в режиме регенерации имеется существенный температурный напор, то согласно (1.19) примем поправку  $\varepsilon_t=1$

Поправочный коэффициент  $\bar{\varepsilon}_l$ , учитывающий влияние на теплоотдачу процесса гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена равен  $\bar{\varepsilon}_l \approx 1 + 2d/l = 1 + 2 \cdot 1.3934/10.4 = 1.268$ .

$$\begin{aligned} \text{Для } D_{вн}=4,4 \text{ м} \quad Nu_{f,d} &= 0.021 \cdot Re_{f,d}^{0.8} \cdot Pr_f^{0.43} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_l = \\ &= 0.021 \cdot 34664^{0.8} \cdot 0.7^{0.43} \cdot 1 \cdot 1.268 = 97.87 \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Для } D_{вн}=3,6 \text{ м} \quad Nu_{f,d} &= 0.021 \cdot Re_{f,d}^{0.8} \cdot Pr_f^{0.43} \cdot \varepsilon_t \cdot \bar{\varepsilon}_l = \\ &= 0.021 \cdot 42376^{0.8} \cdot 0.7^{0.43} \cdot 1 \cdot 1.268 = 114.93 \end{aligned} \quad (3.8)$$

На основании вычисленного значения критерия Нуссельта и  $\lambda_2$ , принятого на основе справочных данных [21], можно рассчитать коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ :

$$\text{Для } D_{вн}=4,4 \text{ м} \quad \alpha = \frac{\lambda_2 \cdot Nu_{f,d}}{d_e} = \frac{0.08 \cdot 97.87}{0.995} = 8.19 \quad (3.9)$$

$$\text{Для } D_{вн}=3,6 \text{ м} \quad \alpha = \frac{\lambda_2 \cdot Nu_{f,d}}{d_e} = \frac{0.08 \cdot 114.93}{0.781} = 11.77 \quad (3.10)$$

### 3.3.2 Вычисление зависимости температуры металла стенки от толщины изоляции

Согласно справочным данным, значения коэффициентов теплопроводности составляют 0.04 Вт/м°C для материала изоляции, 80 Вт/м°C для стали, 0.052 Вт/м°C для внешней изоляционной оболочки.

Значения толщины футеровки  $h_\phi$  изменялись в диапазоне от 10 до 400 мм. Ниже приведен расчет для значения  $h_\phi = 100$  мм.

Составляющие термического сопротивления рассчитываются следующим образом:

$$R_{11} = \frac{1}{\alpha \cdot d} = \frac{1}{4.1531 \cdot 4.4} = 0.0547 \quad (3.10)$$

$$R_{21} = \frac{\ln((d + 2 \cdot h_\phi)/d)}{\lambda_1} = \frac{\ln(4.6/4.4)}{0.04} = 0.5556 \quad (3.11)$$

$$R_{31} = \frac{\ln((d + 2 \cdot h_\phi + 2 \cdot s_p)/(d + 2 \cdot h_\phi))}{\lambda_2} = \frac{\ln(4.81/4.6)}{80} = 2.79 \cdot 10^{-4} \quad (3.12)$$

$$R_{41} = \frac{\ln((d + 2 \cdot h_\phi + 2 \cdot s_p + 2 \cdot h_u)/(d + 2 \cdot h_\phi + 2 \cdot s_p))}{\lambda_3} = \frac{\ln(5.01/4.81)}{0.052} = 0.3917 \quad (3.13)$$

$$R_{51} = \frac{1}{\alpha_{вн.сп} \cdot (d + 2 \cdot h_\phi + 2 \cdot s_p + 2 \cdot h_u)} = \frac{1}{7.9 \cdot 5.01} = 0.0253 \quad (3.14)$$

Суммарный тепловой поток через стенку адсорбера составляет:

$$q_l = \frac{\pi \cdot (T - T_0)}{\sum_{i=1}^5 R_{il}} = \frac{3.14 \cdot (561.15 - 233.15)}{1.0276} = 1002.2 \quad (3.15)$$

Температуры в многослойной стенке адсорбера высчитываются следующим образом:

$$T_{w1} = T - q_l \cdot \frac{R_{1l}}{\pi} = 561.15 - 1002.2 \cdot \frac{0.0547}{3.14} = 543.6835\text{K} \quad (3.16)$$

$$T_{w2} = T_{w1} - q_l \cdot \frac{R_{2l}}{\pi} = 543.6835 - 1002.2 \cdot \frac{0.5556}{3.14} = 366.3323\text{K} \quad (3.17)$$

$$T_{w3} = T_{w2} - q_l \cdot \frac{R_{3l}}{\pi} = 366.3323 - 1002.2 \cdot \frac{2.79 \cdot 10^{-4}}{3.14} = 366.2433\text{K} \quad (3.18)$$

$$T_{w4} = T_{w3} - q_l \cdot \frac{R_{4l}}{\pi} = 366.2433 - 1002.2 \cdot \frac{0.3917}{3.14} = 241.2144\text{K} \quad (3.19)$$

$$T_0 = T_{w4} - q_l \cdot \frac{R_{5l}}{\pi} = 241.2144 - 1002.2 \cdot \frac{0.0253}{3.14} = 233.15\text{K} \quad (3.20)$$

Так как итоговое значение  $T_0$  совпадает с заданным, можно заключить, что расчет сошелся.

Для других значений толщины футеровки  $h_\phi$  в диапазоне от 10 до 400 мм расчеты производились согласно блок-схеме, приведенной на рисунке X. На другие значения изоляции расчет проводился аналогичным образом. Листинг расчета приведён в приложении Ж.

В результате выполнения этого расчета получены значения температуры на стыке футеровки и стали адсорбера в зависимости от толщины изоляции. На основании рассчитанных значений  $T_{w2}$  была построена графическая зависимость температуры металла ( $T_{w2}$ ) от толщины изоляции ( $h_\phi$ ).

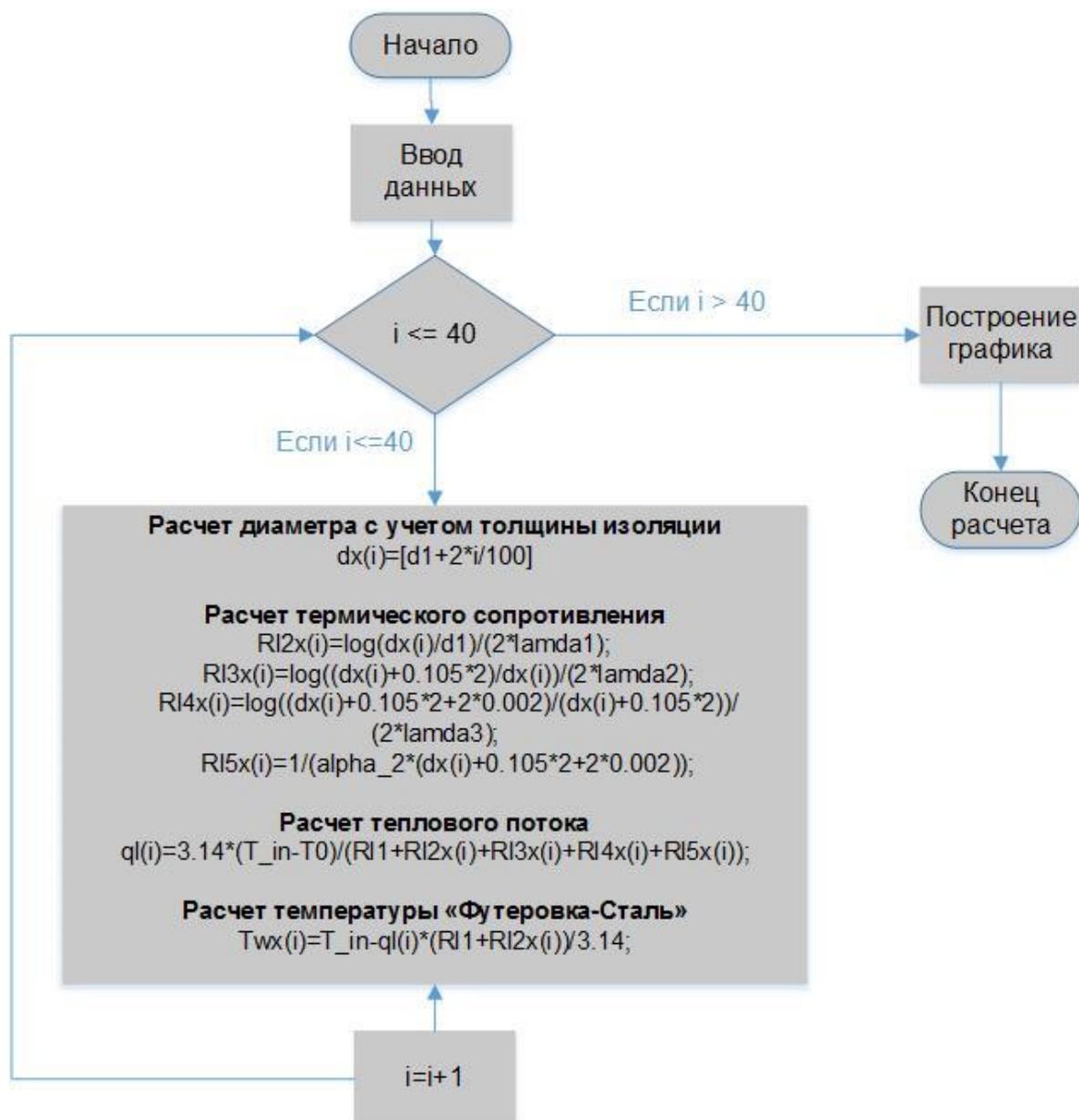
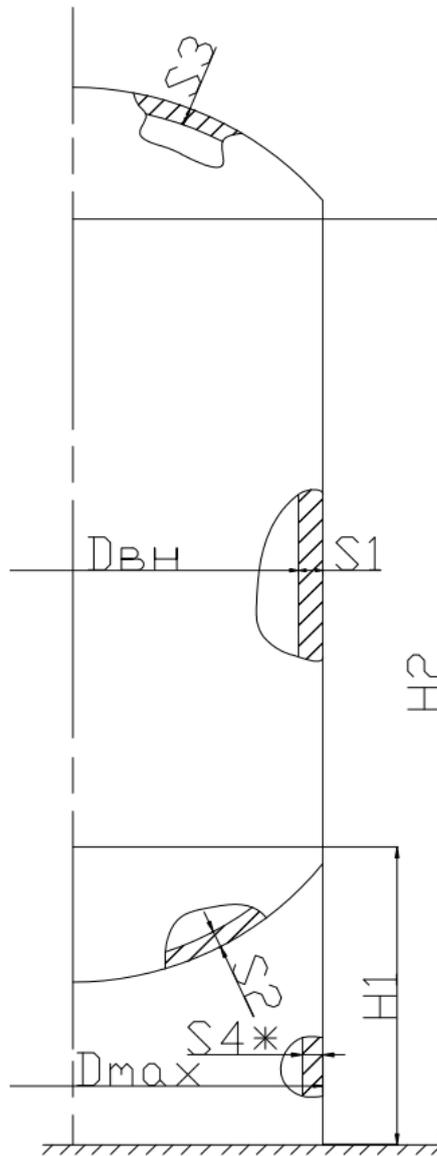


Рисунок 3.2 – Блок-схема расчета температуры стали адсорбера при толщине изоляции в диапазоне от 10 до 400 мм.

### 3.4 Прочностной расчет

На основании теплового расчета можно утверждать, что за расчётную температуру при вычислении толщины стенки адсорбера следует принять температуру  $T_{w2}$ . Эта температура действительна для расчета толщины цилиндрической обечайки, днища и крышки. Расчетная схема приведена на Рисунке 3.3.

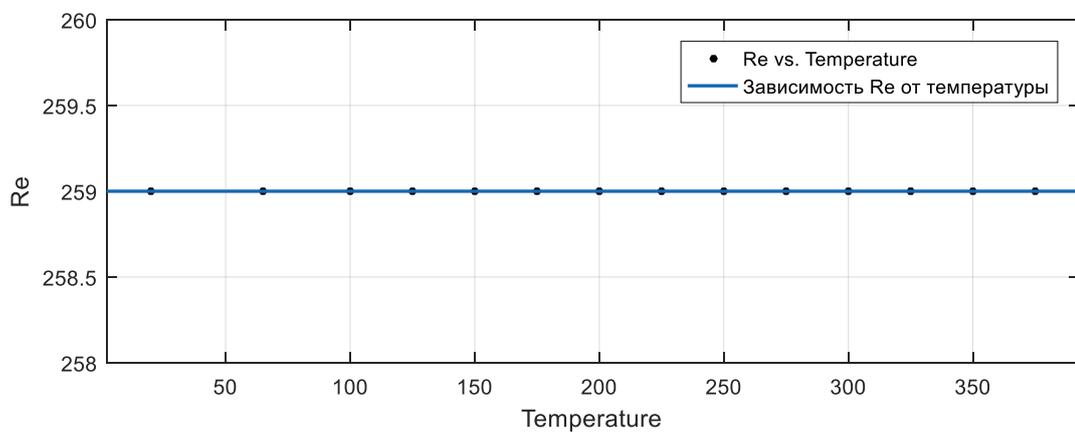
В силу того, что прочностные характеристики сталей обычно зависят от температур эксплуатации, необходимо предварительно произвести поиск аппроксимирующих функций для статического и динамического пределов прочности. Подбор аппроксимационных функций представлен в следующей секции.



\*В настоящей работе не производится расчет опорной обечайки.

Рисунок 3.3 – Расчетная схема адсорбера

### 3.4.1 Анализ и подбор аппроксимирующих функций для физических характеристик сталей адсорберов



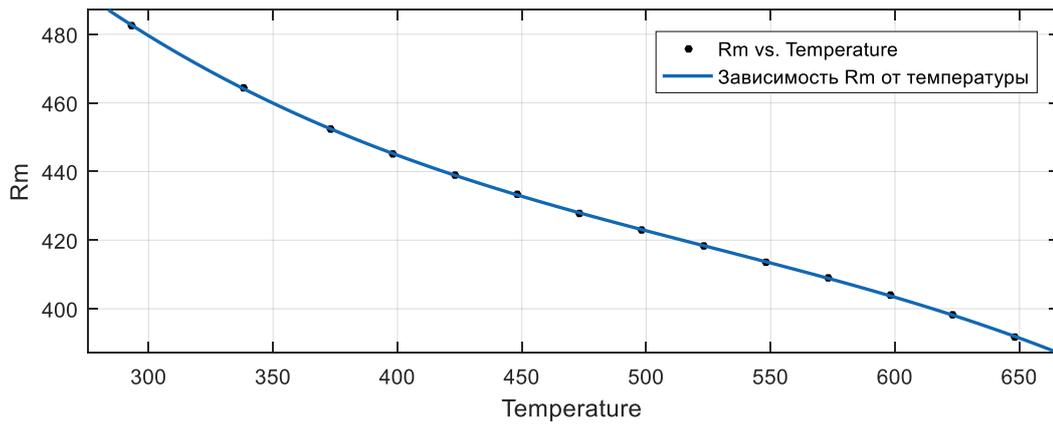


Рисунок 3.4 – Соотношение  $R_e$  и  $R_m$  от температуры и аппроксимирующие зависимости для физических свойств ( $R_e$  – рисунок сверху,  $R_m$  – рисунок снизу) стали SA-533M

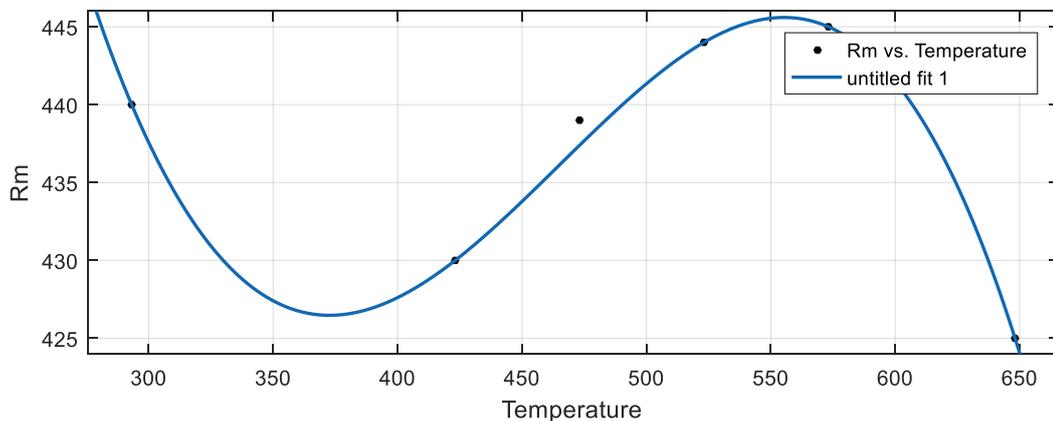
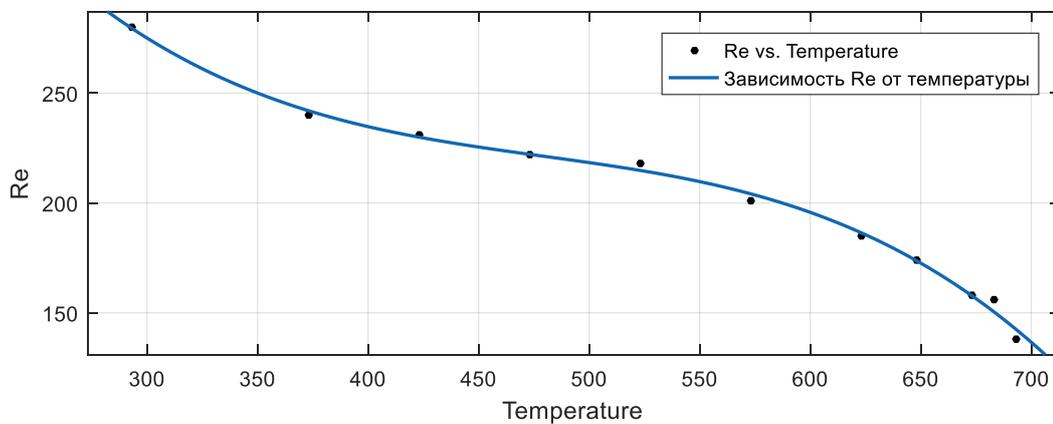


Рисунок 3.5 – Соотношение  $R_e$  и  $R_m$  от температуры и аппроксимирующие зависимости для физических свойств ( $R_e$  – рисунок сверху,  $R_m$  – рисунок снизу) стали 09Г2С

Допускаемое напряжение  $[\sigma]$  при расчете по предельным нагрузкам сосудов и аппаратов, работающих при статических нагрузках, для сталей 09Г2С и SA533-M определяют:

$$[\sigma] = \eta \cdot \min\left(\frac{R_e}{n_\tau}; \frac{R_m}{n_\sigma}\right) \quad (3.21)$$

Здесь коэффициенты соответственно:  $\eta = 1$ ,  $\eta_r = 1,5$ ,  $\eta_e = 2,4$ . В расчете выполнялась подстановка аппроксимирующих выражений в выражения для  $R_e$  и  $R_m$ , для чего создавались две функции в программном пакете MatLab - Sigma09G2C(t) для стали 09Г2С (см. приложение Б), Sigma15H5M для стали 15Х5М (см. приложение В), SigmaSA\_533M(t) для стали SA-533М (см. приложение Г) и Sigma304SS(t) для стали AISI 304SS (см. приложение Д).

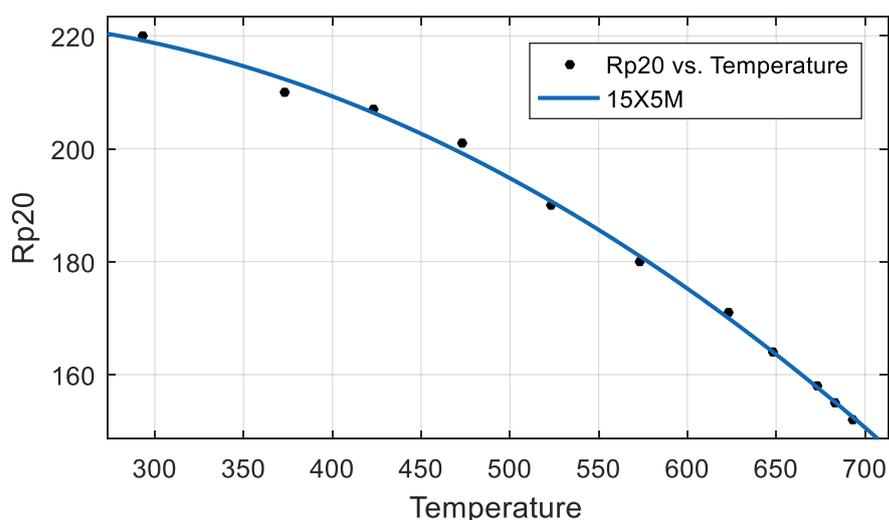
Соответственно, выражение можно преобразовать к виду:

$$[\sigma] = \min\left(\frac{R_e}{1,5}; \frac{R_m}{2,4}\right) \quad (3.22)$$

Здесь  $R_e$  и  $R_m$  принимают выражения, представленные в Таблице 12.

**Таблица 3.1 – Аппроксимирующие выражения для расчета физических свойств сталей 09Г2С и SA-533М**

Аппроксимирующие выражения	Сталь
$R_e = -5.037 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 0.007242 \cdot T^2 - 3.609 \cdot T + 841.9$	09Г2С
$R_m = 8.535 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 0.0001739 \cdot T^3 + 0.1293 \cdot T^2 - 41.32 \cdot T + 5192$	
$R_e = 259$	SA-533М
$R_m = -1.693 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 0.002671 \cdot T^2 - 1.591 \cdot T + 762.3$	
$R_{p2,0} = -0.0002529 \cdot T^2 + 0.08269 \cdot T + 216.7$	15Х5М
$R_m = -3.486 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 6.948 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 0.04993 \cdot T^2 + 15 \cdot T - 1198$	
$R_{p2,0} = 8.109 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 0.001176 \cdot T^2 + 0.3314 \cdot T + 192.8$	304SS
$R_{p2,0} = -1.456 \cdot 10^{-6} \cdot T^3 + 0.002859 \cdot T^2 - 2.01 \cdot T + 902.2$	



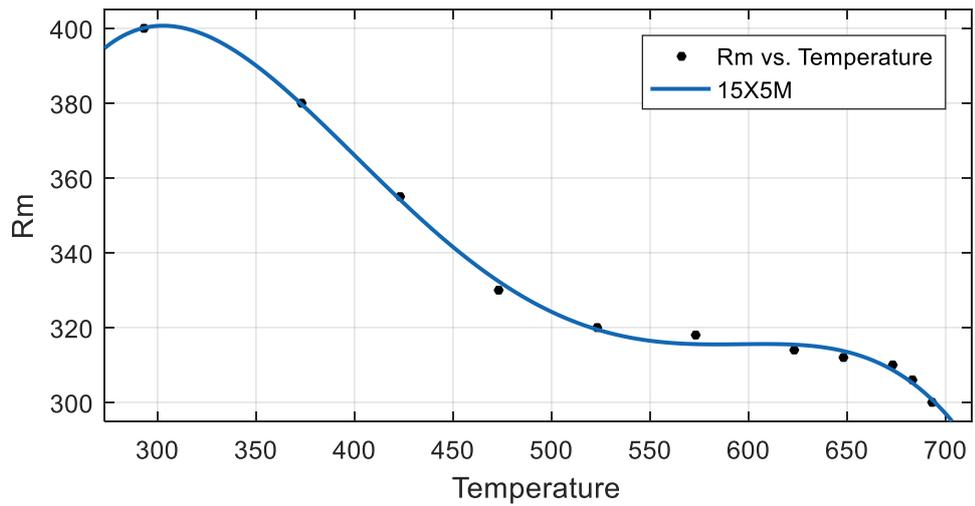


Рисунок 3.5 – Соотношение  $R_{p2,0}$  и  $R_m$  от температуры и аппроксимирующие зависимости для физических свойств ( $R_{p2,0}$  – рисунок сверху,  $R_m$  – рисунок снизу) стали 09Г2С

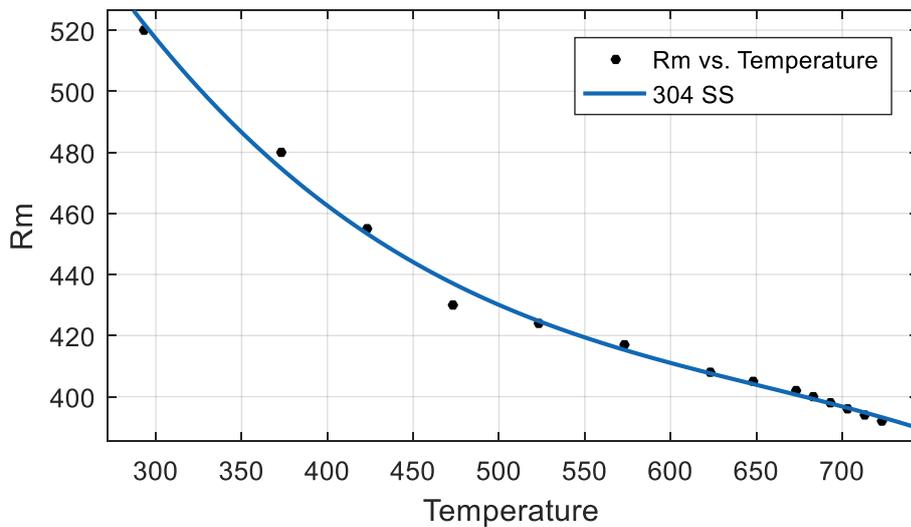
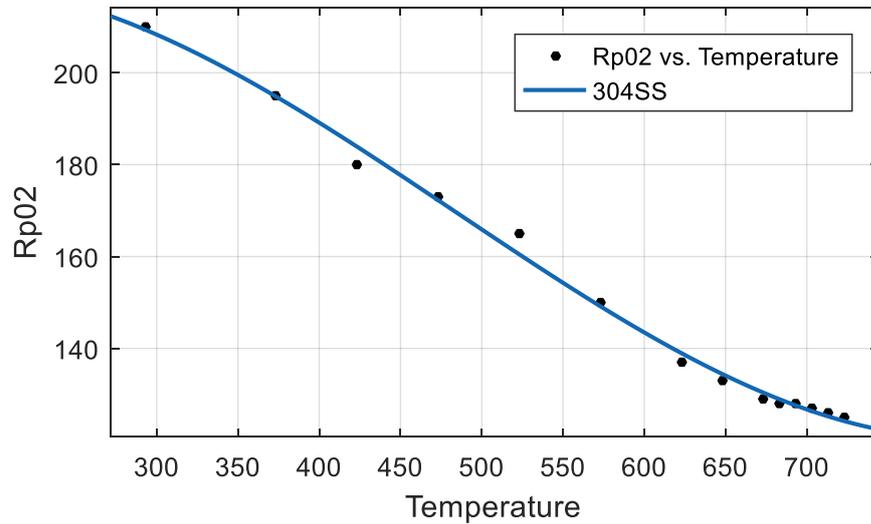


Рисунок 3.5 – Соотношение  $R_{p2,0}$  и  $R_m$  от температуры и аппроксимирующие зависимости для физических свойств ( $R_{p2,0}$  – рисунок сверху,  $R_m$  – рисунок снизу) стали AISI 304SS

### 3.4.2 Зависимость толщины стенки адсорбера от толщины изоляции и типа стали

Толщины обечайки, крышки и днища сосуда под давлением следует рассчитывать по формулам, описанным в секции 1.3.4. Ниже приведён расчет для  $D_{вн}=4,4$  м,  $h_{\phi}=100$  мм,  $T_{w2}=94^{\circ}\text{C}$  и стали 09Г2С.

$$s_p = \frac{pD}{2[\sigma]\phi_p - p} = \frac{9.7 \cdot 10^6 \cdot 4.4}{2[\sigma]0.95 - 9.7 \cdot 10^6} = 141.5(\text{мм}) \quad (3.23)$$

Здесь  $\phi_p = 0.95$ , а  $[\sigma]$  определяется следующим образом:

$$[\sigma] = \min\left(\frac{R_e}{1.5}; \frac{R_m}{2.4}\right) = \min\left(\frac{242.83}{1.5}; \frac{243.85}{2.4}\right) = \min(163.42; 164.38) = 163.42 \text{ МПа}$$

Где:

$$R_e = -5.037 \cdot 10^{-6} \cdot 367^3 + 0.007242 \cdot 367^2 - 3.609 \cdot 367 + 841.9 = 242.83 \text{ МПа}$$

$$R_m = 8.535 \cdot 10^{-8} \cdot 363.15^4 - 0.0001739 \cdot 363.15^3 + 0.1293 \cdot 363.15^2 - 41.32 \cdot t + 5192 = 243.85 \text{ МПа}$$

На основании проектных данных определяем прибавку к расчетным толщинам для компенсации коррозионных эффектов:

$$c = c_1 + c_2 = 1 + 0.5 = 1.5 \quad (3.24)$$

Соответственно, итоговая толщина стенки определяется как:

$$s_1 = s_p + c = 141.5 + 1.5 = 143(\text{мм}) \quad (3.25)$$

Толщину стенки  $s_2$  следует рассчитывать по формулам:

$$s_{2P} = \frac{pD}{2[\sigma]\phi - 0.5p} = \frac{9.7 \cdot 10^6 \cdot 4.4}{2[\sigma]0.95 - 0.5 \cdot 9.7 \cdot 10^6} = 140.5291 \quad (3.26)$$

$$s_2 \geq 140.5291 + 1.5 = 142.0291 \quad (3.27)$$

$$s_2 = 142 \quad (3.28)$$

Толщину стенок крышек и днищ определяют методом последовательных приближений. Предварительно толщину стенки следует определять по формуле:

$$s_{3R} = \frac{9.7 \cdot 10^6 \cdot 3.62}{2[\sigma]0.95 - 9.7 \cdot 10^6} = 141.5(\text{мм}) \quad (3.29)$$

Исполнительная толщина стенки соответствует условию:

$$s_3 \geq s_{3R} + c = 143(\text{мм}) \quad (3.30)$$

$$s_3 = 143(\text{мм}) \quad (3.31)$$

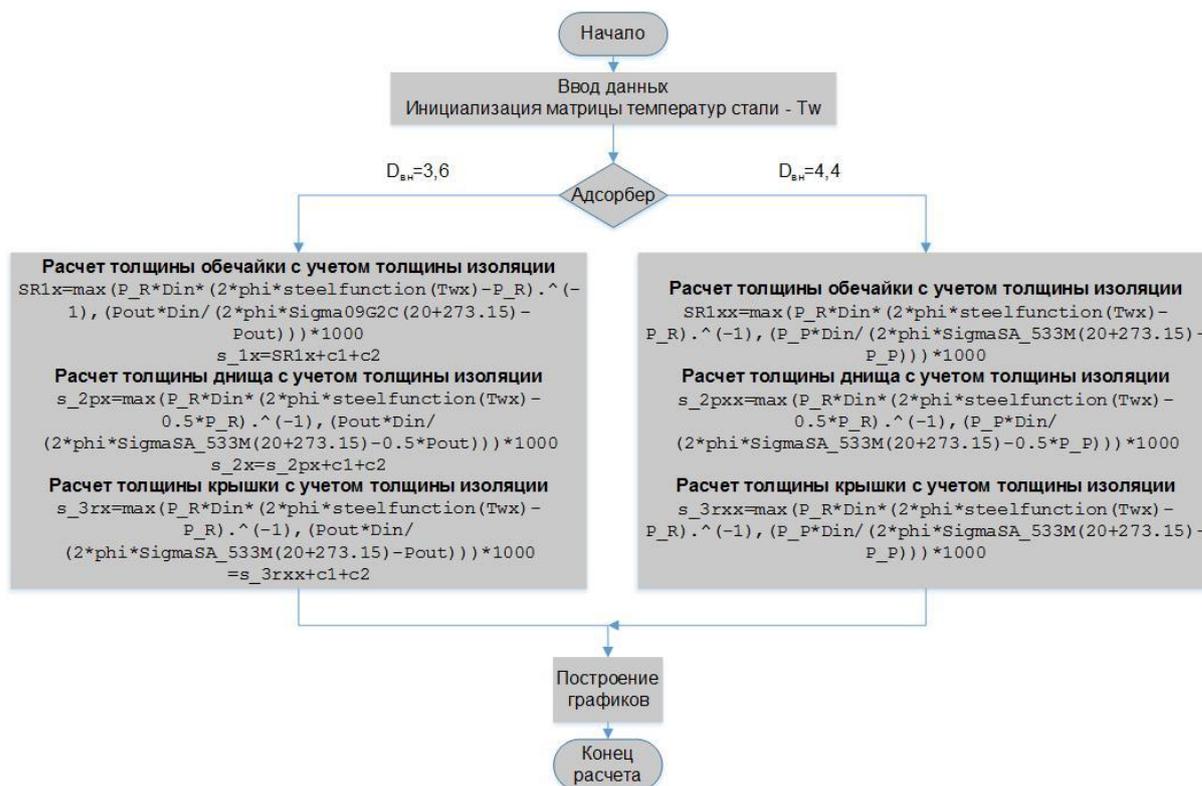


Рисунок 3.6 – блок схема расчета зависимости толщины обечайки, днища и крышки от толщины изоляции и типа стали

Расчеты для толщины изоляции от 10 до 400 мм выполнялись согласно приведённой на рисунке 3.6 блок-схеме. Результатом расчета стали графические зависимости, подробное обсуждение которых приведено в Главе 5 в Разделе 5.4.

Расчеты выполнялись в программном пакете MatLab. В Приложениях 3-К приведен листинг расчетов.

### 3.4.3 Зависимость толщины стенки адсорбера от давления с учетом температуры и типа стали

Для расчета толщины стенки в зависимости от давления и температуры использовался интервал давления от 0.1 до 10 МПа с шагом в 0.25 МПа. В качестве интервала температур использовались полученные тепловым расчетом температуры.

В программном комплексе MatLab были рассчитаны 1600 значений согласно алгоритму, приведённому в блок-схеме – Рисунок 3.6. Расчет производится согласно формуле (1.29), которая в данном виде записывается следующим образом:

$$S_p^{i,j} = \frac{p^i D}{2[\sigma(T_w^j)]\varphi_p - p^i} \quad (3.32)$$

Где  $P^i$  – давления из интервала расчетных давлений, соответствующее шагу  $i$ ;  $T_w^j$  – температуры, полученные в результате теплового расчета, соответствующие шагу  $j$ .

Результатом расчета стали графические зависимости, подробное обсуждение которых приведено в Главе 4. В Приложениях 3-К приведен листинг расчетов.

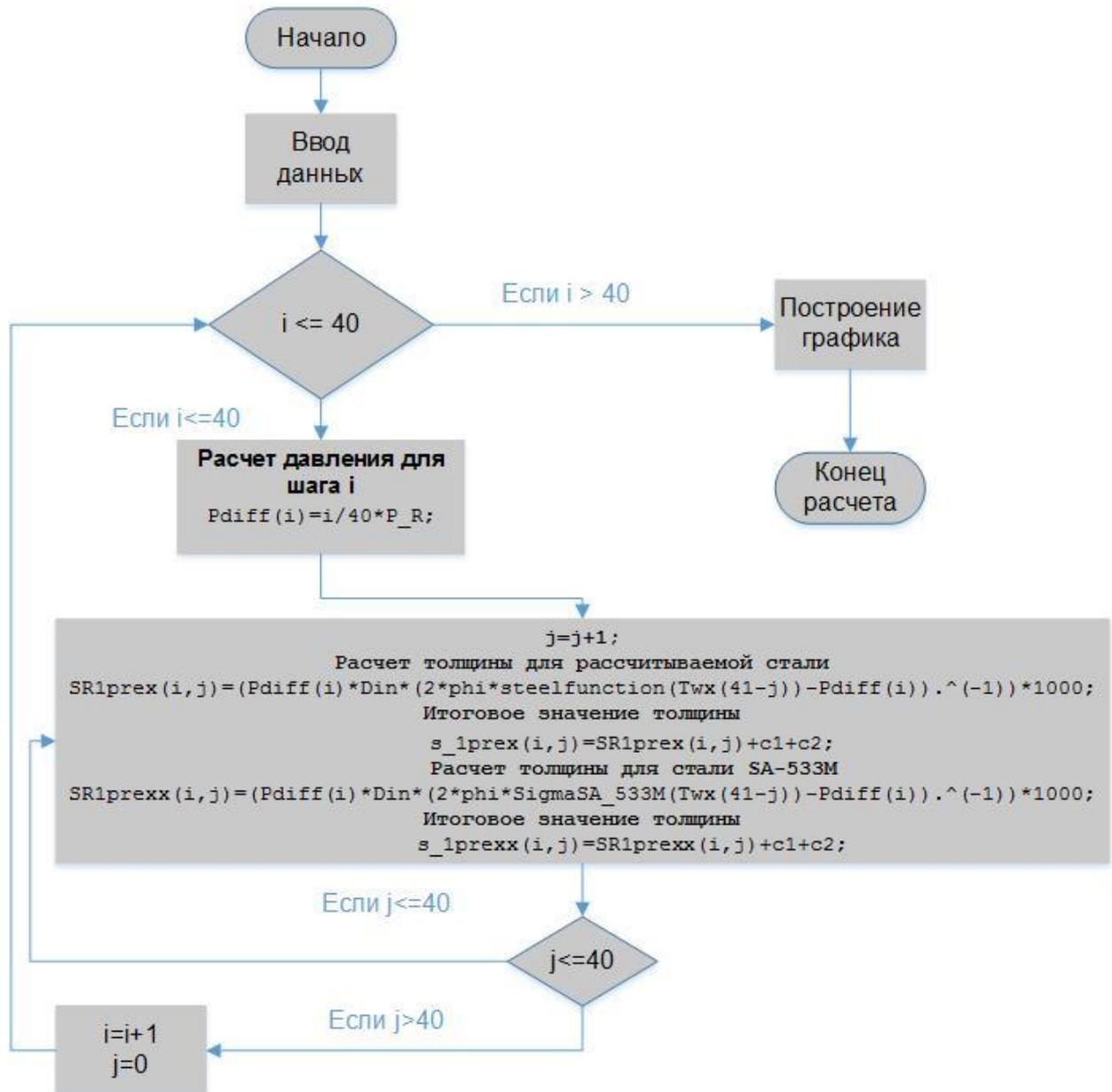


Рисунок 3.6 – Блок-схема расчета толщины адсорбера в зависимости от давления и температуры

## ГЛАВА 4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В силу сложившейся экономической ситуации, от проектов подготовки газа к транспорту требуется еще большая степень ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Даже небольшое снижение потребления конструкционных ресурсов без потерь эффективности процесса в масштабе промышленности даёт значительную финансовую экономию. Данное обстоятельство подчеркивает значимость ресурсоэффективности и ресурсосбережения в нефтегазовых проектах, а сложившаяся экономическая обстановка требует обратить пристальное внимание на задачи оптимизации конструкции металлоёмких проектов, одним из которых является подготовка газа к транспорту.

В настоящей работе исследуются факторы, которые так или иначе могут повлиять на ресурсоэффективность установок подготовки газа к транспорту, снизив массу адсорберов, самого металлоёмкого оборудования УПГТ. В корне неверно анализировать эти факторы учета экономической составляющей, ведь только комплексный технико-экономический анализ позволяет сделать верные выводы.

В связи с этим, **целью** настоящей главы магистерской диссертации является подготовка экономических данных для итогового комплексного анализа рассчитанных вариантов адсорбера. Для достижения поставленной цели формулируются следующие **задачи**:

- 1) Привести теоретическую справку по используемому методу расчета стоимости адсорберов;
- 2) Сформулировать исходные данные к расчету;
- 3) Составить алгоритм расчета;
- 4) Привести примеры расчета;
- 5) Сформировать замечания экономического характера для последующего их обсуждения в свете технических решений в Главе 5.

### 4.1 Теоретическая справка

В силу того, что адсорберы – технологическое оборудование штучного производства, для расчета стоимости «простого» адсорбера была применена теория формирования стоимости технологического оборудования «индивидуального» изготовления. Под «простым» адсорбером понимается сосуд под давлением, состоящий из обечайки, крышки и днища, за исключением подводящего и отводящего трубопроводов, технологических отверстий, люков, стеки и массы сорбента.

Обычно для формирования стоимости технологического оборудования используется затратный подход с использованием метода поэлементного расчета [23], согласно которому необходимо произвести следующие действия:

1. Составляется перечень технологического оборудования «индивидуального» изготовления оцениваемого объекта.
2. Полная себестоимость оборудования «индивидуального» изготовления определяется согласно формуле:

$$S = \delta C_{\text{з}} \cdot m \cdot (K_T + K_C + K_{\Sigma}) \quad (4.1)$$

Где  $\delta C_{\text{з}}$  – удельная приведенная стоимость 1 кг оборудования «индивидуального» изготовления;

$m$  – масса оборудования;

$K_T$  – коэффициент трудоемкости;

$K_C$  – коэффициент стоимости;

$K_{\Sigma}$  – обобщенный показатель стоимости по группам материалов.

Удельная приведенная стоимость 1 кг оборудования «индивидуального» изготовления  $\delta C_{\text{з}}$  определяется оптовой стоимостью 1 кг стали, из которой изготовлено оборудование. Данный показатель определяется на основании стоимости углеродистой стали типа «сталь 09Г2С» и «сталь SA-533М» на момент расчета стоимости оборудования.

Коэффициент трудоемкости  $K_T$  указывает на трудоемкость обработки марок материалов, из которых изготовлено оборудование.

Коэффициент  $K_C$  является показателем относительной стоимости данной марки материала по сравнению с углеродистой сталью

Обобщенный показатель стоимости по группам материалов  $K_{\Sigma}$  является поправочным коэффициентом, который уточняет стоимость оборудования нефтехимической промышленности, состоящей из нескольких элементов, материал которых отличается от основной группы.

## 4.2 Исходные данные для экономического расчета

Анализ ресурсоэффективности и ресурсосбережения проводился на основе результатов прочностного расчета. Исходными данными для экономической части исследования являются значения толщин стенки обечайки, днища и крышка адсорбера.

Среднее значение коэффициентов трудоемкости  $K_T$ , стоимости  $K_C$  и обобщенного показателя стоимости  $K_{\Sigma}$  по группам материалов приведены в таблице 4.1 согласно [23].

Таблица 4.1 – Значение коэффициентов  $K_T$ ,  $K_C$  и  $K_{\Sigma}$  по группам материалов

Тип материала	Группа	$K_T$	$K_C$	$K_{\Sigma}$			
				Емкостное	Сепараторы	Теплообмен ник	АВО
Углеродистая сталь*	1	1	1	1	4,5	7,0	11,5
Качественная углеродистая сталь, (низколегированные стали)**	2	2,5	2,0	9	12,5	14,6	23,2
Нержавеющие стали***	3	2,6	5,6	23,2	-	-	-

Жаропрочные стали	4	3,6	17	61,5	-	-	-
-------------------	---	-----	----	------	---	---	---

- \* Углеродистая сталь – сталь 20;
- \*\* Качественная углеродистая сталь – сталь типа 09Г2С;
- \*\*\* Нержавеющие стали – сталь X18Н10Т.

Однако в силу того, что анализ стоимости оборудования сводится к расчету стоимости адсорбера, в текущем разделе опускает пункт 1, и непосредственно осуществляется пункт 2.

Для определения удельной приведенной стоимости 1 кг оборудования  $\delta Ц_3$  был произведен анализ динамики изменения цен на европейских и российских рынках в открытых источниках [24-26]

Из результатов анализа динамики изменения цены на углеродистую сталь следует, что в качестве удельной приведенной стоимости можно использовать оптовую цену стали за апрель 2017 года, соответствующую **44** рублям за килограмм стали **09Г2С**, **207** рублям за килограмм стали **SA-533М**, **170** рублям за килограмм стали **15Х5М** и **270** рублям за килограмм стали **AISI 304SS**.

Материал адсорбера (09Г2С, SA-533М, 15Х5М, AISI 304SS) относится к группе сталей №2. Однако для осуществления расчета стоимости адсорбера необходимо произвести расчет массы крышки, днища и обечайки адсорбера согласно следующим формулам:

$$m_{об} = \rho V_{об} = \rho \cdot \pi \cdot H \left[ \left( \frac{D_{вн} + 2h_{\phi} + 2h_i}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_{вн} + 2h_{\phi}}{2} \right)^2 \right] \quad (4.2)$$

$$m_{дн} = m_{кр} = \rho V = \rho \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi \left[ \left( \frac{D_{вн} + 2h_{\phi} + 2h_i}{2} \right)^3 - \left( \frac{D_{вн} + 2h_{\phi}}{2} \right)^3 \right] \quad (4.3)$$

Где  $h_{\phi}$  – толщина слоя футеровки,  $h_i$  – толщина слоя металла,  $D_{вн}$  – внутренний проходной диаметр адсорбера,  $\rho$  – плотность металла.

### 4.3 Алгоритм экономического расчета

Расчет производился согласно следующему алгоритму:

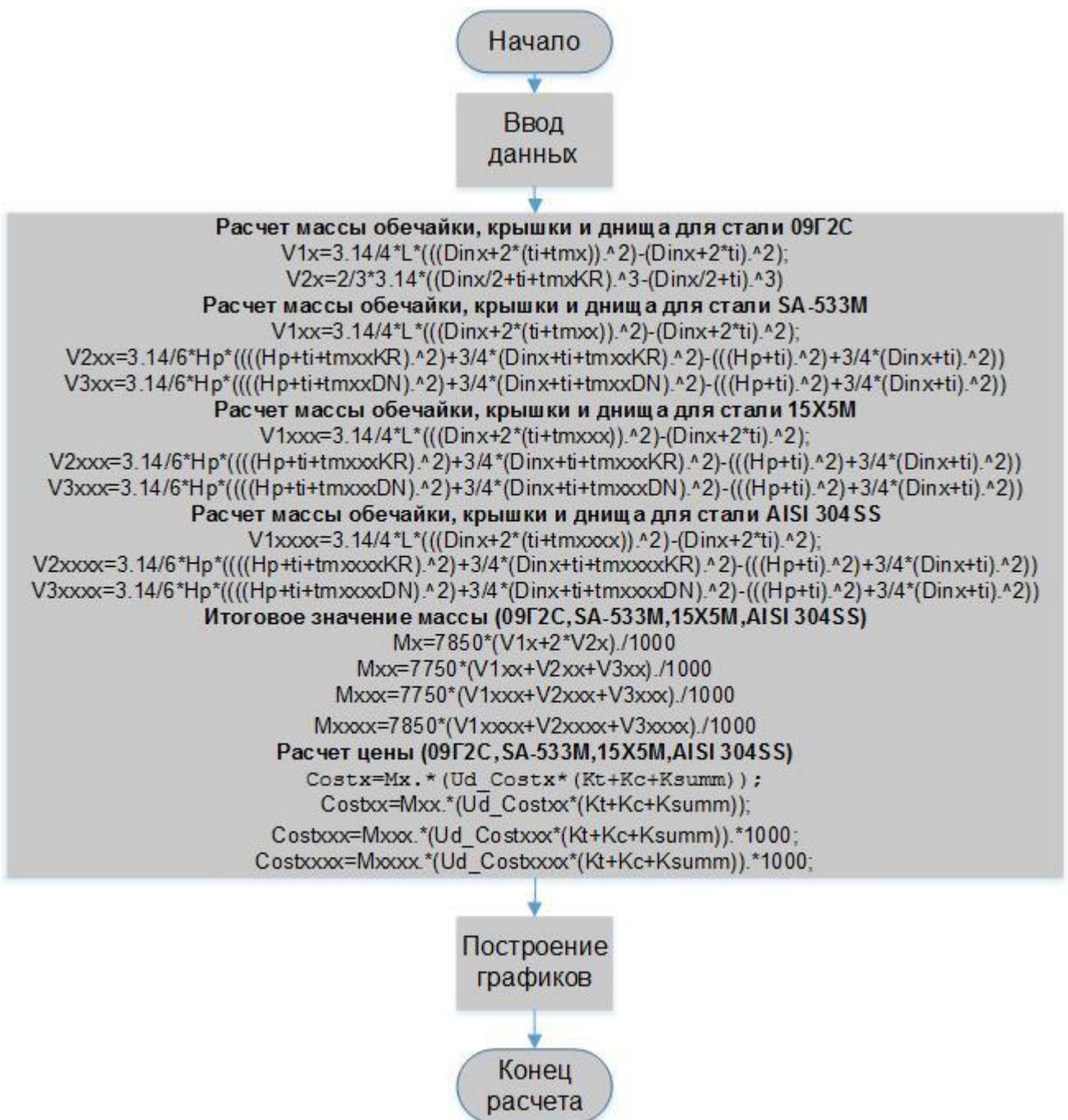


Рисунок 4.1 – алгоритм расчета цены адсорбера

В блоке исходных данных вводятся значения внутреннего диаметра ( $D_{in}$ ), инициализируется матрица толщин стенки из предыдущего расчета (для диапазона толщин изоляции 10-400 мм). Также в этот блок уже включены данные о стоимости одного килограмма стали и коэффициенты согласно таблице 4.1.

Последовательно производится расчет удельной массы обечайки, днища и крышки, затем рассчитывается полная масса адсорбера. На основе этих данных производится экономический расчет: вычисляется цена для каждого типа стали. Все данные подаются на вывод в графическом виде.

#### 4.4 Расчет адсорбера с $D_{вн}=4.4$ м и $P=9,7$ МПа

Расчет для адсорбера с  $D_{вн}=4.4$  м и  $P=9,7$  МПа проводился для 40 значений, соответствующих значениям толщины футеровки от 10 мм до 400 мм. Расчет производится согласно алгоритму, представленному на рисунке 4.1.

В данном разделе приведён пример расчета для значения  $h_{ф}=100$  мм и для стали 09Г2С.

Масса обечайки составляет:

$$\begin{aligned} m_{об} &= \rho V_{об} = \rho \cdot \pi \cdot H \left[ \left( \frac{D_{вн} + 2h_{ф} + 2h_i}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_{вн} + 2h_{ф}}{2} \right)^2 \right] = \\ &= 7850 \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot \left[ \left( \frac{4.4 + 2 \cdot 0.1 + 2 \cdot 0.1439}{2} \right)^2 - \left( \frac{4.4 + 2 \cdot 0.1}{2} \right)^2 \right] = 168.32(m) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Масса днища и крышки рассчитывается согласно (4.2):

$$\begin{aligned} m_{дн} = m_{кр} &= \rho V = \rho \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi \left[ \left( \frac{D_{вн} + 2h_{ф} + 2h_i}{2} \right)^3 - \left( \frac{D_{вн} + 2h_{ф}}{2} \right)^3 \right] = \\ &= 7850 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3.14 \left[ \left( \frac{4.4 + 2 \cdot 0.1 + 2 \cdot 0.1439}{2} \right)^3 - \left( \frac{4.4 + 2 \cdot 0.1}{2} \right)^3 \right] = 39.27(m) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Таким образом, суммарная масса составляет:

$$m = m_{об} + m_{дн} + m_{кр} = 246.87 \text{ (т)}$$

Расчет стоимости содержит коэффициенты согласно таблице 4.1

$$S = \delta \mathcal{U}_9 \cdot m \cdot (K_T + K_C + K_{\Sigma}) = 44 \cdot 178.32 \cdot 10^3 \cdot (2.5 + 2 + 9) \approx 146 \text{ (млн.руб)} \quad (4.6)$$

Остальные значения рассчитывались аналогично. Листинг расчета представлен в Приложении Л.

#### 4.5 Расчет адсорбера с $D_{вн}=3.6$ м и $P=9,7$ МПа

Расчет для адсорбера с  $D_{вн}=3.6$  м и  $P=9,7$  МПа проводился для 40 значений, соответствующих значениям толщины футеровки от 10 мм до 400 мм. Расчет производится согласно алгоритму, представленному на рисунке 4.1.

В данном разделе приведёт пример расчета для значения  $h_{ф}=100$  мм и для стали SA-533М.

Масса обечайки составляет:

$$\begin{aligned} m_{об} &= \rho V_{об} = \rho \cdot \pi \cdot H \left[ \left( \frac{D_{вн} + 2h_{ф} + 2h_i}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_{вн} + 2h_{ф}}{2} \right)^2 \right] = \\ &= 7750 \cdot 3.14 \cdot 10 \cdot \left[ \left( \frac{3.6 + 2 \cdot 0.1 + 2 \cdot 0.1187}{2} \right)^2 - \left( \frac{3.6 + 2 \cdot 0.1187}{2} \right)^2 \right] = 117.73(m) \end{aligned}$$

Масса днища и крышки рассчитывается согласно (4.2):

$$m_{\text{дн}} = m_{\text{кр}} = \rho V = \rho \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi \left[ \left( \frac{D_{\text{вн}} + 2h_{\text{ф}} + 2h_{\text{и}}}{2} \right)^3 - \left( \frac{D_{\text{вн}} + 2h_{\text{ф}}}{2} \right)^3 \right] =$$

$$= 7850 \cdot \frac{2}{3} \cdot 3.14 \left[ \left( \frac{4.4 + 2 \cdot 0.1 + 2 \cdot 0.1439_i}{2} \right)^3 - \left( \frac{4.4 + 2 \cdot 0.1}{2} \right)^3 \right] = 8.49(m)$$

Таким образом, суммарная масса составляет:

$$m = m_{\text{об}} + m_{\text{дн}} + m_{\text{кр}} = 134.84 \text{ (т)}$$

Расчет стоимости содержит коэффициенты согласно таблице 4.1

$$S = \delta C_{\text{э}} \cdot m \cdot (K_T + K_C + K_{\Sigma}) = 207.9 \cdot 134.84 \cdot 10^3 \cdot (2.5 + 2 + 9) \approx 378 \text{ (млн.руб)}$$

Остальные значения рассчитывались аналогично. Листинг расчета представлен в Приложении Л.

Обсуждение полученных графических зависимостей подробно представлено в **Разделе 5.6** «Зависимость рассчитанной стоимости адсорбера от типа стали и толщины изоляции» **Главы 5** «Результаты и их обсуждение».

#### 4.6 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 И ОБСУЖДЕНИЕ НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной Главе с помощью затратного подхода рассчитана стоимость адсорберов из сталей 09Г2С, SA-533М, 15Х5М и AISI 304SS для интервала толщин огнеупорной изоляции 10-400 мм.

Наибольшую стоимость имеет адсорбер на основе сталей AISI 304SS, а адсорберы из сталей 15Х5М и SA-533М хоть и имеют меньшую рассчитанную стоимость, но всё же значительно дороже адсорбера из стали 09Г2С. В обобщенном инфографическом виде рассчитанные стоимости для двух вариантов исполнения адсорберов представлены на Рисунке 4.2.

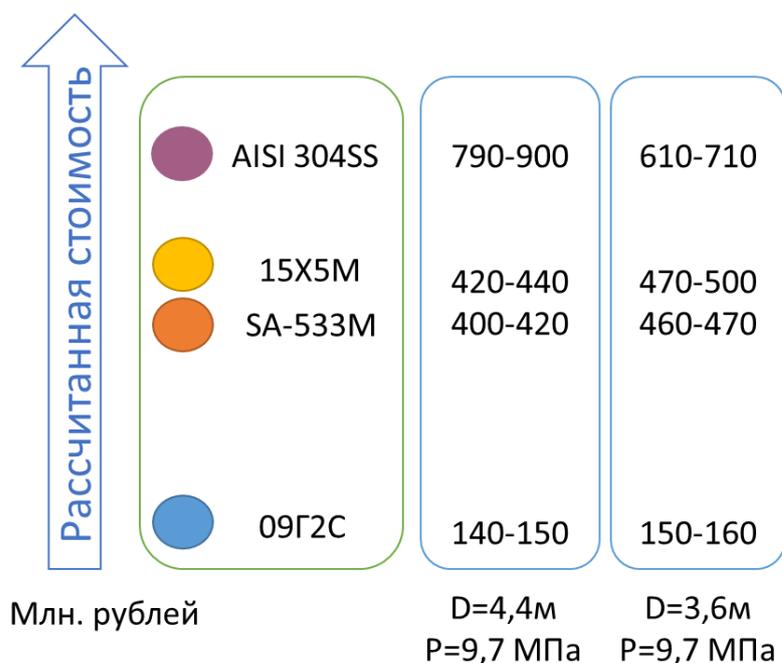


Рисунок 4.2 – Рассчитанные стоимости адсорберов для двух исполнений в интервале толщин изоляции 10-400 мм.

На данном этапе очевидно, что использование стали AISI 304SS для конструирования обечайки, днища и крышки адсорбера экономически нецелесообразно. Использование сталей 15Х5М должно быть технически обосновано, а сталь 09Г2С экономически приемлема как конструкционный материал.

Данные экономического анализа следует проанализировать в контексте зависимостей для толщины стенки, что позволит сформулировать итоговые рекомендации для оптимизации адсорберов УПГТ. Этот анализ проводится в **Главе 5 в секции 5.6.**

Таким образом, в данной главе выполнены следующие задачи:

- 1) Предоставлена теоретическая справка по используемому методу расчета стоимости адсорберов;
- 2) Сформулированы исходные данные к расчету;
- 3) Составлен алгоритм экономического расчета;
- 4) Приведены примеры расчета;
- 5) Сформированы рекомендации экономического характера для последующего их обсуждения с техническими рекомендациями в Главе 5.

В связи с этим, цель настоящей главы магистерской диссертации – подготовка экономических данных для итогового комплексного анализа – считается достигнутой.

## ГЛАВА 5 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 5.1 Зависимость изменения температуры вдоль толщины стенки обечайки

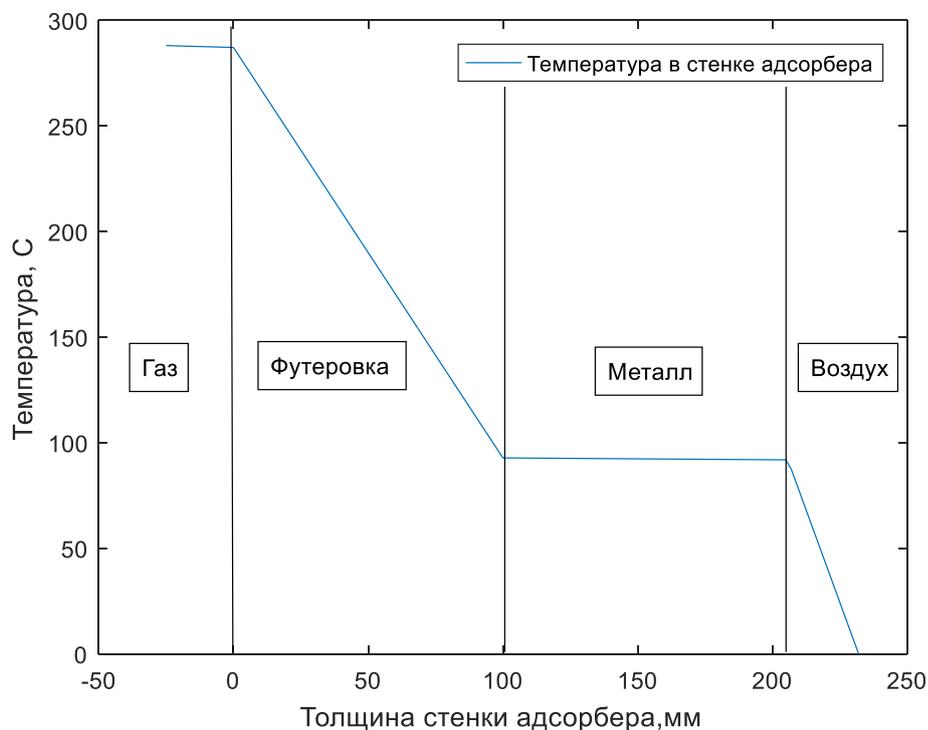


Рисунок 5.1 – Изменение температуры в стенке адсорбера при  $h_f=100$  мм.

В силу того, что отношения диаметров не превышало 2, в Рисунке 5.1 не наблюдается ярко выраженной логарифмической зависимости. Тем не менее, эта зависимость наблюдается при изменении толщины изоляции, что можно увидеть на Рисунке 5.2 в секции 5.2.

При толщине изоляции в 100 мм наблюдается значительное уменьшение температуры на стыке «футеровка-сталь» - температура падает с  $280^{\circ}\text{C}$  до  $94^{\circ}\text{C}$ . Согласно ГОСТ Р 51274-99 это позволяет использовать для прочностного расчета значение температуры, полученное в результате теплотехнических расчетов -  $94^{\circ}\text{C}$ .

### 5.2 Зависимость изменения температуры внутренней стальной стеки адсорбера от толщины внутренней изоляции

При росте толщины изоляции от 10 мм до 400 мм наблюдается логарифмическое снижение температуры стыка «футеровка-сталь». Наиболее острое снижение температуры наблюдается в интервале от 10 до 100 мм. В интервале со 100 мм до 400 мм пологий характер понижения температуры возрастает, и очевидно, что при дальнейшем увеличении толщины футеровки можно было бы наблюдать асимптотическое снижение температуры до температуры окружающей среды.

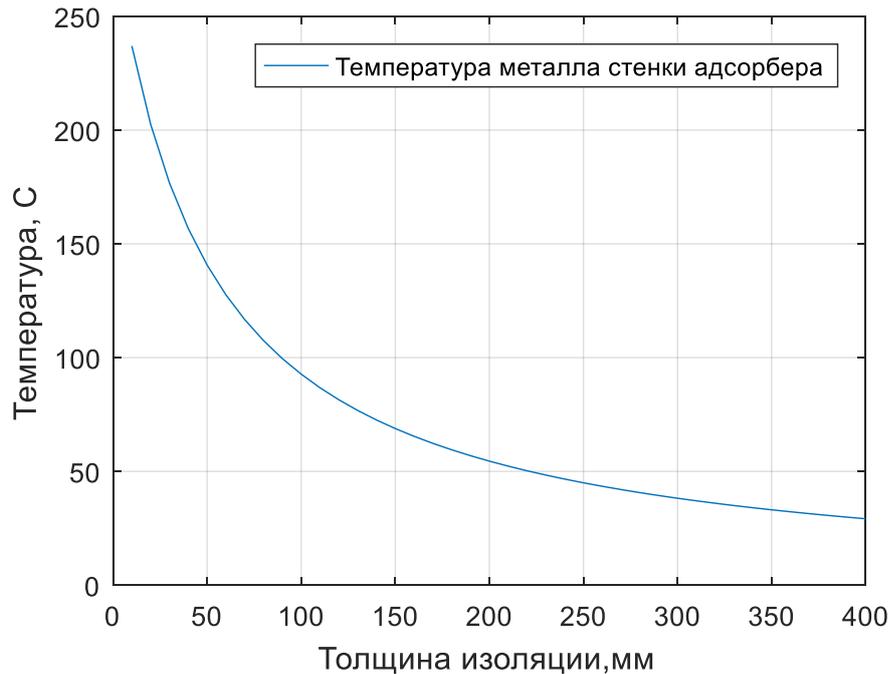


Рисунок 5.2 – снижение температуры стыка «футеровка-сталь» при увеличении толщины изоляции

Оптимальная толщина изоляции определяется требованиями к температуре внешней стенки адсорбера. Согласно рекомендациям изложенным в СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003», наружная температура стенки не должна превышать значение 75 °С. Согласно графику приведенному на рисунке 5.2 для наружной температуры стенки 75 ° оптимальная толщина изоляции составляет порядка 100÷120 мм.

### 5.3 Зависимость толщины стенки адсорбера от давления с учетом температуры и типа стали

При расчете толщины стенки в зависимости от давления и температуры были использованы интервалы давления – от 0 до 100 бар и температуры металла от 0 до 260 градусов.

Можно констатировать, что изменение толщины в зависимости от давления выражено сильнее, чем изменение толщины в зависимости от температуры стали – это можно заметить на объёмном графике, представленном на Рисунке 5.3. Однако интересно, что при увеличении давления возрастает влияние температуры – например, разброс толщин по температуре при давлении 6 МПа значительно уже, чем интервал толщин при давлении 10 МПа. Об это свидетельствует график, приведенный на Рисунке 5.3.

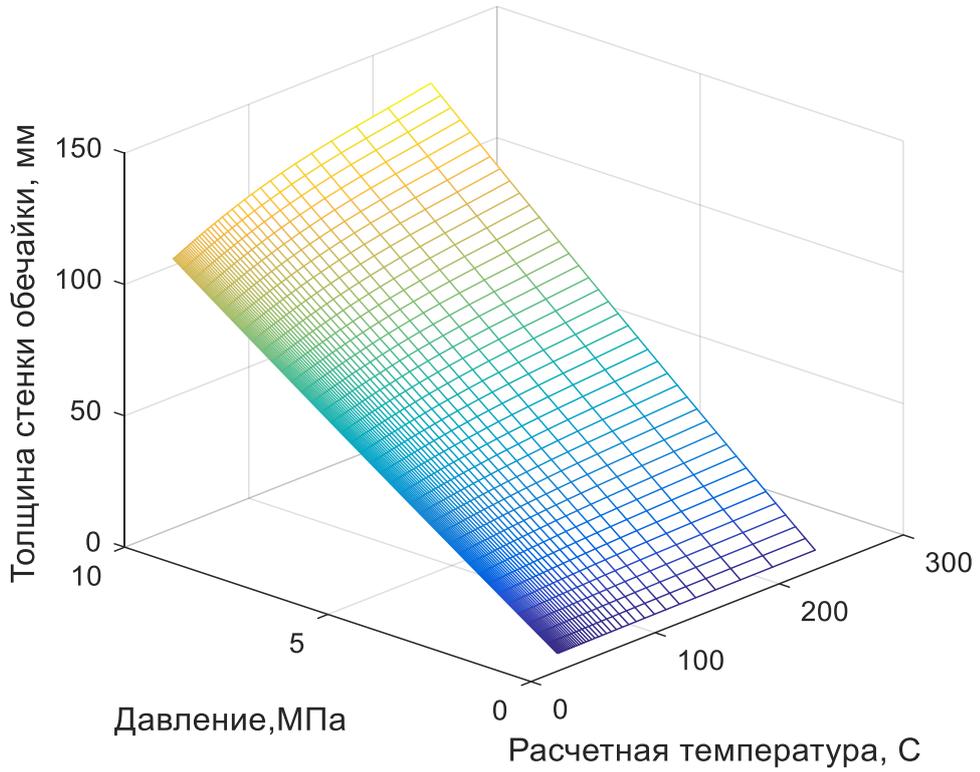


Рисунок 5.3 – Объёмный график в координатах Z-Y-X – Толщина обечайки- Давление-Температура для адсорбера с  $D_{вн}=3,6$  и стали 09Г2С

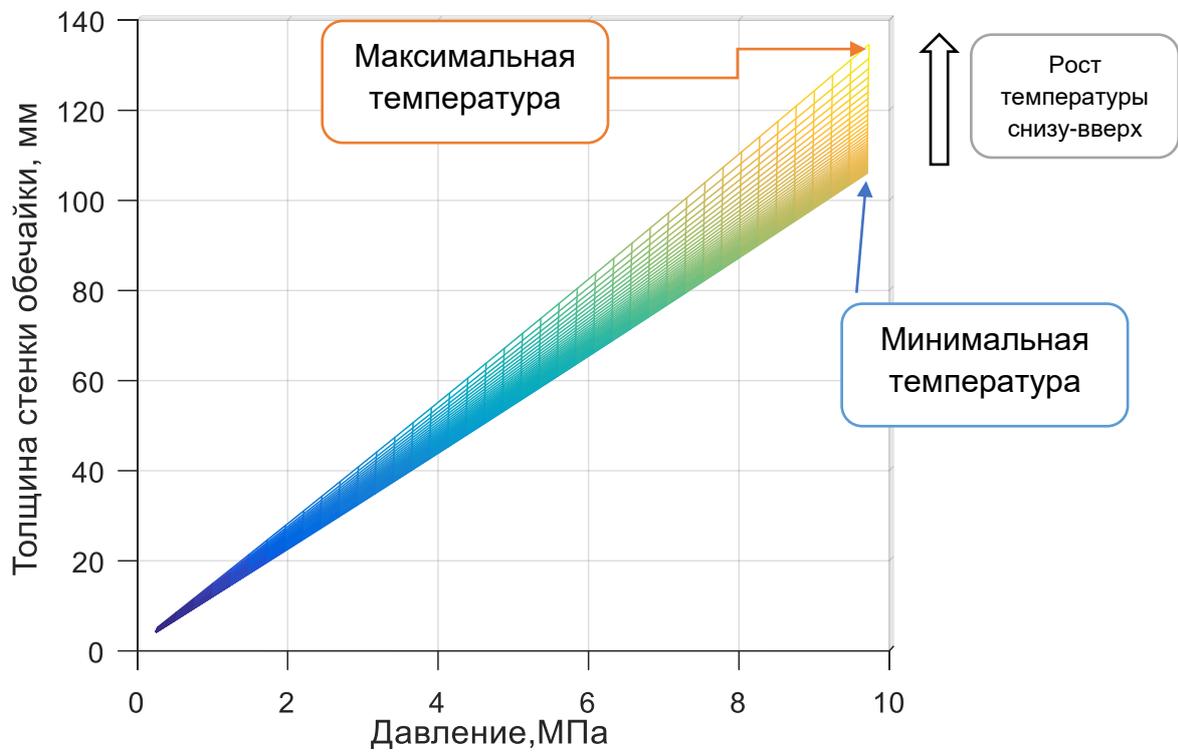


Рисунок 5.4 – Срез по OY – координате температур для адсорбера с  $D_{вн}=3,6$  и стали 09Г2С.

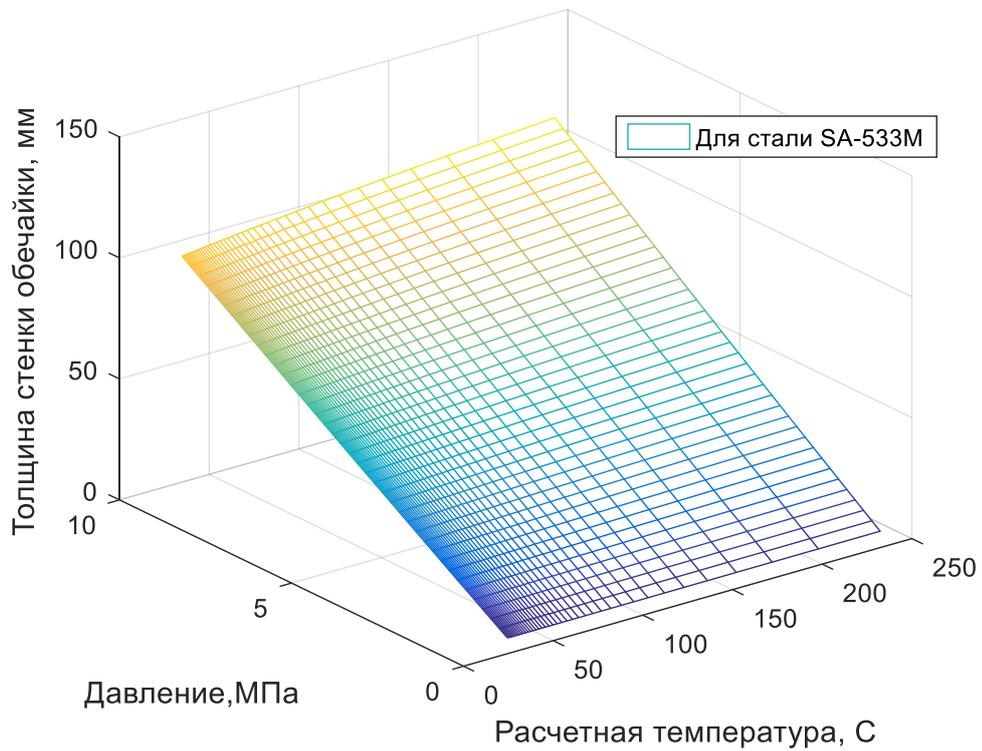


Рисунок 5.5 – Объемный график в координатах Z-Y-X – Толщина обечайки- Давление-Температура для адсорбера с  $D_{вн}=3,6$  и стали SA-533M

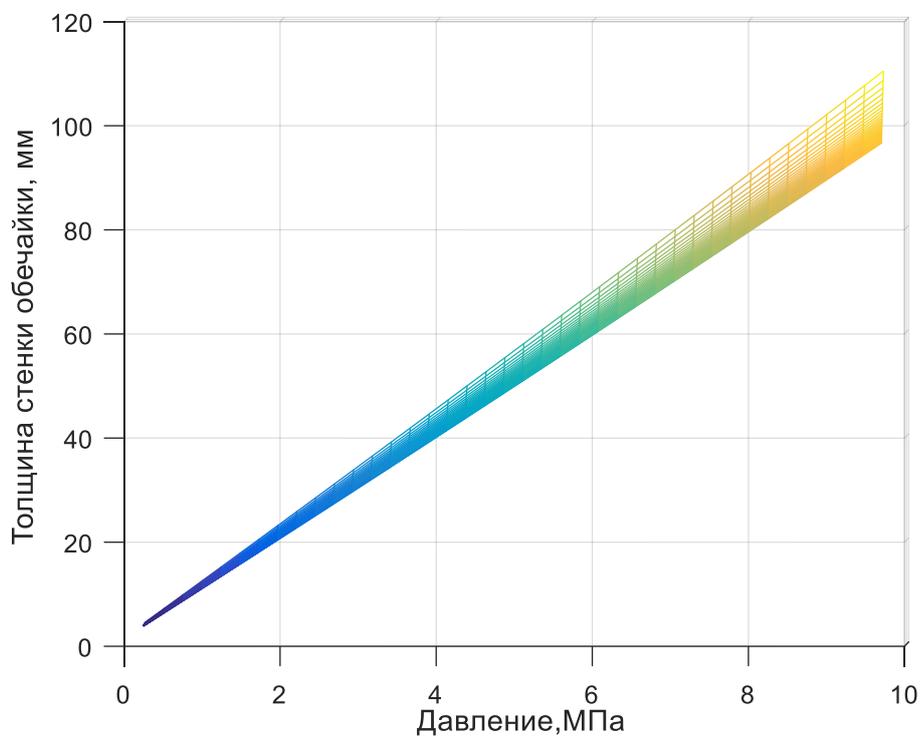


Рисунок 5.6 – Срез по OY – координате температур для адсорбера с  $D_{вн}=3,6$  и стали SA-533M.

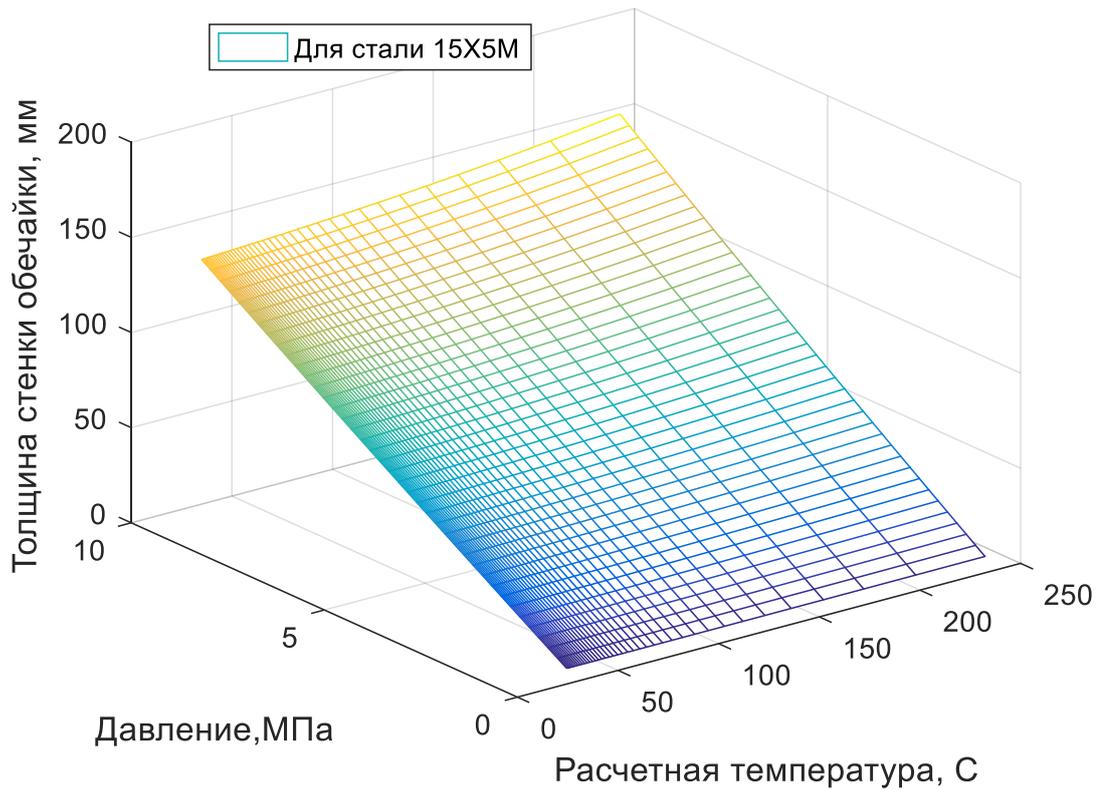


Рисунок 5.5 – Объёмный график в координатах Z-Y-X – Толщина обечайки- Давление-Температура для адсорбера с  $D_{вн}=3,6$  и стали 15X5M

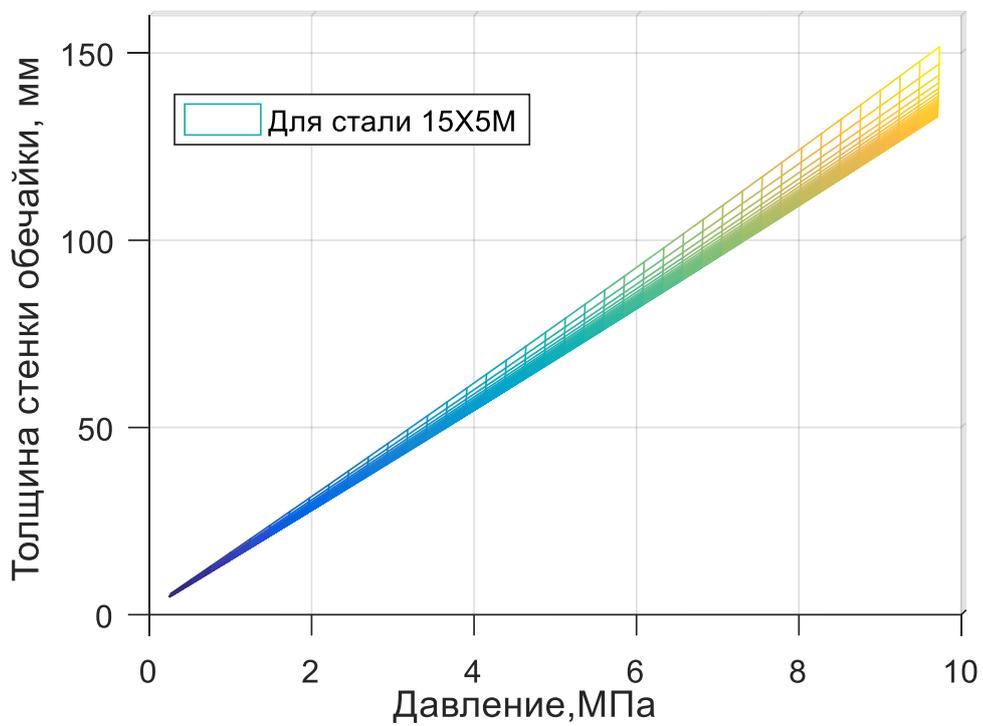


Рисунок 5.6 – Срез по OY – координате температур для адсорбера с  $D_{вн}=3,6$  и стали и стали 15X5M

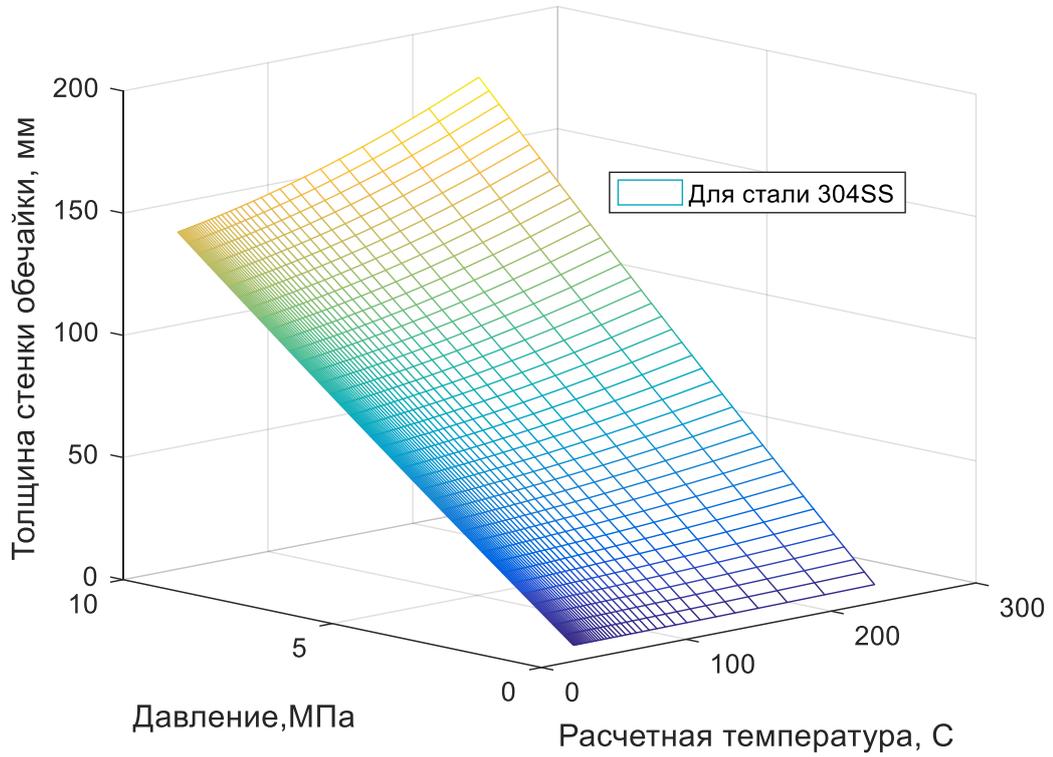


Рисунок 5.5 – Объёмный график в координатах Z-Y-X – Толщина обечайки- Давление-Температура для адсорбера с  $D_{вн}=3,6$  и стали AISI 304SS

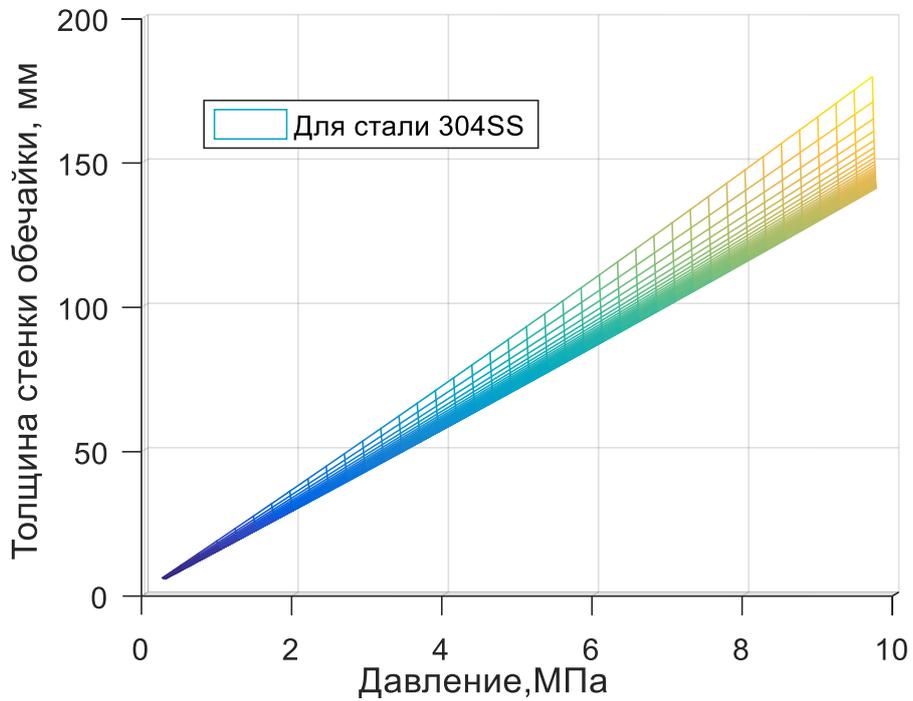


Рисунок 5.6 – Срез по OY – координате температур для адсорбера с  $D_{вн}=3,6$  и стали AISI 304SS.

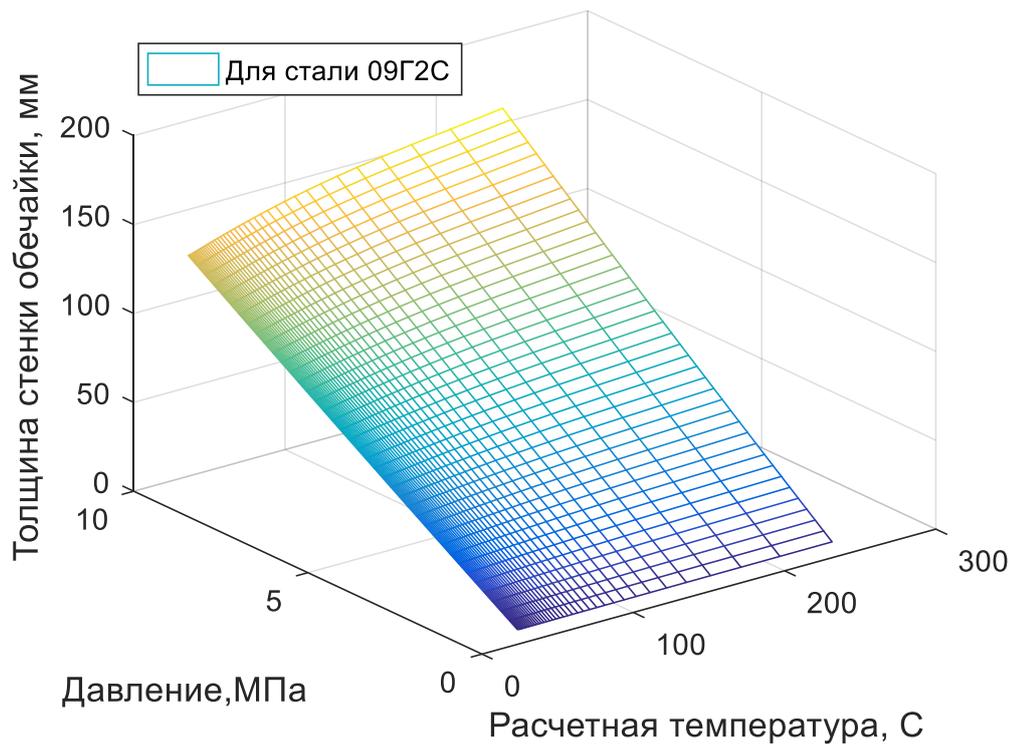


Рисунок 5.7 – Объёмный график в координатах Z-Y-X – Толщина обечайки- Давление-Температура для адсорбера с  $D_{вн}=4,4$  и стали 09Г2С

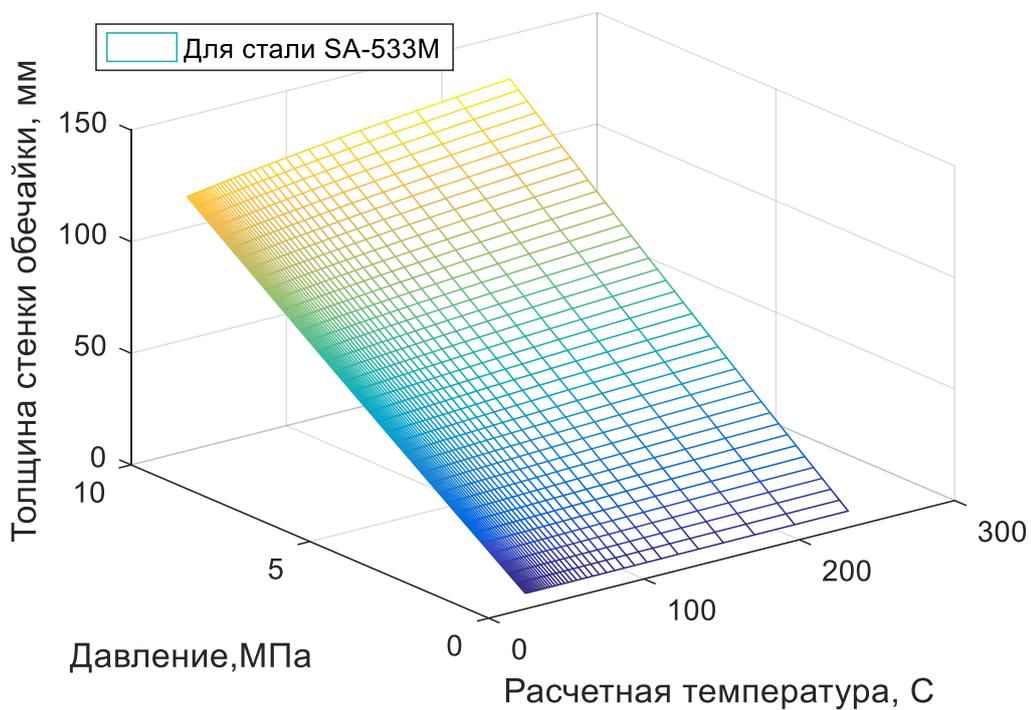


Рисунок 5.8 – Объёмный график в координатах Z-Y-X – Толщина обечайки- Давление-Температура для адсорбера с  $D_{вн}=4,4$  и стали SA-533M

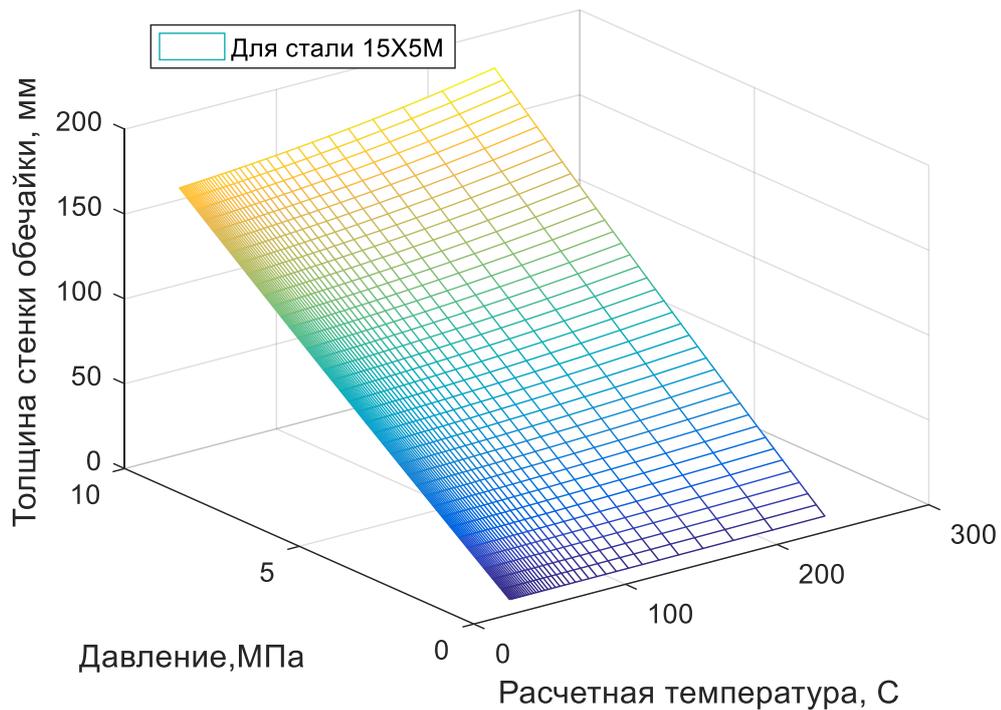


Рисунок 5.8 – Объёмный график в координатах Z-Y-X – Толщина обечайки- Давление-Температура для адсорбера с  $D_{вн}=4,4$  и стали 15X5M

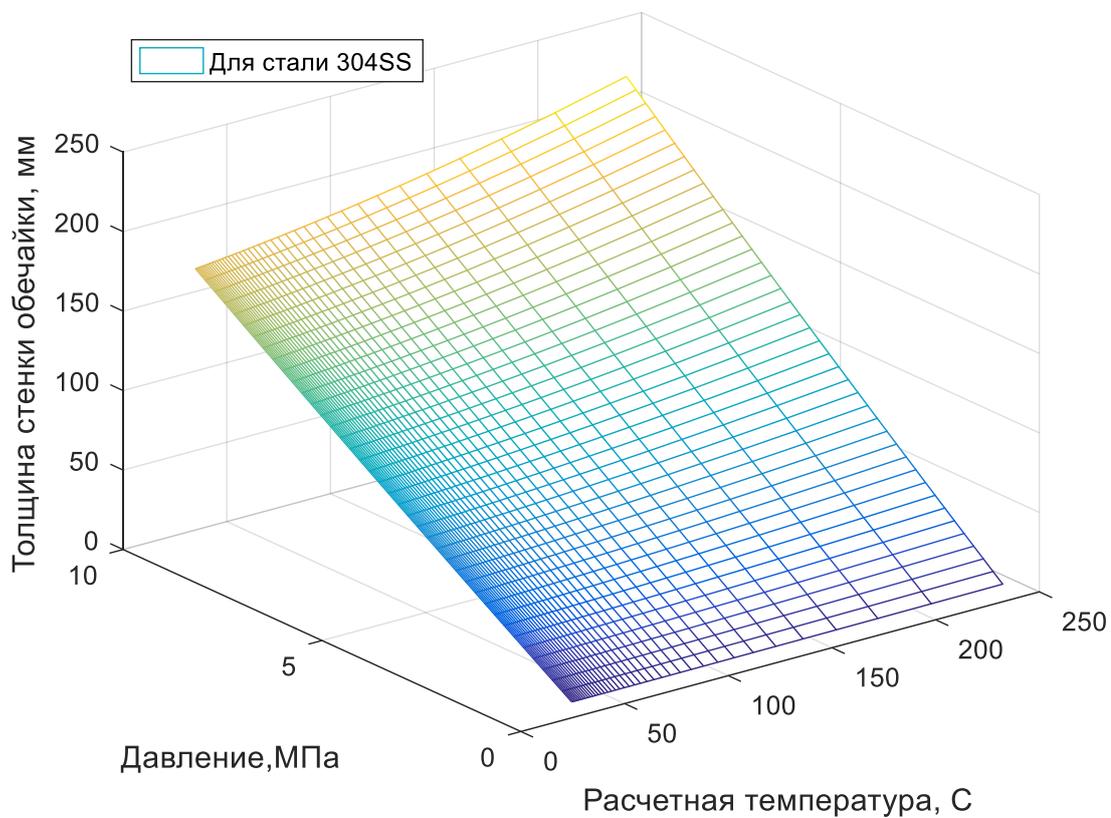


Рисунок 5.8 – Объёмный график в координатах Z-Y-X – Толщина обечайки- Давление-Температура для адсорбера с  $D_{вн}=4,4$  и стали AISI 304SS

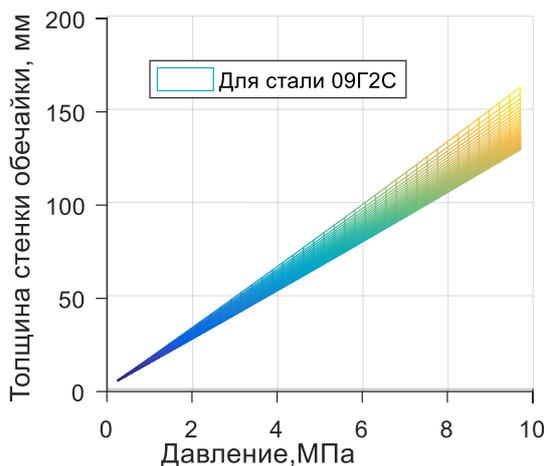


Рисунок 5.10 – Срез по ОУ – координате температур для адсорбера с  $D_{вн}=4,4$  и стали 09Г2С.

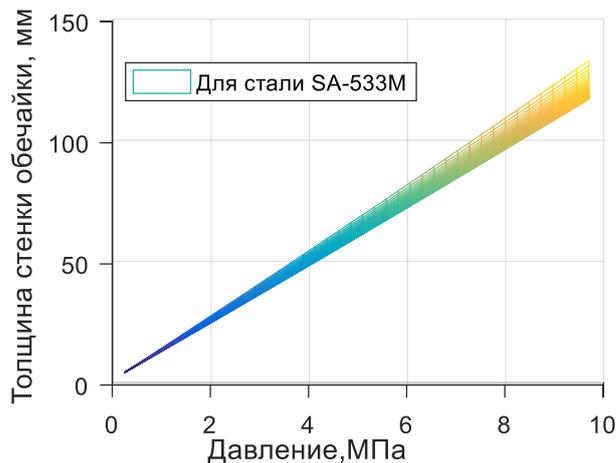


Рисунок 5.9 – Срез по ОУ – координате температур для адсорбера с  $D_{вн}=4,4$  и стали SA-533М.

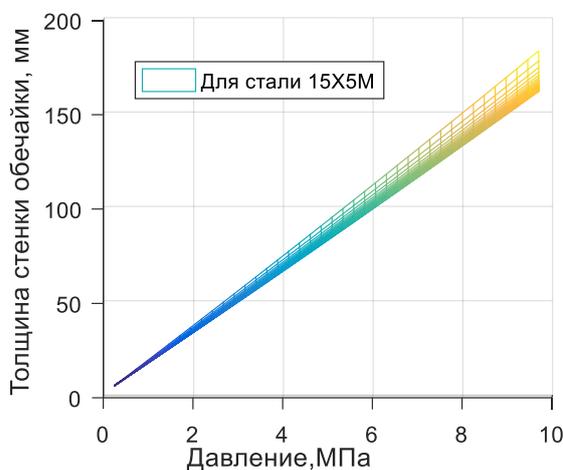


Рисунок 5.9 – Срез по ОУ – координате температур для адсорбера с  $D_{вн}=4,4$  и стали 15Х5М.

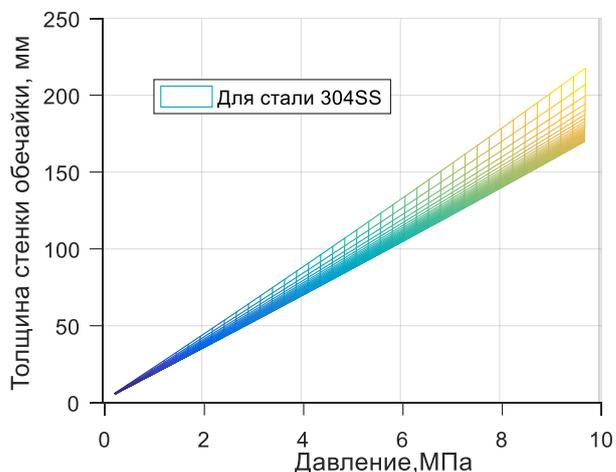


Рисунок 5.9 – Срез по ОУ – координате температур для адсорбера с  $D_{вн}=4,4$  и стали AISI-304SS.

Адсорберы из термоустойчивых сталей SA-533М и 15Х5М меньше подвержены влиянию высоких температур на толщину стенки, однако прочностные характеристики стали 15Х5М меньше чем у SA-533М.

Можно предположить, что при снижении рабочего давления на 3 МПа толщина стенки упадет существенно – на 40 мм. Однако существуют проектные ограничения, которые обязывают принять за расчетное давление 9,8 МПа – а именно, давление на линии всаса компрессорной станции, что не позволяет таким образом оптимизировать конструкцию адсорбера.

В силу вышесказанного, следует сосредоточиться на температурном расчете и изменении толщины изоляции. Анализ результатов этого блока расчетов приведён в разделе 5.4.

## 5.4 Зависимость толщины металлической стенки от типа стали и толщины изоляции

Результатом расчета стали графические зависимости для двух вариантов исполнения адсорбера – А) с  $D_{вн}= 4.4$  м и  $P=9.7$  Мпа и В) с  $D_{вн}= 3.6$  м и  $P=9.7$  Мпа

А) Для  $D_{вн}= 4.4$  м (с учетом толщины изоляции)

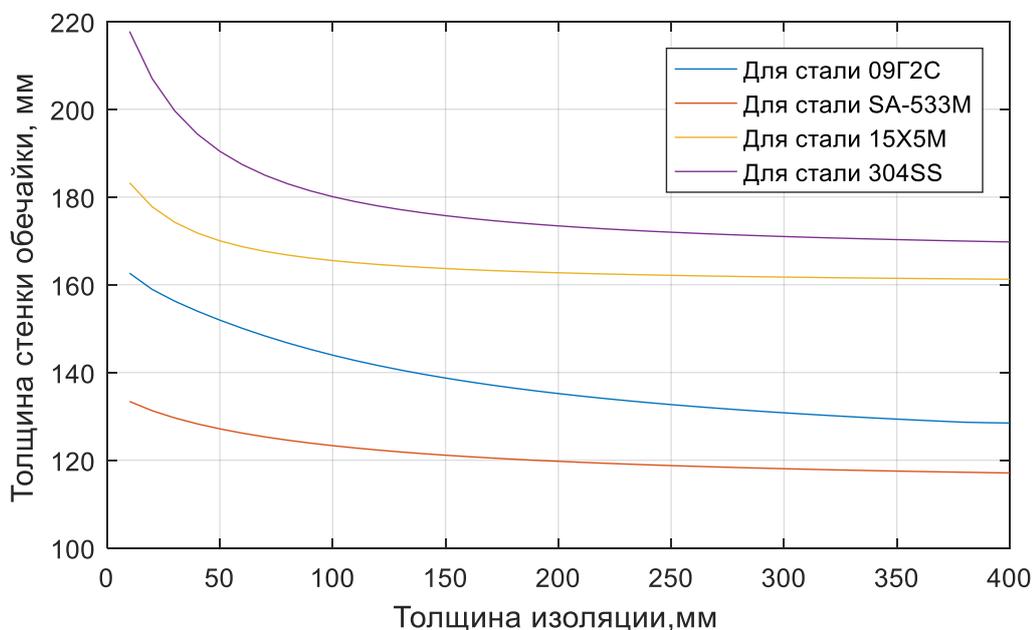


Рисунок 5.11 – Зависимость толщины стенки обечайки адсорбера от толщины изоляции и типа стали для  $D_{вн}= 4.4$  м и  $P=9.7$  Мпа

В) Для  $D_{вн}= 3.6$  м (с учетом толщины изоляции)

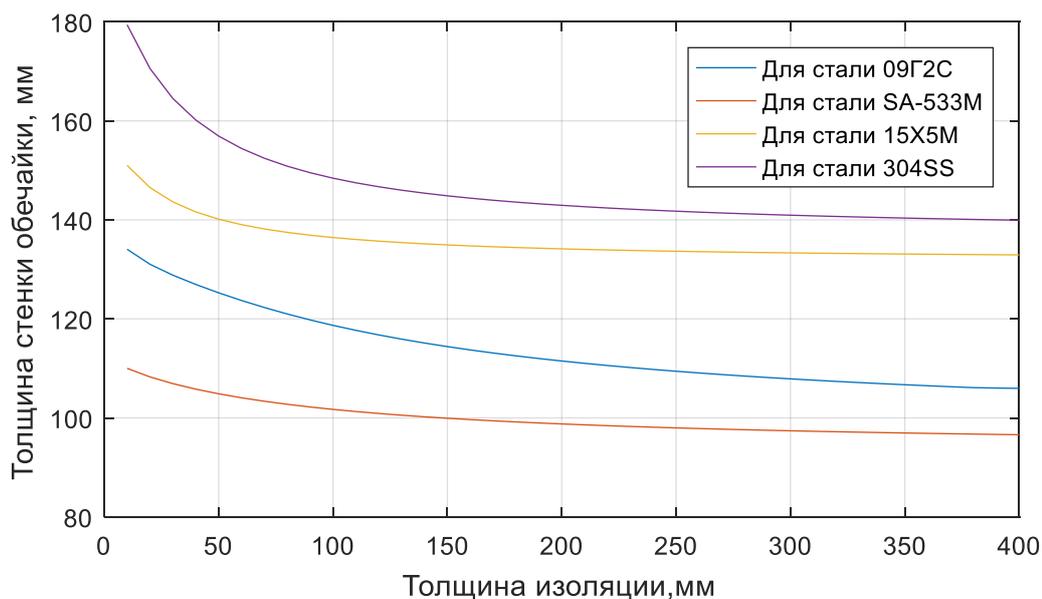


Рисунок 5.12 – Зависимость толщины стенки обечайки адсорбера от толщины изоляции и типа стали для  $D_{вн}= 3.6$  м и  $P=9.7$  Мпа

Хорошо заметна качественная разница, вызываемая изменением типа материала. В случае 09Г2С, наблюдается большая чувствительность к изменению температуры чем у остальных сталей. Для сталей SA-533М и 15Х5М зависимость от температуры также имеет место, однако выражена не столь интенсивно.

Кроме того, с ростом толщины изоляции в обоих случаях наблюдается снижения интервала между толщинами адсорберов из разных сталей. Очевидно, что это происходит 1) из-за снижения температуры стыка «футеровка-сталь»; 2) из-за разной температурной “чувствительности” сталей.

Для сталей SA-533М и 15Х5М в интервале толщины футеровки от 100 до 400 мм наблюдается достаточно пологое снижение толщины стенки обечайки. В случае выбора стали SA-533М следует ограничиться оптимальной толщиной футеровки в 100-120 мм, что также соответствует выводам по разделу 5.2.

Для сталей 09Г2С и AISI 304SS достаточно крутое падение толщины наблюдается в интервале толщины футеровки от 10 до 180 мм. Далее падение становится более пологим. Следовательно, одним из возможных способов снижения металлоёмкости будет утолщение футеровки – в интервале от 120 до 140 мм для стали 09Г2С. Использование стали AISI 304SS следует принять нецелесообразным.

## 5.5 Зависимости массы адсорбера от типа стали и толщины изоляции

Результатом расчета стали графические зависимости для двух вариантов исполнения адсорбера – А) с  $D_{вн}= 4.4$  м и  $P=9.7$  МПа и В) с  $D_{вн}= 3.6$  м и  $P=9.7$  МПа

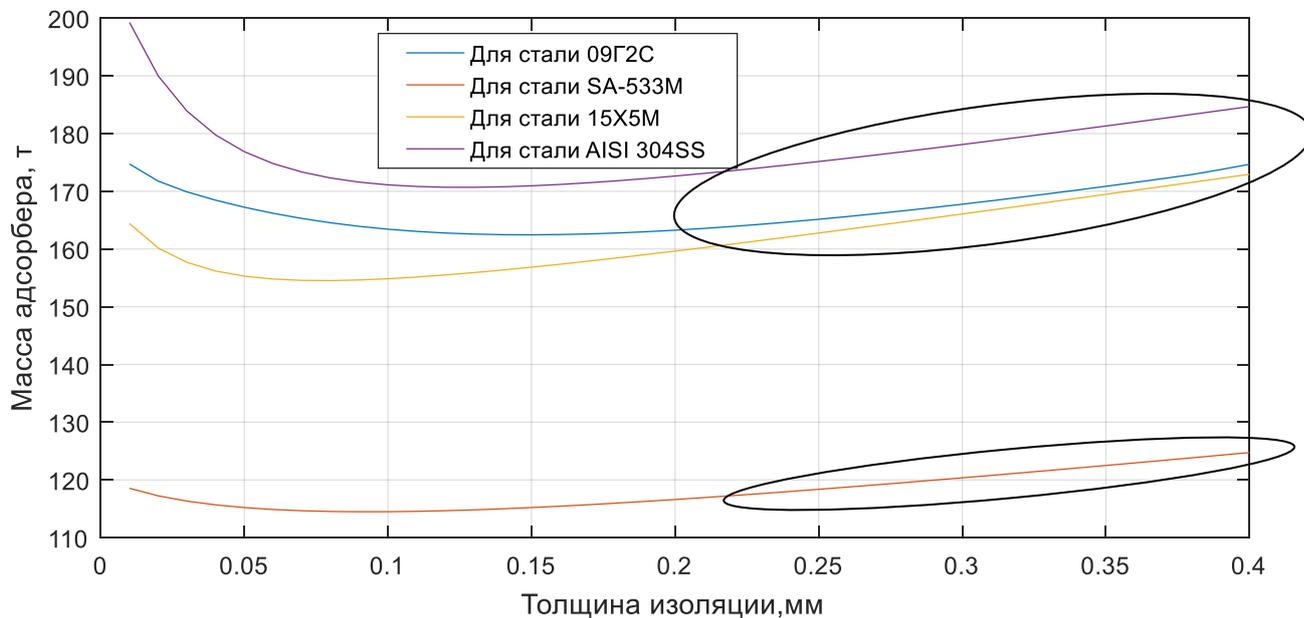


Рисунок 5.13 – Зависимость массы адсорбера ( $P=97$  бар и  $D_{вн}=4,4$  м) от толщины изоляции

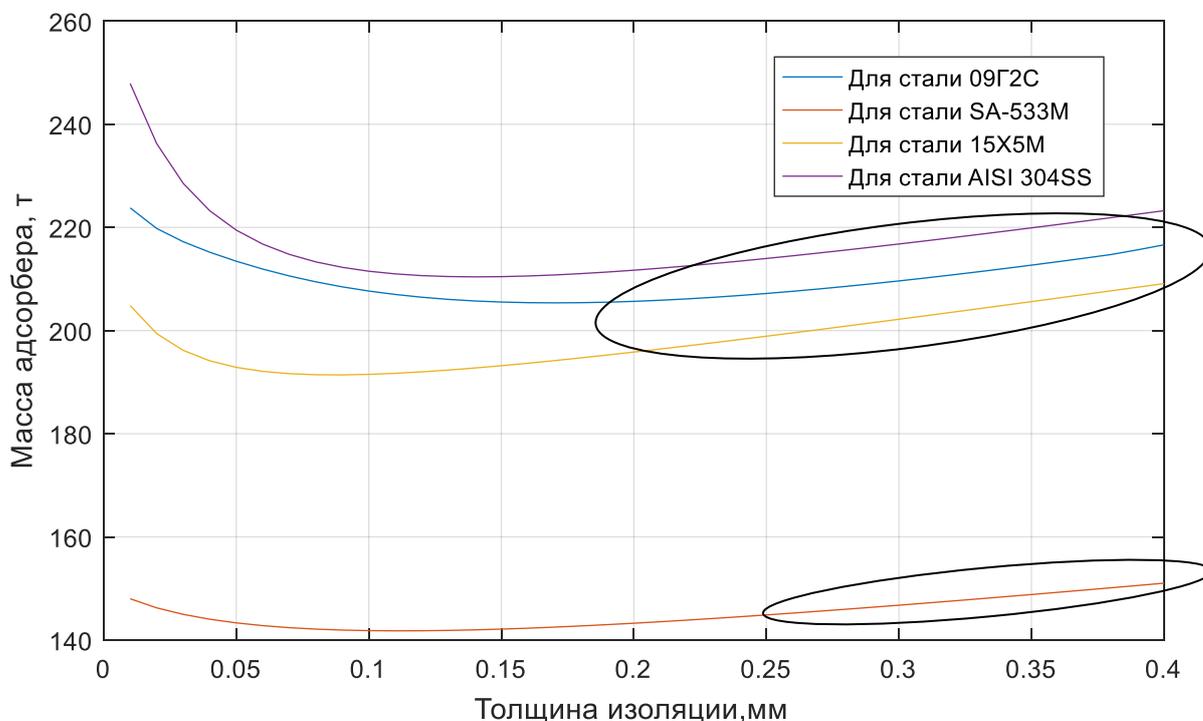


Рисунок 5.14 – Зависимость массы адсорбера ( $P=97$  бар и  $D_{вн}=3,6$  м) от толщины изоляции

Масса адсорбера рассчитывалась как сумма масс обечайки, днища и крышки. Полученные значения использовались для построения графической зависимости массы адсорбера от толщины изоляции.

Заметно значительное снижение массы адсорбера на интервале толщины изоляции с 10 до 150 мм. Однако при дальнейшем росте изоляции масса адсорбера растет, что может быть результатом ошибки в аппроксимационных формулах для допустимого напряжения. Так как при росте изоляции температура стали падает, то при толщине изоляции от 150 мм и выше температура выходит за рамки той, для которой рассчитывались аппроксимационные зависимости допустимого напряжения от температуры. Этот факт требует уточнения экспериментальных данных по пределу прочности и временному сопротивлению в интервале температур от -20 до 60°C.

## 5.6 Зависимость рассчитанной стоимости адсорбера от типа стали и толщины изоляции

Результатом расчета стали графические зависимости для двух вариантов исполнения адсорбера – А) с  $D_{вн}= 4.4$  м и  $P=9.7$  Мпа и В) с  $D_{вн}= 3.6$  м и  $P=9.7$  Мпа

А) Для  $D_{вн}= 4.4$  м (с учетом толщины изоляции)

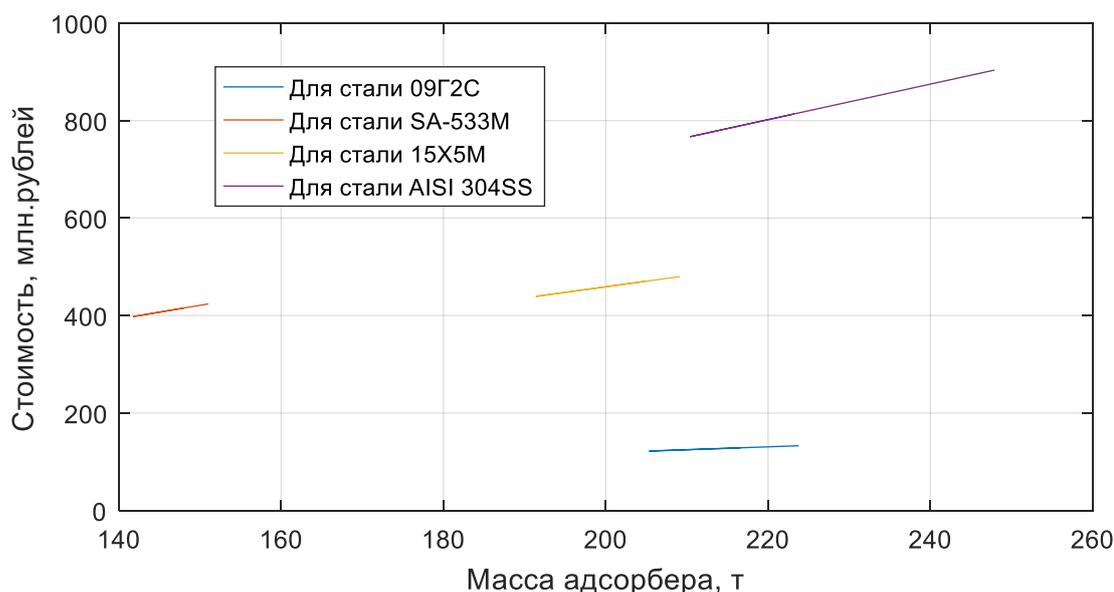


Рисунок 5.15 – Графическая зависимость стоимости адсорбера от его массы

Для всех типов стали заметна линейная зависимость стоимости от массы, что соответствует теоретической базе. Стоит заметить, что адсорбер на основе сталей 09Г2С или 15Х5М тяжелее (на 60-70 т.), чем адсорбер на основе SA-544М, который, очевидно, является самым немассивным из четырёх вариантов. В ценовом диапазоне хорошо заметно разделение на три категории – адсорбер из стали 09Г2С в диапазоне 160-170 млн.руб, адсорберы из сталей SA-533М и 15Х5М в диапазоне 400-460 млн.руб., и адсорбер из стали AISI 304 SS – от 790 до 900 млн.руб.

В) Для  $D_{вн} = 3.6$  м (с учетом толщины изоляции)

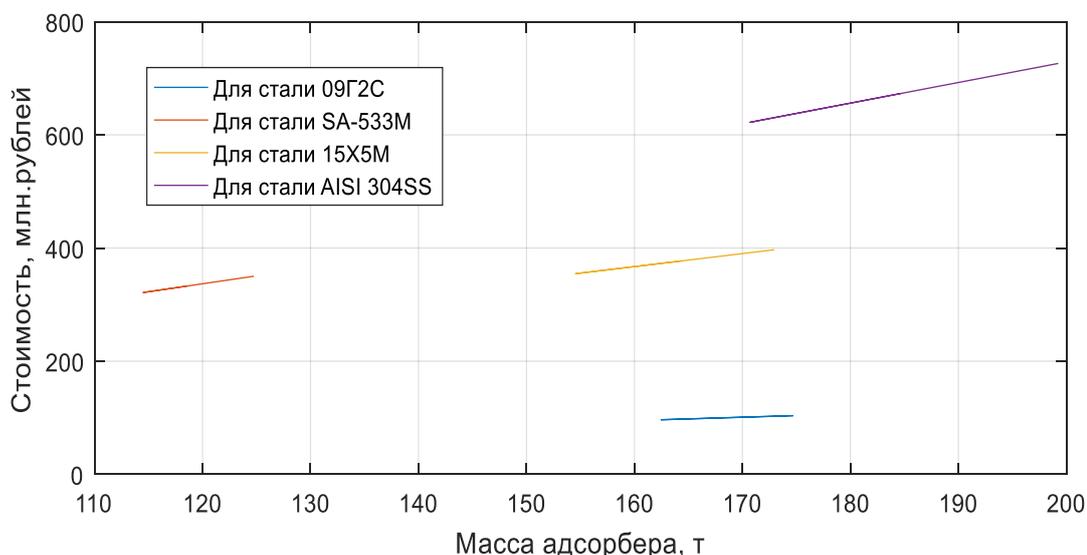


Рисунок 5.16 – Графическая зависимость стоимости адсорбера от его массы

Аналогичная ситуация наблюдается и для другого исполнения адсорбера – с  $D_{вн} = 3.6$  м (см. Рисунок 5.16) – адсорбер из стали 09Г2С находится в диапазоне 150-160 млн.руб, адсорберы из сталей SA-533М и 15Х5М в диапазоне 470-400 млн.руб., и адсорбер из стали AISI 304 SS – от 610 до 710 млн.руб.

При выборе пути оптимизации конструкции адсорбера существуют как минимум два ключевых аспекта – стоимость и масса. Если стоимость адсорбера – ключевой фактор в проекте, необходимо за конструкционный материал выбрать сталь 09Г2С с оптимальной толщиной изоляции 120-140 мм. При сравнительно низкой цене конструкционного материала такая толщина изоляции позволит снизить металлоёмкость и тепловые потери в режиме регенерации и обеспечит безопасность производственного процесса.

В случае, если масса адсорбера играет важную роль при выборе конструкционного материала (например, при плохой транспортной инфраструктуре в районе проектирования УПГТ), то следует выбрать сталь SA-533М. Этот выбор позволит значительно снизить итоговую массу, а изоляция в диапазоне толщин 100-120 мм обеспечит температуру внешней стенки ниже  $75^{\circ}\text{C}$  в соответствии с СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003»

Адсорбер на основе стали 15Х5М необходимо выбирать в случае наличия в газе большого количества  $\text{CO}_2$ . Адсорбер на основе стали AISI 304SS нецелесообразен для проектирования.

## **ГЛАВА 6 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

Объектом исследования в выпускной работе являются адсорберы установки подготовки газа к транспорту. В разделе социальная ответственность рассмотрим установку подготовки газа к транспорту (УПГТ) как самостоятельную единицу.

Известно, что установка подготовки газа к транспорту – опасный производственный объект, процесс эксплуатации которой сопряжен с рядом опасностей как для человека (работники или местное население), так и для окружающей среды в целом. Пренебрежение должностными инструкциями и несоблюдение правил производственной и экологической безопасности при проектировании и эксплуатации УПГТ может привести к непоправимым последствиям и чрезвычайным ситуациям.

Среди опасных и вредных производственных факторов необходимо выделить следующие факторы, достаточно часто встречающиеся при эксплуатации УПГТ: давление газа в действующих коммуникациях; возможность разрушения трубопроводов и газопроводов, сосудов под давлением, которое может произойти совместно с разлетом поражающих осколков металла и/или иных конструкционных материалов; возможность самопроизвольного возгорания продукта при разрушении инженерных конструкций, вероятность воспламенения паров горючих жидкостей и оборудования; возможность появления в рабочей зоне открытого огня и его термическое воздействие на организмы и окружающую среду; возможность взрыва скопившихся паров горючих веществ; повышенные шумовые и вибрационные уровни; вероятность попадания масла и жидких углеводородов в почву и воды, а также возможность выброса паров углеводородных жидкостей и газа в воздух рабочей зоны и атмосферу в целом.

Наиболее опасными техническими устройствами на УПГТ является комплекс механизмов, среди которых стоит отметить оборудование узла регенерации, адсорберы и фильтры линии осушки газа, установки сбора конденсата и его стабилизации, факельное устройство сброса нестабильного конденсата и его паров. Кроме того, стоит отметить оборудование, относящееся к телемеханике и автоматизации производства – шлейфы, провода, камеры и прочее. Эксплуатация такого электрооборудования также несет в себе ряд опасностей, связанных как со статическим зарядом, так и с переменным/постоянным электрическим током.

**Таблица 6.1 – Работы, формирующие опасные и вредные факторы**

Наименование видов работ	Факторы (ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ [26] с измен. 1999г.)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
<b>Работы в помещении</b>			
Работы по монтажу оборудования УПГТ Ремонтные работы Слесарные работы Работы по эксплуатации УПГТ	1.Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны. 2.Недостаток естественного света; 3.Превышенный уровень шума на рабочем месте; 4.Повышенная загазованность воздуха рабочей зоны;	1.Движущиеся машины и механизмы производственного оборудования (в т.ч. грузоподъемные); 2.Электрический ток; 3.Электрическая дуга и искры при сварке; 4. Взрывоопасность и пожароопасность; 5. Повышенный уровень статического электричества; 6.Вредные химические вещества в воздухе рабочей зоны.	ГОСТ 12.0.003-74; ГОСТ 12.1.005-88; ГОСТ 12.1.007; СНиП 23-05-95; ГОСТ 12.1.003–83; СН 2.2.4/2.1.8.562-96; ГОСТ 12.1.004-91; ГОСТ 12.1.011-78*; РД 34.21.122-87.

В связи с упомянутыми обстоятельствами, целью выполнения данного раздела выпускной работы является идентификация вредного и опасного воздействия перечисленных производственных факторов в рабочей зоне, описание методов предотвращения их влияния на персонал, окружающую среду и третьи лица, либо способов уменьшения их последствий.

## 6.1 Производственная безопасность

### 6.1.1 Анализ вредных факторов при эксплуатации УПГТ

#### 6.1.1.1 Вредные вещества

Среди веществ, с которыми приходится иметь дело на территории установки подготовки газа к транспорту (далее – УПГТ), есть и вредные, оказывающие неблагоприятное воздействие на человеческий организм. Большой процентный состав среди таких веществ имеют, в первую очередь, различные компоненты природного газа. Их предельно допустимые концентрации и классы опасности, согласно ГН 2.2.5.1313 – 03 [27], приведены в таблице 6.2

К выделению вредных веществ в воздухе рабочей зоны могут привести операции, совершаемые с:

1. Предохранительными устройствами сосудов под давлением;
2. Сосудами с недостаточной герметичностью вследствие коррозии, нарушения сплошности изоляционного материала, грубых ошибок персонала и т.д.
3. Газопроводной сетью и сосудами под давлением при запланированном сбросе давления для проведения ремонтных работ.

**Таблица 6.2** – Предельно допустимые концентрации вредных веществ, появление которых возможно в рабочей зоне УПГТ согласно ГН 2.2.5.1313 – 03

Вещество	ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности
Углекислый газ	9000	IV
Углеводороды C <sub>1</sub> – C <sub>10</sub>	300	IV
Сероводород	10	IV
Сероводород в смеси с УВ	3	III
Меркаптаны	1	II
Синильная кислота	0,3	I

Все вышеперечисленные вещества могут представлять значительную опасность при превышении ПДК как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Отличительные особенности отравления: тошнота, головокружение, потеря сознания, дезориентация в пространстве и времени, слепота и глухота, повышение артериального давления и прочее.

### 6.1.1.2 Повышенный уровень производственного шума

Рабочий процесс на УПГТ происходит в условиях повышенного уровня шума. Из-за прохождения газа через оборудование при его осушке или очистке возникает шумовой фон, который в отдельных случаях может достигать значений выше допустимых. Такой уровень шума может и как правило оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека и, как следствие, на результат его работы. К последствиям нахождения в помещении с повышенным (вплоть до недопустимого) уровнем производственного шума относят: снижение остроты слуха, вплоть до потери способности распознавать звуки, возрастание кровяного давления, а в отдельных случаях шум может привести даже к ухудшению зрения и нарушению координаций движений. Уровень шума регламентирует ГОСТ 12.1.003 - 2014 [28], согласно которому нормированный уровень шума для рабочего персонала, выполняющего физический труд на территории и в помещениях УПГТ определяется по таблице 6.3.

**Таблица 6.3** – ПДУ производственного звука и давления согласно ГОСТ 12.1.003-2014

Вид трудовой деятельности, рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами в Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
<b>Предприятия, учреждения и организации</b>										
Выполнение всех видов работ (за исключением перечисленных в пп. 1-4 и аналогичных им) на постоянных рабочих местах в производственных помещениях и на территории предприятий	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

### 6.1.1.3 Микроклиматические условия в рабочем помещении

Такие условия, как тепловое излучение от нагреваемых поверхностей, относительная влажность воздуха рабочей зоны, барометрическое давление,

интенсивность циркуляции воздуха, его температура и скорость движения составляют микроклимат производственной зоны. Эти показатели влияют как на производственный процесс, так и на здоровье и самочувствие человека, тем самым оказывая косвенное, и иногда и прямое, воздействие на его работоспособность. Для создания благоприятных рабочих условий необходимо добиться оптимального сочетания вышеперечисленных факторов.

Для поддержания микроклимата в помещениях на УПГТ (согласно СанПиН 2.2.4.548 – 96 [29]), рабочее место должно соответствовать ряду требований: температура в помещениях должна варьироваться в интервале от +21 до +23°C в холодное время года и от +22 до +24 – в теплое; относительная влажность воздуха должна соответствовать интервалу от 40 до 60%; скорость движения воздуха не должна превышать 0,2 м/с. Подробнее с этими требованиями можно ознакомиться в Таблице 6.4, составленной на основе требований СанПиН 2.2.4.548 – 96 [29].

**Таблица 6.4** – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений согласно СанПиН 2.2.4.548 – 96

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С					Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		Оптимальная	Допустимая					Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая
			Верхняя граница		Нижняя граница						
			Постоянное РМ	Непостоянное РМ	Постоянное РМ	Непостоянное РМ					
Холодный	IIб (233 - 290)	17-19	21	23	15	12	14-23	40-60	75	0,2	≤0,4
Теплый	IIб (233 - 290)	20-22	27	29	16	15	15-28	40-60	70	0,3	0,2-0,5

#### **6.1.1.4 Недостаточный уровень освещенности**

Чрезмерное или недостаточное освещение снижает производительность труда вследствие ухудшения условий работы, ухудшает самочувствие и ведёт к физическим недомоганиям [30,31].

Вредным производственным фактором также является *пульсации*

*светового потока* искусственного освещения. Допустимые величины пульсаций колеблются в интервале 5 – 15 % в зависимости от напряженности зрительной работы на рабочем месте. У ламп накаливания нет пульсации при питании постоянным током и достаточно малые значения коэффициента при питании переменным, но пульсации наблюдаются у люминесцентных ламп и могут вести к таким вредным воздействиям на организм человека, как расстройство биологических ритмов, бессонница, депрессия, различным патологиям сердечно-сосудистой системы. Немаловажным является и стробоскопический эффект – кажущаяся “стационарность” движущихся предметов (валов машин, например), что может вести к фатальным последствиям.

## **6.1.2 Анализ опасных производственных факторов при эксплуатации УПГТ**

### **6.1.2.1 Возможность механического травмирования**

Участки в непосредственной близости от сосудов под давлением, газопроводов, фильтров, подогревателя газа регенерации, и др. являются зонами возможного механического травмирования. При возможном разрушении вышеперечисленных технических средств возможно причинение тяжкого вреда здоровью не только за счет механического повреждения организма взрывной волной и металлическими осколками, но и за счет сопутствующего процесса горения природного газа, резкого повышения температуры и давления. В особо неблагоприятных обстоятельствах существует возможность летального исхода.

### **6.1.2.2 Электробезопасность на рабочем месте**

На таких объектах как УПГТ электробезопасности следует уделять особое внимание, так как в воздухе рабочей зоны возможно появление взрывопожароопасных веществ, при определенной концентрации которых в воздухе и появлении искры возможен взрыв или возгорание.

К основным причинам поражения персонала УПГТ электрическим током, как правило, относят [32,33]:

- Прикосновение персонала к частям системы, находящимися под действием постоянного или переменного электрического тока;
- Нарушение правил ведения работ на том или ином элементе системы, связанном с использованием электрического тока;
- Нарушение сплошности изоляционного покрытия токоведущих элементов;

- Неблагоприятные воздействия окружающей среды на технические сооружения или на человека – удар молнии;
- Аварии на установках, находящихся под действием напряжения – трансформаторы, распределительные шкафы автоматики и прочее.

Известно, действие электрического тока обусловлено как его типом (постоянный/переменный), так и параметрами – частота и сила тока. Обычно выделяют некоторые пороговые значения электрического тока: ощутимый пороговый ток — 0,6...1,5 мА при частоте переменного тока 50 Гц и от 5 до 7 мА при постоянном токе; пороговый ток, имеющий свойство “неотпускающего тока” (такой ток, который вызывает при прохождении через тело человека судорожные непреодолимые сокращения мышц руки, в которой зажат токопроводящий объект) — от 10 до 15 мА при 50 Гц и от 50 до 80 мА при постоянном токе; фибрилляционный пороговый ток (ток, вызывающий фибрилляцию сердца) — в интервале от 100 и выше мА при 50 Гц и свыше 300 мА при постоянном электрическом токе.

Как можно заметить, частота переменного тока определяет его поражающую силу. В диапазоне от 10 до 500 Гц поражающая сила тока остаётся практически постоянной, но с дальнейшим увеличением частоты тока пороговые значения повышаются, тем самым снижая силу воздействия тока на организм человека.

Для напряжения ниже 400 В постоянный ток менее опасен, так как его пороговые значения в 3 – 4 раза выше, чем для переменного тока при частоте 50 Гц. Для диапазона от 400 до 600 В постоянный и переменный ток частотой 50 Гц имеют практически одинаковые значения порогового тока. Опасность постоянного тока растёт с дальнейшим увеличением напряжения.

### **6.1.2.3 Пожаровзрывобезопасность**

При возможных авариях на УПГТ основным поражающим фактором с точки зрения пожаровзрывобезопасности является тепловое излучения. В свою очередь, причинами интенсивного теплового излучения может быть ряд факторов: струйное горение вещества, горение скопления вещества в низменностях или в котловане, взрывы газоздушных смесей, самопроизвольное воспламенение пиррофорных соединений, небрежное обращение с открытым огнем, безответственная и неправильная эксплуатация электрооборудования,

возможные неполадки на электрооборудовании - короткое замыкание, и пр.

Выделение вредных горючих или взрывоопасных веществ может произойти на площадке УПГТ в узлах с наличием следующего производственного оборудования [34]:

1. Предохранительных и/или сбросных устройств адсорбционных ёмкостей, фильтров;
2. Сосудов под давлением, сконструированных из материала, подверженного электрохимической коррозии, либо оборудованных изоляционными материалами, нарушение сплошности которых возможно вследствие коррозии, грубых ошибок рабочего персонала, неправильно проведённых монтажных операций и т.д.
3. Газопроводов, которые могут подвергаться ремонтным операциям со сбросом давления и сопутствующей продувкой их воздухом или азотом.

**Таблица 6.5** – Характеристика взрывопожароопасных веществ, появление которых возможно в воздухе рабочей зоны УПГТ согласно ГОСТ Р 51330. 19 – 99 [32]

Наименование	Температура, °С		Предел взрываемости, мг/л	
	вспышки	самовоспламенения	нижний	верхний
Метан	–	537	29	113
Этан	–	515	31	194
Пропан	–	470	31	200
Бутан	–	372	33	225
Сероводород	–	246	57	650

### **6.1.3 Обоснование мероприятий по защите персонала УПГТ от действия опасных и вредных факторов**

#### **6.1.3.1 Защита от вредных веществ**

К мероприятиям, направленным на снижение загазованности и защиты организма человека от воздействия компонент природного газа, относят:

1. Планово-предупредительные работы, направленные на исключение контакта персонала со вредными веществами (обеспечение эффективности действия противокоррозионной защиты, своевременная замена уплотнений оборудования и запорной арматуры, соблюдение правил эксплуатации оборудования, сосудов под давлением и установок под напряжением);
2. Конструкционно-проектную деятельность (проектирование с учетом розы ветров, использование современных и безопасных конструкционных материалов, и прочее);
3. Постоянный контроль загазованности в автоматическом режиме при помощи газоанализаторов;
4. Принудительное и естественного вентилирование рабочей зоны, в которой существует вероятность появления вредных веществ;
5. Использование СИЗ (средств индивидуальной защиты: спецодежда, изолирующие костюмы, перчатки, противогазы, респираторы, очки, маски).
6. Введение новых методик дистанционного управления и автоматизирования производства, направленных на снижение длительности контакта человека с пространством, в котором возможно появление вредных веществ, либо полное исключение человека из тех или иных производственных процессов.

#### **6.1.3.2 Защита от повышенного уровня производственного шума**

Среди методов, используемых для снижения уровня шума в рабочей зоне установок подготовки газа к транспорту, следует выделить следующие [28, 34,35]:

1. Поглощение вибраций воздуха с использованием отдельных блоков и зданий, стены в которых выполняют из материала, который способен обеспечить необходимую звукоизоляцию;
2. Дистанционное управление технологическим процессом, исключаящим контакт человека с оборудованием, которое является источником

- повышенного звукового фона;
3. Использование поверенных средств индивидуальной защиты;
  4. Проектирование оборудования с использованием методик снижения шума в местах его генерации (например, управление газодинамикой потока путём снижения его скорости или уменьшения турбулентности);
  5. Своевременный отдых работников, в силу тех или иных причин находящихся в зонах повышенного звукового шума.

К СИЗ в данном случае относят широкий спектр технических решений – специализированные мягкие вкладыши в уши, жесткие вкладыши из резины, звукоизолирующие наушники или шлемы со спектральными фильтрами.

К коллективным средствам защиты относятся звукоизоляционные перегородки, специальные звукоизолирующие компоненты в устройствах и так далее.

#### ***6.1.3.3 Защита от неблагоприятных микроклиматических условий в рабочем помещении***

При работе в несоответствующих санитарным нормам условиях, следует обезопасить персонал с помощью средств коллективной и индивидуальной защиты. Например, при невозможности обеспечения оптимального микроклимата, следует выдать спецодежда и спецобувь, соответствующую виду выполняемых работ, микроклимату и/или времени года.

#### ***6.1.3.4 Обеспечение достаточного уровня освещенности***

При корректном использовании искусственного освещения в сочетании с естественным можно обеспечить необходимые комфортные условия освещенности производственного помещения или прилегающей к УПГТ территории. При конструировании блок-боксов и/или производственных зданий необходимо убедиться в необходимом уровне естественного освещения, которое варьируется в зависимости от количества и расположения оконных проёмов. В ночное же время, при отсутствии источника естественного освещения, для поддержания нормируемых параметров освещенности обычно используются технические средства, являющиеся источником искусственного освещения. Очевидно, что из-за опасности производственного процесса обычно источники искусственного освещения исполняются во взрывозащищённом исполнении.

Для обеспечения необходимого уровня освещенности во время ремонтных

работ необходимо использовать местное освещение, источником которых обычно являются взрывозащищенные переносные светильники.

При возникновении аварийных ситуаций для обеспечения бесперебойности производственного процесса может использоваться аварийное освещение при условии отключения рабочего. При этом, как правило, используются лампы, питание которых осуществляется автономным резервным источником – например, резервной дизельной электростанцией. При невозможности протекания производственного процесса ввиду угрозы жизни рабочему персоналу или местному населению используют комплекс мер по освещению, достаточному для эвакуации, обозначения границ опасных зон и указания границ охраняемой зоны УПГТ – соответственно эвакуационное, сигнальное и охранное освещения.

Для снижения коэффициента пульсаций светового потока и предотвращения стробоскопического эффекта применяют следующий ряд мер [33]:

- Использование электронных пускорегулирующих автоматов (ЭПРА), которые преобразуют входную частоту питающей сети до значений, к которым человек уже нечувствителен (свыше 300 Гц);
- Установка в одной точке двух или трёх светильников на разные фазы переменного тока;
- Питание разных ламп многоламповых люминесцентных светильников от разных фаз переменного тока;
- Использование светильников, работающих только от токов частотой 300 Гц и более.

#### **6.1.3.5 Меры по предотвращению механического травмирования**

Для предотвращения механического травмирования персонала необходимо обеспечить поддержание рабочих параметров в пределах, предусматриваемых проектом, необходимо неукоснительное соблюдение установки всего комплекса оборудования, включая специализированное оборудование для отслеживания рабочих параметров и их поддержания в рабочем диапазоне – манометров, термометров, датчиков температуры и давления, газоанализаторов, предохранительных и сбросных клапанов.

Другим немаловажным аспектом является соблюдение частоты и полноты мероприятий, входящих в перечень планово-предупредительных работ (ППР).

Необходимо своевременно и в полном объёме производить технические осмотры оборудования (ТО), средний и капитальный ремонты (СР и КП), внимательно следить за элементами системы УПГТ.

Важно помнить, что соблюдение правил безопасного ведения производственного процесса сможет не только предотвратить выход из строя важных элементов установки подготовки газа к транспорту, но и сохранить жизнь рабочему персоналу и местному населению.

#### **6.1.3.6 Меры электробезопасности на рабочем месте**

Среди мер по защите от негативного воздействия тока необходимо выделить следующие мероприятия [33-34, 36]:

1. Исключение контакта человека с токоведущими частями оборудования с использованием встроенных технических решений – защитного зануления, защитного заземления, защитного отключения, изоляционной обмотки проводов, физическую недоступность электрических цепей;
2. Использования методов оповещательно-предупредительного характера: предупредительных знаков, плакатов и знаков безопасности, в том числе знаков и плакатов, вывешиваемых при проведении ремонтных работ на электроустановках;
3. Защита от природного электричества при помощи молниеотводов;
4. Исключение и/или уменьшение человеческой ошибки за счет комплекса инструктажей и обучения персонала безопасным методам работы с электроприборами;
5. Использование средств индивидуальной защиты: диэлектрических перчаток, бот, резиновых ковриков, искробезопасного инструмента, в том числе инструмента с изолированными ручками.

#### **6.1.3.7 Меры по обеспечению пожаровзрывобезопасности**

Среди методов, направленных на снижение вероятности взрывов и пожаров на производстве, выделяют [34,37]:

1. Группу методов, направленных на исключение возможности утечки вредных веществ (например, обеспечение безопасного производственного режима, соблюдение частоты и полноты проведения технического обслуживания, среднего и капитального ремонта, поддержание необходимого режима тока

- противокоррозионной защиты, своевременный контроль сплошности и состояния уплотнений запорной и регулирующей арматуры, и прочее);
2. Группу методов, направленных на уменьшение концентрации вредных веществ в производственных помещениях – контроль концентрации газов газоанализирующим оборудованием, своевременное вентилирование помещений;
  3. Группу методов, направленных на предотвращение возможности возгорания или взрыва вредных веществ – использование взрывобезопасного электрооборудование, комплектация персонала искробезопасных инструментом
  4. Группу проектных методов снижения последствий взрывов и пожаров, а также их предотвращения – оптимальное ситуационное расположение зданий и узлов с учетом розы ветров, расположение возможных источников вредных газообразных веществ в оптимальной дальности от электрооборудования, и прочее;
  7. Группа методов, направленная на снижение человеческого фактора – автоматизация производства, телемеханизация, строгое соблюдение персоналом должностных инструкций и правил пожарной безопасности при производстве работ на УПГТ.

В случае аварийного развития сценария, необходима комплектация УПГТ первичными средствами пожаротушения – ёмкостями с водой и песком, пожарным инструментом (багор, ведра и лопаты, асбестовая ткань), ручными огнетушителями как для горючих веществ, так и для установок под напряжением.

## 6.2 РЕГИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

### 6.2.1 Анализ воздействия УПГТ на атмосферу и защитные меры

Атмосферные загрязнения веществами, хранящимися и эксплуатируемыми на УПГТ, происходит при нарушениях в производственном режиме, которые могут быть вызваны нештатными рабочими параметрами (повышенным или пониженным давлением и температурой), при физическом или химическом износе оборудования, уплотнений и герметизирующих элементов, и т.д. Вследствие вышеперечисленных нарушений может произойти незапланированные выбросы загрязняющих веществ. Также проводятся и запланированные залповые выбросы вредных веществ в атмосферу, факельное сжигание избытков веществ. Стоит отметить, что на настоящий момент факельное сжигание ограничивается по применению в связи с минимизацией выделений углекислого газа в атмосферу для снижения парникового эффекта, но все же полностью предотвратить практику факельного сжигания не представляется возможным на данный момент.

Среди загрязняющих веществ следует отметить метан, этан, пропан, бутан, пропан, изомеры бутана, углекислый газ, сероводород, балластный азот. Источниками этих газов могут являться сбросные и предохранительные клапаны, баллоны для сварки (углекислый газ и азот), сжигание на территории УПГТ углеводородных жидкостей (углекислый газ, угарный газ) и т.д.

Мерой допустимого атмосферного загрязнения является предельно-допустимый выброс (ПДВ), расчет которого строго регламентируется нормативной литературой. На основе этой литературы выпускаются отраслевые стандарты, позволяющие нормировать выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в каждой конкретной производственной области. Для конкретного производственного объекта производится расчет предельно-допустимых выбросов согласно отраслевым стандартам. Для загрязняющих атмосферу веществ на УПГТ можно привести предельно-допустимые концентрации следующих веществ согласно Технологическому Регламенту на проектирование компрессорных станций [38]:

**Таблица 6.6** – Характеристика загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферу на УПГТ

Вещество	ПДК и ОБУВ, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности
Оксиды азота (в т.ч. диоксид азота)	ПДК <sub>м.р</sub> = 0,085 ПДК <sub>м.р</sub> = 0,04 ПДК <sub>р.з</sub> = 5,0(NO <sub>x</sub> ) ПДК <sub>р.з</sub> = 2,0(NO <sub>2</sub> )	2
Оксид азота	ПДК <sub>м.р</sub> = 0,4 ПДК <sub>с.с</sub> = 0,06	3
Оксид углерода	ПДК <sub>м.р</sub> = 5 ПДК <sub>с.с</sub> = 3 ПДК <sub>р.з</sub> = 20	4
Метан	ОБУВ = 50	4
Диоксид серы	ПДК <sub>м.р</sub> = 0,5 ПДК <sub>с.с</sub> = 0,05 ПДК <sub>р.з</sub> = 10,0	3
Бенз (а) пирен	ПДК <sub>с.с</sub> = 0,1 мкг/100 м <sup>3</sup> ПДК <sub>р.з</sub> = 0,00015	1
Сажа	ПДК <sub>м.р</sub> = 0,15 ПДК <sub>с.с</sub> = 0,05 ПДК <sub>р.з</sub> = 4	3

Среди мероприятий, проводимых для защиты атмосферы от производственных выбросов, следует выделить [34]:

1. Соблюдение полноты и частоты технического обслуживания, среднего и капитального ремонта – своевременная замена уплотнений оборудования, запорной и регулирующей арматуры, плановая проверка сосудов под давлением на прочность и герметичность.
2. Соблюдение правил безопасного производственного процесса и должностных инструкций, технологического режима и проектных рабочих параметров;
3. Использование комплекса оборудования, направленного на фиксацию уровня производственных выбросов в атмосферу – газоанализаторов, датчиков тяги и прочее.

### **6.2.2 Анализ воздействия УПГТ на гидросферу и защитные меры**

Во время работы установки подготовки газа к транспорту некоторые загрязняющие вещества, такие как, например, жидкие углеводороды, масла и присадки различного назначения могут попасть в гидросферу (реки, моря, подземные воды), тем самым нанеся ей непоправимый вред. Это может произойти в результате проведения нерегламентированных операций, либо при

несоблюдении правил проведения ремонтных работ, при халатном отношении к безопасности производственного процесса во время эксплуатации оборудования.

Во время эксплуатации УПГТ рабочий персонал имеет дело с рядом веществ, которые в том или ином виде могут попасть в сточные воды. Их ПДК приведены в Таблице 6.7 согласно СТО Газпром 8-2005 [39].

**Таблица 6.7** – Требования к ПДК нормируемых веществ, используемых и сливаемых на УПГТ

Показатель качества воды (наименование вещества)	ПДК, мг/л, при водопользовании	
	питьевом и хозяйственно- бытовом	рекреационном
1. Взвешенные вещества	+0,25	+0,75
2. Минерализация,	1000	*
в т.ч. хлориды (по Cl)	350	*
сульфаты (по SO <sub>4</sub> )	500	*
3. Алкилбензосульфонат натрия		0,4
4. Алкилсульфаты (группа СПАВ)		0,5
5. Алкилсульфонаты (группа СПАВ)		0,5
6. Алюминий		0,5
7. Аммиак (по азоту)		2,0
8. Бенз(а)пирен		0,000005
9. Бензин		0,1
10. Бензол		0,5
11. Бутанол-2		0,2
12. ДДТ		0,1
13. Диэтиленгликоль		1,0
14. Железо (включая хлорное железо) по Fe		0,3**
15. Керосин техн.		0,01
16. Марганец		0,1
17. Медь		1,0
18. Метанол		3,0
19. Натрий		200,0
20. Никель		0,1
21. Нитраты (по NO <sub>3</sub> )		45,0
22. Нитриты (по NO <sub>2</sub> )		3,3
23. Ртуть		0,0005**
24. Свинец		0,01
25. Хлориды (по Cl)		350,0
26. Хром (Cr <sup>6+</sup> )		0,05

Следующие меры превентивного характера могут предотвратить загрязнений сточных вод (и, как следствие, гидросферы) [34]:

1. Своевременный и полный контроль за оборудованием УПГТ, в

котором возможна утечка вредных веществ, в частном порядке включает в себя своевременную замену уплотнения оборудования и арматуры УПГТ, мероприятия, направленные на поддержание целостности огнеупорных футеровок и оборудования противокоррозионной защиты, а также соблюдение правил безопасной эксплуатации узлов УПГТ.

2. Уборка отходов производства в специализированные ёмкости, предназначенные для транспортировки до мест дальнейшей переработки

### **6.2.3 Анализ воздействия УПГТ на литосферу и защитные меры**

Литосфера может оказаться под вредным влиянием производственной деятельности на УПГТ в результате образования или скопления количества отходов, которое превышает допустимые нормы. Важной производственной задачей является либо обеспечения полной переработки складированных вредных веществ, либо сведение к минимуму последствий возможного воздействия хранимых веществ на литосферу.

Среди веществ, которые могут попасть в литосферу и нанести ей вред, выделяют ртуть, серу и её оксиды, свинец, хлористый калий, хром и прочее. Согласно СанПиН 42-128-4433-87 [40], предельно допустимые концентрации этих веществ в почве следующие:

**Таблица 6.8** – Допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве

№	Вещество (наименование)	ПДК, мг/кг почвы с учетом фона
1	Кобальт	5,0
2	Фтор	2,8
3	Хром	6,0
4	Бенз (а) пирен	0,02
5	Ксилолы	0,3
6	Ртуть	2,1
7	Свинец	32,0
8	Сернистые соединения (S): Элементарная сера Сероводород Серная кислота	160,0 0,4 160,0
9	Хлористый калий	560,0

Среди мероприятий по уменьшению негативного влияния производственных процессов УПГТ на литосферу необходимо выделить

следующие [34]:

1. Соблюдение правил контролирующих организаций по обязательному селективному сбору отходов, их хранению и предельному допустимому количеству складироваемых веществ, а также по соблюдению договоров о передаче отходов и вредных веществ специализированным организациям для утилизации.
2. Соблюдение требований технологического режима по рабочим показателям проекта;
3. Соблюдение полноты технического обслуживания, среднего и капитального ремонта;
4. Замена уплотнений оборудования для обеспечения герметичности технологических ёмкостей.

#### **6.2.4 Анализ воздействия УПГТ на селитебную зону и защитные меры**

УПГТ классифицируется как опасный производственный объект из-за существующих рабочих параметров (давление и температура, а также вид транспортируемого сырья), в виду чего УПГТ располагается на некотором удалении от жилых зон любого типа. Это необходимо для обеспечения безопасности как производства, так и местного населения.

Следующие меры обычно применяют для обеспечения безопасности селитебных зон [34]:

1. УПГТ располагается на удалении от населенных пунктов или жилых зон;
2. Вокруг УПГТ организуется санитарно-защитная зона шириной 100 м;
3. Производится ограждение территории по периметру;
4. Устанавливается круглосуточное видеонаблюдение;
5. Сооружают охранную сигнализацию по периметру;
6. Устанавливаются специальные информационные и запрещающие знаки.

### **6.3 БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

К чрезвычайным ситуациям техногенного характера на УПГТ можно отнести разрывы трубопроводов и сосудов под давлением, воспламенение легкогорючих жидкостей (бензин, дизельное топливо, скипидар и т.п.), взрывы скоплений природного газа или паров ЛГЖ, загорания пыльных взвесей, аварии

на электрических сетях с долгим перерывом в электроснабжении, возгорание и взрывы оборудования узлов УПГТ.

К ЧС природного характера можно отнести штормовые ветры, ураганы, ливни, сильный град, землетрясения, лесные пожары, оползни и сели. Следует заметить, что наиболее частыми являются ливни, град, штормы и ураганы, наибольшую разрушающую силу имеют землетрясения и наводнения. Защищенность человека от ЧС природного характера крайне мала, несмотря на общий рост уровня жизни.

К экологическим ЧС можно отнести превышение предельно допустимых концентраций веществ в атмосфере, почве и воде, недопустимые температурные изменения вследствие деятельности человека, нарушение видового разнообразия животного и растительного мира из-за сооружения промышленных построек на территории естественного обитания и роста или на путях миграции животных.

К последней группе социальных ЧС относятся террористические атаки на УПГТ, забастовки рабочего персонала, диверсии и порча оборудования и коммуникация группой лиц ввиду социально-политических мотивов и т.д.

Наиболее распространенной группой ЧС являются техногенные ЧС, затем имеют место природные катастрофы, которые достаточно тесно связаны с экологическим ущербом. Довольно редко происходят ЧС социального характера. В целом нужно отметить, что все типы ЧС тесно взаимосвязаны друг с другом и имеют тенденцию взаимно перетекать друг в друга.

Для обеспечения безопасности в ЧС применяются следующие меры [33]:

- На этапе строительства УПГТ обеспечивается минимизация экологического ущерба вследствие аварийных выбросов и сбросов, пожаров и взрывов;
- Разрабатываются планы ликвидации аварий и утверждаются ответственные лица, которые проводят периодически опросы рабочего персонала, учения и инструктажи;
- Путь газопроводных и водопроводных коммуникаций и расположение УПГТ выбирается таким образом, чтобы не оказывать значительного негативного влияния на флору и фауну;

- Проводятся плановые осмотры и ремонты оборудования для предотвращения отказов, аварий и инцидентов;

- Технологии строительства зданий и монтажа оборудования обеспечивают дополнительную защиту от бедствий стихийного характера.

При возникновении самой распространенной группы ЧС – ЧС техногенного характера – работникам необходимо придерживаться следующих простых инструкций [33]:

- Так как при ЧС на УПГТ существует вероятность взрыва, работникам необходимо лечь на живот и обеспечить защиту головы (например, руками). При этом необходимо держаться в отдалённости от окон, дверей, лестниц, застекленных входных проёмов;
- В случае взрыва необходимо принять меры, предотвращающие возникновение пожара и паники, а также оказать первую неотложную помощь тем людям, которые пострадали в результате взрыва;
- При обнаружении возгорания либо иных других признаков горения работники должны как можно скорее сообщить об этом по телефонам 01 или 010 (для мобильных). При этом необходимо назвать место взрыва, тип производственного объекта, имя и фамилию работника, а также принять меры по эвакуации остального рабочего персонала, тушению пожара и, по возможности, сохранности производственного объекта;
- При невозможности выполнения любого из перечисленных действий без серьёзной угрозы для жизни необходимо вначале обеспечить личную сохранность, а затем произвести попытки выполнения пунктов данной рекомендации.

## **6.4 ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА УПГТ**

### **6.4.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Существуют возрастные и профессиональные ограничения по работе на УПГТ. Например, к работе на УПГТ допускаются только те лица, которые достигли совершеннолетия (возраста 18 лет), а также которые прошли соответствующий медицинский осмотр и не имеют противопоказаний к работе на УПГТ. Необходимо, чтобы рабочий персонал был обучен безопасным методам ведения работы, прошел инструктаж на рабочем месте и получил допуск к самостоятельной работе. При этом, все работники должны использовать выдаваемую компанией спецодежду и спецобувь, а также иные средства индивидуальной защиты. Все вопросы, связанные с оценкой условий труда на производстве, согласовываются с требованиями ФЗ от 28.12.13 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда», ст.147 ТК РФ и ст.117 ТК РФ [41]. Весь рабочий и инженерно-технический персонал обязуется соблюдать требования ФЗ от 28.12.2013 № 421-ФЗ «О рабочем времени», ст.94 ТК РФ [42], а их руководители (начальник цеха или лицо, его замещающее) не имеют права нарушать требования Трудового Кодекса Российской Федерации.

На каждом предприятии, по каждому цеху должен быть разработаны перечни газоопасных и огнеопасных работ, которые должен периодически пересматриваться и утверждаться заново. Обычно переучет перечней проходит 1 раз в год.

Кроме того, обязательным документом при проведении огне- и газоопасных работ является правильно оформленный наряд-допуск, который должен предусматривать разработку и реализацию мероприятий по предварительной подготовке работ, а также их по непосредственному проведению. Наряд-допуск согласовывается с начальником пожарной службы предприятия или лицом, его замещающим, с ведущим инженером отдела охраны труда и промышленной безопасности, а за разработку наряда-допуска отвечает начальник цеха или службы, либо лицо, его замещающее.

Согласно наряду-допуску, назначается лицо, которое является ответственным за организацию безопасного проведения огне- и газоопасных работ. Лицо, назначенное ответственным за проведение газоопасных работ, обязано обеспечить полноту и соответствия производственным нормам принятых

мер безопасности, достаточную квалификацию тех рабочих и инженерных кадров, назначенных исполнителями работ, должно обеспечить полноту и качество инструктажа рабочего персонала, а также обязано руководить работой и наблюдать за соблюдением мер безопасности на рабочем объекте.

Наряд-допуск на проведение газоопасных работ действителен в течение одной смены и выдается каждой бригаде на конкретное место и вид работ. В случае, если работа не завершена по окончанию рабочего дня, и характер и условия проведения работ не ухудшились, на следующую смену допускается продлить предыдущий наряд-допуск.

Наряд-допуск обязывает проводить огне- и газоопасные работы в составе бригады, которая состоит не менее чем из двух человек рабочего персонала без учета ответственного лица. Если работы проводятся внутри резервуаров, труб, аппаратов, в траншеях или котлованов глубиной более 1 м, то бригада должна состоять не менее трех человек без учета ответственного лица.

#### **6.4.1 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Организационные мероприятия по обеспечению безопасности при ведении работ на УПГТ – это сложный взаимосвязанный комплекс мероприятий, который составляет как при проектировании УПГТ, так и при пуске его в эксплуатацию. Как правило, мероприятия такого рода касаются нескольких важных аспектов – организация рабочего пространства, ситуационное расположение установки, разработка перечня требований к безопасному ведению работ, разработка противопожарных инструкций, а также общая эргономика узлов установки.

Организация рабочего пространства подразумевает под собой расположение предметов на рабочем столе, расстановку оборудования по рабочей зоне, наличие специальных мест под рабочий инструмент, и прочее. Во всех этих случаях должен быть обеспечен не только удобный и быстрый доступ к оборудованию, но и безопасный. Таким образом, организация рабочего пространства должна отвечать критерию безопасности вкупе с эффективностью.

Ситуационное расположение УПГТ должно учитывать такие факторы, как рельеф местности, в которой происходит сооружение УПГТ, расположение зданий и блок-боксов относительно сторон света (условиях для естественного освещения зданий), а также весьма важный фактор - розу ветров, необходимую для обеспечения проветривания УПГТ, недопущения образования скопления газов и

учета распространения дыма, пара и огня как в рабочих условиях, так и при аварийных ситуациях.

Учет расстановки оборудования по рабочей зоне необходим для обеспечения транспортной логистики в пределах УПГТ – например, административно-хозяйственный комплекс логичнее расположить в непосредственной близости к транспортным узлам, а здания и сооружения, потенциально представляющим повышенную пожарную опасность следует расположить с подветренной стороны, и так далее

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании литературных источников, патентного поиска и сведений от компаний можно судить, что оптимизация процесса осушки газа сводится к совершенствованию сорбирующего материала. В большинстве своём совершенствования касаются повышения сорбционной активности адсорбента. В перспективе это может привести к снижению металлоёмкости путём уменьшения требуемого внутреннего диаметра, либо непосредственно за счет меньшего количества адсорберов в нитке.

В то же время есть и другие способы оптимизации технологического процесса, например, путём совершенствования конструкции адсорберов. При проектировании адсорберов возможно уменьшить толщину стенки цилиндрической обечайки, крышки и днища за счет ряда факторов, среди которых:

- Давление;
- Тип материала.

Кроме того, попутно на толщину адсорбера также оказывают влияние:

- Толщина изоляции;
- Расчетная температура допускаемого напряжения стали.

Анализ проектной документации, научно-технической литературы позволил выявить возможные пути оптимизации конструкции адсорбера установки подготовки газа к транспорту:

- Снижение рабочего давления;
- Подбор оптимальной толщины изоляции;
- Подбор конструкционного материала (стали) исходя из дополнительных проектных данных – степени развития транспортной инфраструктуры, необходимости дополнительных затрат на транспортировки адсорбера, и прочее.

**Анализ влияния изоляции на температуру стали** показал, что оптимальная толщина изоляции определяется требованиями к температуре внешней стенки адсорбера. Согласно рекомендациям изложенным в СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003», наружная температура стенки не должна превышать значение 75 °С. Для соответствия требованиям норм и правил оптимальная толщина изоляции должна составлять порядка 100÷120 мм для обеспечения наружной температуры стенки меньше 75 °С.

В то же время, использование внутренней изоляции позволяет уменьшить расчетную температуру по стали. Например, при толщине изоляции в 100 мм наблюдается значительное уменьшение температуры на стыке «футеровка-сталь» - температура падает с 280°С до 94°С. Согласно ГОСТ Р 51274-99 это

позволяет использовать для прочностного расчета значение температуры, полученное в результате теплотехнических расчетов - 94°C.

**Расчет адсорбера по давлению** показал, что изменение толщины в зависимости от давления выражено сильнее, чем изменение толщины в зависимости от температуры стали. Однако при увеличении давления возрастает влияние температуры – например, разброс толщин по температуре при давлении 6 МПа значительно уже, чем интервал толщин при давлении 10 МПа.

Можно предположить, что при снижении рабочего давления на 3 МПа толщина стенки упадет существенно – на 30-40 мм. Однако существуют проектные ограничения, которые обязывают принять за расчетное давление 9,8 МПа – а именно, давление на линии всаса компрессорной станции, что не позволяет таким образом оптимизировать конструкцию адсорбера.

**Анализ влияния конструкционного материала** показал, что для всех сталей заметен сдвиг, который объясняется разными сопротивлениями сталей. В случае 09Г2С, наблюдается большая чувствительность к изменению температуры чем у остальных сталей. Для сталей SA-533М и 15Х5М зависимость от температуры также имеет место, однако выражена не столь интенсивно.

Кроме того, с ростом толщины изоляции во всех случаях наблюдается снижения интервала между толщинами адсорберов из разных сталей. Очевидно, что это происходит 1) из-за снижения температуры стыка «футеровка-сталь»; 2) из-за разной температурной “чувствительности” сталей.

Для сталей SA-533М и 15Х5М в интервале толщины футеровки от 100 до 400 мм наблюдается достаточно пологое снижение толщины стенки обечайки. В случае выбора стали SA-533М следует ограничиться оптимальной толщиной футеровки в 100-120 мм, что также соответствует выводам по разделу 5.2.

Для сталей 09Г2С и AISI 304SS достаточно крутое падение толщины наблюдается в интервале толщины футеровки от 10 до 180 мм. Далее падение становится более пологим. Следовательно, одним из возможных способов снижения металлоёмкости будет утолщение футеровки – в интервале от 120 до 140 мм для стали 09Г2С. Использование стали AISI 304SS следует принять нецелесообразным.

Влияние толщины изоляции на толщину стенки ведёт к снижению массы адсорбера на интервале толщины изоляции с 10 до 150 мм. Однако при дальнейшем росте изоляции масса адсорбера растёт, что может быть результатом ошибки в аппроксимационных формулах для допустимого напряжения. Так как при росте изоляции температура стали падает, то при толщине изоляции от 150 мм и выше температура выходит за рамки той, для которой рассчитывались аппроксимационные зависимости допустимого напряжения от температуры. Этот факт требует уточнения экспериментальных данных по пределу прочности и временному сопротивлению в интервале температур от 0 до 60°C.

**Стоимостный анализ** показал, что для разных типов стали заметна линейная зависимость стоимости от массы, что соответствует теоретической базе. Стоит заметить, что адсорбер на основе сталей 09Г2С или 15Х5М тяжелее (на 60-70 т.), чем адсорбер на основе SA-544М, который, очевидно, является самым немассивным из четырёх вариантов. В ценовом диапазоне хорошо

заметно разделение на три категории – адсорбер из стали 09Г2С в диапазоне 160-170 млн.руб, адсорберы из сталей SA-533М и 15Х5М в диапазоне 400-460 млн.руб., и адсорбер из стали AISI 304 SS – от 790 до 900 млн.руб.

Аналогичная ситуация наблюдается и для другого исполнения адсорбера – с  $D_{вн}= 3.6$  м (см. Рисунок 5.16) – адсорбер из стали 09Г2С находится в диапазоне 150-160 млн.руб, адсорберы из сталей SA-533М и 15Х5М в диапазоне 470-400 млн.руб., и адсорбер из стали AISI 304 SS – от 610 до 710 млн.руб.

**В общем выводе** необходимо отметить, что при выборе пути оптимизации конструкции адсорбера существуют как минимум два ключевых аспекта – стоимость и масса. Если стоимость адсорбера – ключевой фактор в проекте, необходимо за конструкционный материал выбрать сталь 09Г2С с оптимальной толщиной изоляции 120-140 мм. При сравнительно низкой цене конструкционного материала такая толщина изоляции позволит снизить металлоёмкость и тепловые потери в режиме регенерации и обеспечит безопасность производственного процесса.

В случае, если масса адсорбера играет важную роль при выборе конструкционного материала (например, при плохой транспортной инфраструктуре в районе проектирования УПГТ), то следует выбрать сталь SA-533М. Этот выбор позволит значительно снизить итоговую массу, а изоляция в диапазоне толщин 100-120 мм обеспечит температуру внешней стенки ниже 75°С в соответствии с СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция СНиП 41-03-2003»

Адсорбер на основе стали 15Х5М необходимо выбирать в случае наличия в газе большого количества CO<sub>2</sub>. Адсорбер на основе стали AISI 304SS нецелесообразен для проектирования.

Вышесказанное свидетельствует, что в настоящей выпускной работе были выполнены следующие задачи:

1. Проведён аналитический обзор возможностей оптимизации адсорберов в технологиях подготовки газа к транспорту;
2. Описана методика и программа расчета теплопередачи через стенку адсорбера с внутренней изоляцией
3. Экспериментально определена порозность слоя сорбента в адсорбере;
4. Определена зависимость расчетной температуры стенки адсорбера от толщины внутренней изоляции;
5. Определена зависимость толщины стенки адсорбера от толщины внутренней изоляции и марок стали для сталей 09Г2С и SA-533М;
6. Рассчитана стоимость адсорберов с различной толщиной внутренней изоляции и марок стали;
7. Определена оптимальную стоимость адсорбера в зависимости от толщины стенки, толщины изоляции и вида стали.
8. Разработаны рекомендации по оптимизации адсорберов в технологиях подготовки газа к транспорту

В связи с этим, **цель** магистерской диссертации – *разработка рекомендаций по конструкции адсорбера с внутренней изоляцией в технологиях подготовки газа к транспорту* – считается достигнутой.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

№ п/п	Наименование	Форма	Выходные данные издательства	Количество листов	Соавторы
<b>Публикации в ведущих российских и зарубежных научных изданиях (журналы Web of Science, Scopus и др.)</b>					
1.	Suppression of flow pulsation activity by relaxation process of additive effect on viscous media transport	Электронная	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2015 - Vol. 27. - p. 1-6	6	Kharlamov S. N. , Dedeev P. O. , Meucci L. -, , Shenderova I. V. , Manastyrsky A. I. , Usenko M. Y.
2	Hydrodynamic, heat and acoustic processes modelling in transport of rheologically complex viscous media technology in pipelines	Электронная	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2014 - Vol. 21. - p. 1-6	6	Kharlamov S. N. , Kudelin N. S.
<b>Доклады и статьи в сборниках конференций</b>					
3.	Календарь в культуре Камбоджи	Печатная	Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2015 - №. 6-2. - С. 366-369	4	Колесникова С. Ю.
4	Связь графемы и значения иероглифа (на примере графемы?)	Печатная	Молодой ученый. - 2015 - №. 9(89). - С. 1348-1350	3	Бородина Е. С. , Болсуновская Л. М.
5	Переходы вихревой природы в условиях действия высокомолекулярных присадок на турбулентное течение вязких сред в трубопроводах	Печатная	Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. - 2015. - Вып. 17. - С. 56-63	8	Харламов С. Н.
6	Ключ ти «глаз» в составе китайских иероглифов	Печатная	Молодой ученый. - 2015 - №. 9(89). - С. 1454-1456	3	Яковлева Е. А. , Болсуновская Л. М.
7	Оценка технико-экономического эффекта от использования противотурбулентных присадок в нефтепроводах	Печатная	Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 4-8 Апреля 2016. - Томск: Изд-во ТПУ, 2016 - Т. 2 - С. 1011-1013	3	-
8	Снижение трения в турбулентных потоках полимерными добавками: обзор экспериментальных	Печатная	Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых,	3	-

№ п/п	Наименование	Форма	Выходные данные издательства	Количество листов	Соавторы
	данных и физико-математических моделей		посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 4-8 Апреля 2016. - Томск: Изд-во ТПУ, 2016 - Т. 2 - С. 901-903		
9	Computation of stressedly-deformed sectors of a pipeline in the process of laying on the seabed	Печатная	Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 115-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова, Томск, 7-11 Апреля 2014. - Томск: Изд-во ТПУ, 2014 - Т. 2 - С. 741-743	3	Gorokhov A. A.
10	Численное моделирование тепловых процессов в стенке трубопровода	Печатная	Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 115-летию со дня рождения академика Академии наук СССР, профессора К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения члена-корреспондента Академии наук СССР, профессора Ф.Н. Шахова, Томск, 7-11 Апреля 2014. - Томск: Изд-во ТПУ, 2014 - Т. 2 - С. 611-613	3	Куделин Н. С.
11	Гидродинамические особенности транспорта углеводородных сред в поле действия высокополимерных присадок в трубопроводах	Печатная	Ресурсоэффективным технологиям - энергию и энтузиазм молодых: сборник научных трудов VI Всероссийской конференции, Томск, 22-24 Апреля 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - С. 7-13	7	
12	Анализ перспектив российского рынка CROWDEUNDING-A	Печатная	Экономика России в XXI веке: сборник научных трудов X Всероссийской научно-практической конференции "Фундаментальные проблемы модернизации экономики России", Томск, 19-23 Ноября 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 36-39	4	Плужник (Варанкова) М. В.
13	Гидростанция	Печатная	Ресурсоэффективным технологиям - энергию и энтузиазм молодых: сборник	3	Куделин Н. С., Урустемов Н. Н., Таскин Н.

№ п/п	Наименование	Форма	Выходные данные издательства	Количество листов	Соавторы
			докладов IV Всероссийской конференции студентов Элитного технического образования, Томск, 24-27 Апреля 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - С. 188-190		О., Карсыбаев Р. А.
14	Исследование нелинейных взаимодействий акустических и гидродинамических пространственных процессов в трубопроводах сложной формы в режимах их возбуждения	Печатная	Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, посвященная 50-летию создания Тюменского индустриального института, Тюмень, 20 Декабря 2013. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2013 - С. 241-244	3	Харламов С. Н.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Михалев М.Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств: примеры и задачи: учеб. пособие для вузов / М.Ф. Михалев, Н. П. Третьяков, А.И. Мильченко, В.В. Зобнин / под общ. ред. М.Ф. Михалева. – Л.: Машиностроение, 1984. – 301 с.
2. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов / под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
3. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов / Ю.Н. Работнов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
4. ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Методы расчета на прочность. – М.: ИПК Издательство Стандартов, 2017. – 49 с.
5. Патент № 2190581 Российская Федерация, МПК F27D1/10. Способ устройства футеровки из жаростойкого бетона / Жуков В.В., Хаджишалапов Г.Н., Цикунов В.С.; заявитель и патентообладатель ФГУП "НИЦ "Строительство". – № 2004119527/03; Заявлено 29.06.2004; Опубликовано 10.02.06.
6. Патент № 2447929 Российская Федерация, МПК B01D53/26 Способ осушки и очистки природных газов / Шайхутдинов А.З., Кручинин М.М., Мамаев А.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Газпром". – № 2010140515/05; Заявлено 01.10.2010; Опубликовано 20.04.12.
7. Патент № 2395329 Российская Федерация, МПК B01D53/14. Способ очистки и осушки природного газа / Золотовский Б.П., Жвачкин С.А., Баканов Ю.И., Митяй С.С., Павленко П.П.; заявитель и патентообладатель ООО "ГАЗПРОМ ТРАНСГАЗ-КУБАНЬ". – № 2007142831/15; Заявлено 19.11.2007; Опубликовано 27.07.10.
8. ВСН 315-80. Инструкции по проектированию футеровок тепловых агрегатов нефтеперерабатывающей промышленности из легкого жаростойкого бетона и теплоизоляционных материалов. – М.: ММСС СССР, 1981. – 22 с.
9. ГОСТ 30319.3-2015. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о компонентном составе. – М.: Стандартинформ, 2016. – 28 с.
10. ГОСТ 25215-82. Обечайки и днища. Нормы и методы расчета на прочность. – М.: Государственный Комитет СССР по стандартам, 1983. – 7 с.
11. ГОСТ Р 51274-99. Сосуды и аппараты. Аппараты колонного типа. Нормы и метод расчета на прочность. – М.: Стандартинформ, 2000. – 11 с.
12. 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. – М.: Стандартинформ, 2007. – 23 с.
13. Официальный сайт ПАО "Газпром" [Электронный ресурс] // Материалы сайта [www.gazprom.ru/](http://www.gazprom.ru/). URL: <http://www.gazprom.ru/about/production/projects/pipelines/> (дата обращения 24.03.2017).

14. Daiminger U. Adsorption Processes for Natural Gas Treatment: A Technology Update. Engelhard Brochure / U. Daiminger, W. Lind. – 2004.
15. Gas Process Handbook. Shell Global Solutions International // Hydrocarbon Processing, 2004.
16. Metters S.D. Advances in adsorption processing technology. Progres de la technologie de traitement d'adsorption / S.D. Metters, L. Shelenko // Advantica Technologies Limited, United Kingdom A Turner BG Group. – United Kingdom, 2002.
17. Mitariten M. The Sorbead™ Quick-Cycle Process. For Simultaneous Removal of Water, Heavy Hydrocarbons and Mercaptans from Natural Gas / M. Mitariten, W. Lind // Laurance Reid Gas Conditioning Conference. – Hannover, Germany, 25-27 February 2007. – Germany, 2007.
18. Ференц Т. Адсорбционная осушка газа перед транспортировкой / Т. Ференц // Нефтегазовые технологии. – 2012. – №10. – С. 58-62.
19. Кондауров С.Ю. Перспективы использования адсорбционных технологий для подготовки газа к транспорту / С.Ю. Кондауров, И.И. Артемова, М.М. Кручинин [и др.] // Газовая промышленность, 2010. – № 10. – С. 52-55.
20. СТО Газпром 089-2010. Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия. – М.: Информационно-рекламный центр газовой промышленности, 2010. – 412 с.
21. Кулиев, А.М. Технология и моделирование процессов подготовки природного газа / А.М. Кулиев, Г.З. Алекперов, В.Г. Тагиев. – М.: Недра. – 1978. – 232 с.
22. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков / под ред. чл.-корр. АН СССР П.Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
23. Праведников И.С. Сравнительный метод оценки стоимости нефтехимического оборудования / И.С. Праведников // Нефтегазовое дело. – 2005. № 2. – С. 44.
24. Лист Горячекатаный (09Г2С) / Мониторинг цен [Электронный ресурс] // Материалы сайта <https://www.mcena.ru/>. URL: [https://www.mcena.ru/metalloprokat/list/goryachekatanyj-09g2s\\_ceny](https://www.mcena.ru/metalloprokat/list/goryachekatanyj-09g2s_ceny) (дата обращения 01.04.2017)
25. Лист 15Х5М / Листовой прокат компании Металлинвест [Электронный ресурс] // Материалы сайта [moscow.m-invest.ru](http://moscow.m-invest.ru) URL: [http://moscow.m-invest.ru/\\_list/\\_t\\_/steel=15h5m](http://moscow.m-invest.ru/_list/_t_/steel=15h5m) (дата обращения 20.04.2017)
26. Лист стали AISI 304 SS / Продукция компании Глобус Сталь [Электронный ресурс] // Материалы сайта [www.globus-stal.ru](http://www.globus-stal.ru). URL: <https://www.globus-stal.ru/steel-grade/aisi-304/> (дата обращения 21.24.2017)
27. ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны.
28. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартиформ, 2015. – 27 с.

29. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М.: Минздрав России, 1997. – 25 с.
30. ВСН 34-91. Отраслевые нормы искусственного освещения предприятий нефтяной и газовой промышленности. – М.: Миннефтегазпром СССР, 1991. – 57 с.
31. СНиП 23-05-95\*. Естественное и искусственное освещение. – М.: ЦПП, 2011. – 70 с.
32. ГОСТ Р 51330.19 – 99. Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 20: Данные по горючим газам и парам, относящиеся к эксплуатации электрооборудования. – М.: Стандартинформ, 2007. – 24 с.
33. ПТЭ Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. М.: Энергосервис, 2003. – 128 с.
34. ПБ 08-624-03. Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности. – М.: ПИО ОБТ, 2003. – 46 с.
35. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 18 с.
36. РД 34.21.122-87. Инструкция по молниезащите зданий и сооружений. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 47 с.
37. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. – М.: ИПК Издательство Стандартов, 1996. – 83 с.
38. Технологический регламент на проектирование компрессорных станций. – М.: Информационно-рекламный центр газовой промышленности, 1994. – 50 с.
39. СТО Газпром 8-2005. Регламент по расчету предельно допустимых сбросов веществ в поверхностные водные объекты со сточными водами. – Челябинск: Центр Безопасности Труда, 2006. – 54 с.
40. СанПиН 42-128-4433-87. Санитарные нормы допустимых концентраций химических веществ в почве – М.: Типография министерства здравоохранения СССР, 1988. – 54 с.
41. Федеральный закон от 28.12.13 № 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда».
42. Федеральный закон от 28.12.2013 № 421-ФЗ «О рабочем времени», ст.94 ТК РФ.



## Приложение Б – Функция для расчета допускаемых напряжений для стали 09Г2С

```
function [sigma] = Sigma09G2C(t)
%UNTITLED3 Summary of this function goes here
    %это функция для расчета допускаемого напряжения. Данные для Re и Rm
    %вытащены из CurveFitting Tool.
% Detailed explanation goes here
Re = (-5.037e-06)*t^3 + 0.007242*t^2 - 3.609*t + 841.9;
Rm = (8.535e-08)*t^4 + (-0.0001739)*t^3 + 0.1293*t^2 + (-41.32)*t + 5192;

sigma = (1*min(Re/1.5,Rm/2.4))*10^6 %допускаемое напряжение, Па

end
```

## Приложение В – Функция для расчета допускаемых напряжений для стали 15Х5М

```
function [sigma] = Sigma15H5M(t)
%UNTITLED3 Summary of this function goes here
    %это функция для расчета допускаемого напряжения. Данные для Re и Rm
    %анализировались при помощи CurveFitting Tool.
% Detailed explanation goes here
Rp20 =(t.^2)*(-0.0002529) + (t.^1)*0.08269 + 216.7;
Rm =(t.^4)*(-3.486e-08)+(t.^3)*(6.948e-05)+(t.^2)*(-0.04993)+t*(15)-1198;
sigma = (1*min(Rp20/1.5,Rm/2.4))*10^6 %допускаемое напряжение, Па

end
```

**Приложение Г – Функция для расчета допускаемых напряжений для стали SA-533M**

```
function [sigma] = SigmaSA_533M(t)
%UNTITLED3 Summary of this function goes here
    %это функция для расчета допускаемого напряжения. Данные для Re и Rm
    %вытащены из CurveFitting Tool.
% Detailed explanation goes here
Re = 259;
Rm = (-1.693e-06)*t^3 + 0.002671*t^2 - 1.591*t + 762.3;

sigma = (1*min(Re/1.5,Rm/2.4))*10^6 %допускаемое напряжение, Па

end
```

**Приложение Д – Функция для расчета допускаемых напряжений для стали  
AISI 304SS**

```
function [sigma] = Sigma304SS(t)
%UNTITLED3 Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
Rp20=(t.^3)*(8.109e-07)+(t.^2)*(-0.001176)+t*0.3314+192.8;
Rm=(t.^3)*(-1.456e-06)+(t.^2)*(0.002859)+t*(-2.01)+902.2;
sigma=(1*min(Rp20/1.5,Rm/2.4))*10^6 %допускаемое напряжение, Па
end
```

## Приложение Е – Расчет динамической вязкости в iPython 3.6

```
#расчет вязкости газовой смеси
x_in=[97.5328,0.88,0.1399,0.015,0.0249,0.0174,0.0174,0.0194,0.9304,0.4101]
omega_i=[0.064294,0.10958,0.18426,0.16157,0.21340,0.26196,0.29556,0.29965,0.013
592,0.20625]
Tcr=[190.564,305.32,369.825,407.85,425.16,460.39,469.65,507.85,126.2,304.2] #K
ro_cr=[162.66,206.58,220.49,224.36,227.85,236.0,232.0,233.6,313.1,468.0] #кг/м3
a_ik=[[-0.838029104,4.88406903,-0.344504244,0.0151593109],
[-1.21924490,4.05145591,-0.200150993,0.00662746099],
[0.254518256,2.54779249,0.0683095277,-0.0114348793],
[-0.524058048,2.81260308,-0.0496574363,0],
[1.04273843,1.69220741,0.194077419,-0.0159867334],
[0.452603096,1.79775689,0.157002776,-0.0158057627],
[0.550744125,1.75702204,0.173363456,-0.0167839786],
[0.658064311,1.50818329,0.178280027,-0.0161050134],
[-0.279070091,7.81221301,-0.699863421,0.0378831186],
[-0.468233636,5.37907799,-0.0349633355,-0.0126198032]]
sigma=[1,1,0,1,0,1]
d_ik=[[0,0,0,0,0,0],
[0.04156931,0,0.06408111,0.04763455,-0.1889656,0.1533738],
[0.03976538,0.08375624,0.1747180,1.250272,-0.5283498,0.2458511],
[-0.06667775,0.2100174,0.06330205,0.3182660,0.1474434,-1.113935],
[0.07234927,0.009435210,-0.03673568,0.4516722,-0.3272680,-0.6135352],
[0,0.1651156,-0.07126922,0.06698673,-0.5283166,-0.7803174],
[0.02229787,0.08380246,0.04639638,-0.1450583,0.03725585,-0.4106772],
[0.1753529,-0.08018375,-0.03543316,-0.09677546,-0.2015218,-1.206562],
[-0.005352690,0.09101896,0.01501200,0.2640642,-0.1032012,-0.1078872],
[-0.03468202,0.1130498,0.05811886,0.05767935,-0.1814105,-0.5971794]]
M=[16.034,30.07,44.097,58.123,58.123,72.15,72.15,86.177,28.0135,44.01]
C_n=[3.06331302,-8.64573627,8.96123185,-3.00860053,1.27196662,-0.875183697,-
0.0577055575,0.0352272638]
r_n=[1,1,1,1,2,2,3,5]
t_n=[1,2,3,4,1,2,1,1]
R=[8.31451] #кДж/кмоль К
#метан,этан,пропан,и-бутан,н-бутан,и-пентан,н-пентан,н-гексан,азот,уг.газ)
Mm_in=[16.53] #молекулярная масса, кг/кмоль
Mm_out=[17.23] #молекулярная масса, кг/кмоль
T_in=[561.15] #K
ro_in=[25.14] #кг/м3
ro_pcr_back=0
T_pcr=0
Ppcr=0
for i in range(len(x_in)):
```

```

for j in range(len(x_in)):
    ro_pcr_back+=(x_in[i]/100*x_in[j]/100*((M[i]/ro_cr[i])**1/3)+(M[j]/ro_cr[j])**1/3)**3)
ro_pcr=0.125*(ro_pcr_back**(-1))
for i in range(len(x_in)):
    for j in range(len(x_in)):

T_pcr+=((x_in[i]/100*x_in[j]/100)*((M[i]/ro_cr[i])**1/3)+(M[j]/ro_cr[j])**1/3)**3)*(Tcr[i]*Tc
r[i])**1/2)
T_pcr*=(0.125*ro_pcr)
summa=0
for i in range(len(x_in)):
    summa+=(x_in[i]/100)*omega_i[i]
Ppcr=1/1000*R[0]*ro_pcr*T_pcr*(0.291-0.08*summa)
m0i = [0 for i in range(len(x_in))]
for i in range(len(x_in)):
    for k in range(4):
        m0i[i]+=a_ik[i][k]*(T_in[0]/100)**k
m0=0
for i in range(len(x_in)):
    b=0
    for j in range(len(x_in)):
        b+=((1+(m0i[i]/m0i[j]))**1/2*(M[j]/M[i])**1/4)**2)/((8*(1+M[i]/M[j]))**1/2))
    m0+=x_in[i]*m0i[i]/b
phi = [0 for i in range(6)]
for i in range(6):
    c=0
    for k in range(len(x_in)):
        c+=x_in[k]*d_ik[k][i]
    phi[i]=sigma[i]+c
tau_m=T_in[0]/T_pcr
ro_mol=ro_in[0]/Mm_in[0] #kmol/kg
omega_m=ro_mol/ro_pcr
delta_m=0
for n in range(8):

delta_m+=C_n[n]*(phi[0]*omega_m**(phi[1])*tau_m**(phi[2]))**r_n[n]*(phi[3]*omega_m*
*phi[4]*tau_m**phi[5])**(-t_n[n])
mu=m0+(2.63094*Mm_in[0]**1/2)*Ppcr**(2/3)/(T_pcr**(1/6))*delta_m

```

## Приложение Ж – Газодинамический и теплотехнический расчет

```
P_in=7.12; %давление газа регенерации на входе в адсорбер, МПа.
P_out=7.01; %давление газа регенерации на выходе из адсорбера, МПа.
G_in=125700.00; %массовый расход входного газа регенерации, кг/ч.
G_in1=67000.00; %массовый расход входного газа регенерации, кг/ч.
G_out=132508.6; %массовый расход выходного газа регенерации, кг/ч.
L=10.4;
M_m_in=16.53;
M_m_out=17.23;
p_standart=0.101; %МПа.
T_standart=20+273.15; %градусы Цельсия.
R=8.31451; %Универсальная газовая постоянная,кДж/(кмоль*К).
T_in=288+273.15; %градусы Цельсия.
T0=0+273.15; %градусы Цельсия.
T_out=100+273.15; %градусы Цельсия.
d=4.4; %диаметр адсорбера, м.
ro_in=25.14; %плотность газа, кг/м3.
ro_out=41.43; %плотность газа, кг/м3.
%расчет порозности.
a_min=[3.4; 4.35; 3.57; 4.48; 3.6; 4.43; 4.32; 3.46; 5.19; 4.47]-0.1;
a_max=[4.4; 4.95; 4.16; 5.35; 3.39; 4.87; 4.89; 3.83; 4.35; 4.54]-0.1;
a_av=max((sum(a_min)+sum(a_max))/(2*length(a_min)));
number=357;
S_a=(3.14*(a_av/2)^2)*number;
S=(9.6*10/2)^2*3.14;
epsilon=S_a/S
%расчет скорости газа.
d_e=(1-epsilon)*d
V_in=G_in/(ro_in*3.14*(d_e/2)^2*3600) %м/с
V_in1=G_in1/(ro_in*3.14*(d_e/2)^2*3600) %м/с
V_out=G_out/(ro_out*3.14*(d_e/2)^2*3600); %м/с
%расчет плотности и вязкости газа
z_in=10^3*M_m_in*P_in/(R*T_in*ro_in);
z_out=10^3*M_m_out*P_out/(R*T_out*ro_out);
K_in=1/z_in;
K_out=1/z_out;
ro_standart=10^3*p_standart*T_in*z_in/(P_in*T_standart);
mu=1343.6493579398773*10^(-6)
%расчет режима течения газа -Re

Re=V_in*d_e*ro_in/(mu);
Re1=V_in1*d_e*ro_in/(mu);
%расчет Nu
%Nu=0.86*9
lamda=0.08; %Вт/м*К
cp=3.074; %кДж/(кг*К)
NuL=1.86*(Re*0.7)^(1/3)*(d_e/L)^(1/3)
NuL1=1.86*(Re1*0.7)^(1/3)*(d_e/L)^(1/3)
e_l=1+2*d_e/L;
```

```

e_t=1;
NuT=0.021*(Re^0.8)*(0.7)^0.43*e_t*e_l
NuT1=0.021*(Re1^0.8)*(0.7)^0.43*e_t*e_l
%расчет alpha
%alpha_1=lamda*NuT/d_e
alpha_1=818; %Вт/м2*К
alpha_11=818/1.9 %Вт/м2*К
alpha_2=7.9; %Вт/м2*К
%температуры стенок
d1=4.4;
d2=d1+0.1*2;
d3=d2+0.105*2;
d4=d3+0.002*2;
lamda1=0.38;
lamda2=80;
lamda2x=80;
lamda2xx=40;
lamda2xxx=37;
lamda2xxxx=17;
lamda3=0.31;
R11=1/(alpha_1*d1);
R120=log((d1+0.01*2)/d1)/(2*lamda1);
R121=log((d1+0.03*2)/d1)/(2*lamda1);
R122=log((d1+0.05*2)/d1)/(2*lamda1);
R123=log((d1+0.07*2)/d1)/(2*lamda1);
R124=log((d1+0.095*2)/d1)/(2*lamda1);
R125=log(d2/d1)/(2*lamda1);
R13=log(d3/d2)/(2*lamda2);
R14=log(d4/d3)/(2*lamda3);
R15=1/(alpha_2*d4);
ql=3.14*(T_in-T0)/(R11+R125+R13+R14+R15);
T_0=(T_in+T_out)/2;
Tw1=T_in-ql*R11/3.14;
Tw20=Tw1-ql*R120/3.14;
Tw21=Tw1-ql*R121/3.14;
Tw22=Tw1-ql*R122/3.14;
Tw23=Tw1-ql*R123/3.14;
Tw24=Tw1-ql*R124/3.14;
Tw25=Tw1-ql*R125/3.14;
Tw3=Tw25-ql*R13/3.14;
Tw4=Tw3-ql*R14/3.14;
T_fin=Tw4-ql*R15/3.14;
%график для распределения температуры по толщине стенки адсорбера
T_g=[T_in,Tw1,Tw20,Tw21,Tw22,Tw23,Tw24,Tw25,Tw3,Tw4,T_fin];
d_g=(d1-
0.05,d1,d1+0.01*2,d1+0.03*2,d1+0.05*2,d1+0.07*2,d1+0.095*2,d2,d3,d4,d4+0.05]-
d1)./2;
plot(d_g*1000,T_g-273.15);
grid on;
xlabel('Толщина стенки адсорбера,мм'),ylabel('Температура, C');
legend('Температура в стенке адсорбера');
%english

```

```

T_g=[T_in,Tw1,Tw20,Tw21,Tw22,Tw23,Tw24,Tw25,Tw3,Tw4,T_fin];
d_g=(d1-
0.05,d1,d1+0.01*2,d1+0.03*2,d1+0.05*2,d1+0.07*2,d1+0.095*2,d2,d3,d4,d4+0.05]-
d1)./2;
plot(d_g*1000,T_g-273.15);
grid on;
xlabel('Thickness of adsorber tank,mm'),ylabel('Temperature, C');
legend('Temperature of tank wall');
%расчет температуры стали в зависимости от толщины изоляции
R1x=1/(alpha_1*d1);
for i=1:1:40
    dx(i)=[d1+2*i/100];
    R12x(i)=log(dx(i)/d1)/(2*lamda1);
    R13x(i)=log((dx(i)+0.105*2)/dx(i))/(2*lamda2x);
    R13xx(i)=log((dx(i)+0.105*2)/dx(i))/(2*lamda2xx);
    R13xxx(i)=log((dx(i)+0.105*2)/dx(i))/(2*lamda2xxx);
    R13xxxx(i)=log((dx(i)+0.105*2)/dx(i))/(2*lamda2xxxx);
    R14x(i)=log((dx(i)+0.105*2+2*0.002)/(dx(i)+0.105*2))/(2*lamda3);
    R15x(i)=1/(alpha_2*(dx(i)+0.105*2+2*0.002));
    ql(i)=3.14*(T_in-T0)/(R1x+R12x(i)+R13x(i)+R14x(i)+R15x(i));
    qlx(i)=3.14*(T_in-T0)/(R1x+R12x(i)+R13xx(i)+R14x(i)+R15x(i));
    qlxx(i)=3.14*(T_in-T0)/(R1x+R12x(i)+R13xxx(i)+R14x(i)+R15x(i));
    qlxxx(i)=3.14*(T_in-T0)/(R1x+R12x(i)+R13xxxx(i)+R14x(i)+R15x(i));
    Twx(i)=T_in-ql(i)*(R1+R12x(i))/3.14;
    Toutx(i)=T_in-qlx(i)*(R1+R12x(i)+R13x(i))/3.14;
    Toutxx(i)=T_in-qlxx(i)*(R1+R12x(i)+R13xx(i))/3.14;
    Toutxxx(i)=T_in-qlxxx(i)*(R1+R12x(i)+R13xxx(i))/3.14;
    Toutxxxx(i)=T_in-qlxxxx(i)*(R1+R12x(i)+R13xxxx(i))/3.14;
end
%график для температуры стали в зависимости от толщины изоляции
figure
plot((dx-d1)./2*1000,Twx-273.15);
grid on;
xlabel('Толщина изоляции,мм'),ylabel('Температура, C');
legend('Температура металла стенки адсорбера');
%внешняя температура стали
figure
plot((dx-d1)./2*1000,Toutx-273.15,(dx-d1)./2*1000,Toutxx-273.15,(dx-
d1)./2*1000,Toutxxx-273.15,(dx-d1)./2*1000,Toutxxxx-273.15);
grid on;
xlabel('Толщина изоляции,мм'),ylabel('Температура, C');
legend('09Г2С','SA-533M','15X5H','AISI 304SS');
%english
figure
plot((dx-d1)./2*1000,Twx-273.15);
grid on;
xlabel('Insulation thickness,mm'),ylabel('Temperature, C');
legend('Temperature of tank wall');
%english
figure

```

```

plot((dx-d1)./2*1000,Toutx-273.15,(dx-d1)./2*1000,Toutxx-273.15,(dx-
d1)./2*1000,Toutxx-273.15,(dx-d1)./2*1000,Toutxxxx-273.15);
grid on;
xlabel('Insulation,мм'),ylabel('Temperature, C');
legend('09G2S','SA-533M','15H5M','AISI 304SS');
%расчет температуры стали в зависимости от толщины изоляции
figure
plot((dx-d1)./2*1000,qi*L);
grid on;
xlabel('Insulation thickness,mm'),ylabel('Heat flow');
legend('Heat flow through the tank wall');
%расчет температуры стали в зависимости от толщины изоляции

```

### Приложение 3 – Прочностной расчет адсорбера с $D_{вн}=4.4$ м и $P=9.7$ МПа

```
Din=4.4; %внутренний диаметр, м
L=10; %длина цилиндрической обечайки, м
H=0.9*Din; %высота жидкости в расчете (при необходимости)
P=9.7*10^6; %расчетное давление, Па
Pout=0.11*10^6; %атмосферное давление снаружи аппарата, Па
P_G=0; %гидравлическое давление
t=(94+273.15);%температура внутри, К
nv=2.4;
phi=0.95;
c1=1; %мм
c2=0.5; %мм
ro_s=650; %плотность сорбента, кг/м3
ro_Me=7850; %плотность металла, кг/м3
%Для графиков
%НАЧАЛО РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ
SR1x=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma09G2C(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma09G2C(20+273.15)-Pout)))*1000
s_1x=SR1x+c1+c2
SR1xx=max(P_R*Din*(2*phi*SigmaSA_533M(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*SigmaSA_533M(20+273.15)-Pout)))*1000
s_1xx=SR1xx+c1+c2
SR1xxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma15H5M(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma15H5M(20+273.15)-Pout)))*1000
s_1xxx=SR1xxx+c1+c2
SR1xxxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma304SS(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma304SS(20+273.15)-Pout)))*1000
s_1xxxx=SR1xxxx+c1+c2

figure
plot((dx-d1)./2*1000,s_1x,(dx-d1)./2*1000,s_1xx,(dx-d1)./2*1000,s_1xxx,(dx-
d1)./2*1000,s_1xxxx);
grid on
xlabel('Толщина изоляции,мм');
ylabel('Толщина стенки обечайки, мм');
%ylim([90 180])
legend('Для стали 09Г2С','Для стали SA-533M','Для стали 15Х5М','Для стали
304SS');
%english
figure
plot((dx-d1)./2*1000,s_1x,(dx-d1)./2*1000,s_1xx,(dx-d1)./2*1000,s_1xxx,(dx-
d1)./2*1000,s_1xxxx);
grid on
xlabel('Insulation thickness,mm');
ylabel('Thickness of shell wall, mm');
%ylim([90 180])
legend('09G2S','SA-533M','15H5M','304SS');
%НАЧАЛО РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ДНИЩА
```

```

s_2px=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma09G2C(Twx)-0.5*P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*SigmaSA_533M(20+273.15)-0.5*Pout)))*1000
s_2x=s_2px+c1+c2
s_2pxx=max(P_R*Din*(2*phi*SigmaSA_533M(Twx)-0.5*P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*SigmaSA_533M(20+273.15)-0.5*Pout)))*1000
s_2xx=s_2pxx+c1+c2
s_2pxxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma15H5M(Twx)-0.5*P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma15H5M(20+273.15)-0.5*Pout)))*1000
s_2xxx=s_2pxxx+c1+c2
s_2pxxxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma304SS(Twx)-0.5*P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma304SS(20+273.15)-0.5*Pout)))*1000
s_2xxxx=s_2pxxxx+c1+c2

```

### %НАЧАЛО РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ КРЫШКИ

```

s_3rx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma09G2C(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*SigmaSA_533M(20+273.15)-Pout)))*1000
s_3x=s_3rx+c1+c2
s_3rxx=max(P_R*Din*(2*phi*SigmaSA_533M(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*SigmaSA_533M(20+273.15)-Pout)))*1000
s_3xx=s_3rxx+c1+c2
s_3rxxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma15H5M(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma15H5M(20+273.15)-Pout)))*1000
s_3xxx=s_3rxxx+c1+c2
s_3rxxxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma304SS(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma304SS(20+273.15)-Pout)))*1000
s_3xxxx=s_3rxxxx+c1+c2

```

### %НАЧАЛО РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ в зависимости от давления

```

for i=1:1:40
    Pdiff(i)=i/40*P_R;
    for j=1:1:40
        SR1prex(i,j)=(Pdiff(i)*Din*(2*phi*Sigma09G2C(Twx(41-j))-Pdiff(i)).^(-1))*1000;
        s_1prex(i,j)=SR1prex(i,j)+c1+c2;
        SR1prexx(i,j)=(Pdiff(i)*Din*(2*phi*SigmaSA_533M(Twx(41-j))-Pdiff(i)).^(-1))*1000;
        s_1prexx(i,j)=SR1prexx(i,j)+c1+c2;
        SR1prexxx(i,j)=(Pdiff(i)*Din*(2*phi*Sigma15H5M(Twx(41-j))-Pdiff(i)).^(-1))*1000;
        s_1prexxx(i,j)=SR1prexxx(i,j)+c1+c2;
        SR1prexxxx(i,j)=(Pdiff(i)*Din*(2*phi*Sigma304SS(Twx(41-j))-Pdiff(i)).^(-1))*1000;
        s_1prexxxx(i,j)=SR1prexxxx(i,j)+c1+c2;
    end
end
figure
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prex)
xlabel('Расчетная температура, C');
ylabel('Давление,МПа');
zlabel('Толщина стенки обечайки, мм');
legend('Для стали 09Г2С')

figure
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexx)
xlabel('Расчетная температура, C');
ylabel('Давление,МПа');

```

```
zlabel('Толщина стенки обечайки, мм');  
legend('Для стали SA-533M')
```

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexxx)  
xlabel('Расчетная температура, C');  
ylabel('Давление,МПа');  
zlabel('Толщина стенки обечайки, мм');  
legend('Для стали 15X5M')
```

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexxx)  
xlabel('Расчетная температура, C');  
ylabel('Давление,МПа');  
zlabel('Толщина стенки обечайки, мм');  
legend('Для стали 304SS')
```

**%english**

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prex)  
xlabel('Calculation temperature, C');  
ylabel('Pressure,MPa');  
zlabel('Thickness of shell wall, mm');  
legend('09G2S')
```

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexx)  
xlabel('Calculation temperature, C');  
ylabel('Pressure,MPa');  
zlabel('Thickness of shell wall, mm');  
legend('SA-533M')
```

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexxx)  
xlabel('Calculation temperature, C');  
ylabel('Pressure,MPa');  
zlabel('Thickness of shell wall, mm');  
legend('15H5M')
```

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexxx)  
xlabel('Calculation temperature, C');  
ylabel('Pressure,MPa');  
zlabel('Thickness of shell wall, mm');  
legend('304SS')
```

## Приложение К – Прочностной расчет адсорбера с $D_{вн}=3.6$ м и $P=9.7$ МПа

```
Din=3.62; %внутренний диаметр, м
L=10.4; %длина цилиндрической обечайки, м
H=0.9*Din; %высота жидкости в расчете (при необходимости)
P_R=9.7*10^6 %расчетное давление, Па
Pout=0.11*10^6 %атмосферное давление снаружи аппарата, Па
P_G=0 %гидравлическое давление
t=(94+273.15)%температура внутри, К
nv=2.4
phi=0.95
c1=1 %ммс2=0.5 %мм
c2=0.5; %мм
ro_s=650 %плотность сорбента, кг/м3
ro_Me=7850 %плотность металла, кг/м3
%Dля графиков
%НАЧАЛО РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ
SR1x=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma09G2C(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma09G2C(20+273.15)-Pout)))*1000
s_1x=SR1x+c1+c2
SR1xx=max(P_R*Din*(2*phi*SigmaSA_533M(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*SigmaSA_533M(20+273.15)-Pout)))*1000
s_1xx=SR1xx+c1+c2
SR1xxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma15H5M(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma15H5M(20+273.15)-Pout)))*1000
s_1xxx=SR1xxx+c1+c2
SR1xxxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma304SS(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma304SS(20+273.15)-Pout)))*1000
s_1xxxx=SR1xxxx+c1+c2

figure
plot((dx-d1)./2*1000,s_1x,(dx-d1)./2*1000,s_1xx,(dx-d1)./2*1000,s_1xxx,(dx-
d1)./2*1000,s_1xxxx);
grid on
xlabel('Толщина изоляции,мм');
ylabel('Толщина стенки обечайки, мм');
%ylim([90 180])
legend('Для стали 09Г2С','Для стали SA-533M','Для стали 15Х5М','Для стали
304SS');
%english
figure
plot((dx-d1)./2*1000,s_1x,(dx-d1)./2*1000,s_1xx,(dx-d1)./2*1000,s_1xxx,(dx-
d1)./2*1000,s_1xxxx);
grid on
xlabel('Insulation thickness,mm');
ylabel('Thickness of shell wall, mm');
%ylim([90 180])
legend('09G2S','SA-533M','15H5M','304SS');
%НАЧАЛО РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ДНИЩА
```

```

s_2px=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma09G2C(Twx)-0.5*P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*SigmaSA_533M(20+273.15)-0.5*Pout)))*1000
s_2x=s_2px+c1+c2
s_2pxx=max(P_R*Din*(2*phi*SigmaSA_533M(Twx)-0.5*P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*SigmaSA_533M(20+273.15)-0.5*Pout)))*1000
s_2xx=s_2pxx+c1+c2
s_2pxxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma15H5M(Twx)-0.5*P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma15H5M(20+273.15)-0.5*Pout)))*1000
s_2xxx=s_2pxxx+c1+c2
s_2pxxxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma304SS(Twx)-0.5*P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma304SS(20+273.15)-0.5*Pout)))*1000
s_2xxxx=s_2pxxxx+c1+c2

```

### %НАЧАЛО РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ КРЫШКИ

```

s_3rx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma09G2C(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*SigmaSA_533M(20+273.15)-Pout)))*1000
s_3x=s_3rx+c1+c2
s_3rxx=max(P_R*Din*(2*phi*SigmaSA_533M(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*SigmaSA_533M(20+273.15)-Pout)))*1000
s_3xx=s_3rxx+c1+c2
s_3rxxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma15H5M(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma15H5M(20+273.15)-Pout)))*1000
s_3xxx=s_3rxxx+c1+c2
s_3rxxxx=max(P_R*Din*(2*phi*Sigma304SS(Twx)-P_R).^(-
1),(Pout*Din/(2*phi*Sigma304SS(20+273.15)-Pout)))*1000
s_3xxxx=s_3rxxxx+c1+c2

```

### %НАЧАЛО РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ в зависимости от давления

```

for i=1:1:40
    Pdiff(i)=i/40*P_R;
    for j=1:1:40
        SR1prex(i,j)=(Pdiff(i)*Din*(2*phi*Sigma09G2C(Twx(41-j))-Pdiff(i)).^(-1))*1000;
        s_1prex(i,j)=SR1prex(i,j)+c1+c2;
        SR1prexx(i,j)=(Pdiff(i)*Din*(2*phi*SigmaSA_533M(Twx(41-j))-Pdiff(i)).^(-1))*1000;
        s_1prexx(i,j)=SR1prexx(i,j)+c1+c2;
        SR1prexxx(i,j)=(Pdiff(i)*Din*(2*phi*Sigma15H5M(Twx(41-j))-Pdiff(i)).^(-1))*1000;
        s_1prexxx(i,j)=SR1prexxx(i,j)+c1+c2;
        SR1prexxxx(i,j)=(Pdiff(i)*Din*(2*phi*Sigma304SS(Twx(41-j))-Pdiff(i)).^(-1))*1000;
        s_1prexxxx(i,j)=SR1prexxxx(i,j)+c1+c2;
    end
end
figure
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prex)
xlabel('Расчетная температура, C');
ylabel('Давление,МПа');
zlabel('Толщина стенки обечайки, мм');
legend('Для стали 09Г2С')

figure
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexx)
xlabel('Расчетная температура, C');
ylabel('Давление,МПа');

```

```
zlabel('Толщина стенки обечайки, мм');  
legend('Для стали SA-533M')
```

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexxx)  
xlabel('Расчетная температура, C');  
ylabel('Давление,МПа');  
zlabel('Толщина стенки обечайки, мм');  
legend('Для стали 15X5M')
```

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexxx)  
xlabel('Расчетная температура, C');  
ylabel('Давление,МПа');  
zlabel('Толщина стенки обечайки, мм');  
legend('Для стали 304SS')
```

**%english**

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prex)  
xlabel('Calculation temperature, C');  
ylabel('Pressure,MPa');  
zlabel('Thickness of shell wall, mm');  
legend('09G2S')
```

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexx)  
xlabel('Calculation temperature, C');  
ylabel('Pressure,MPa');  
zlabel('Thickness of shell wall, mm');  
legend('SA-533M')
```

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexxx)  
xlabel('Calculation temperature, C');  
ylabel('Pressure,MPa');  
zlabel('Thickness of shell wall, mm');  
legend('15H5M')
```

```
figure  
mesh(sort(Twx)-273.15,Pdiff./10^6,s_1prexxx)  
xlabel('Calculation temperature, C');  
ylabel('Pressure,MPa');  
zlabel('Thickness of shell wall, mm');  
legend('304SS')
```

## Приложение Л – Экономический расчет адсорберов

%для адсорбера с Din=4.4 м

```
ti=(dx-4.4)/2;
tmx=s_1x/1000;
tmxKR=s_2x/1000;
tmxDN=s_3x/1000;
tmxx=s_1xx/1000;
tmxxKR=s_2xx/1000;
tmxxDN=s_3xx/1000;
tmxxx=s_1xxx/1000;
tmxxxKR=s_2xxx/1000;
tmxxxDN=s_3xxx/1000;
tmxxxx=s_1xxxx/1000;
tmxxxxKR=s_2xxxx/1000;
tmxxxxDN=s_3xxxx/1000;
Dinx=4.4;
Hp=Dinx/2;
V1x=3.14/4*L*(((Dinx+2*(ti+tmx)).^2)-(Dinx+2*ti).^2);
V2x=2/3*3.14*((Dinx/2+ti+tmxKR).^3-(Dinx/2+ti).^3);
V1xx=3.14/4*L*(((Dinx+2*(ti+tmxx)).^2)-(Dinx+2*ti).^2);
V2xx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxKR).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxKR).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2);
V3xx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxDN).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxDN).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2);
V1xxx=3.14/4*L*(((Dinx+2*(ti+tmxxx)).^2)-(Dinx+2*ti).^2);
V2xxx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxxKR).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxxKR).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2);
V3xxx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxxDN).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxxDN).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2);
V1xxxx=3.14/4*L*(((Dinx+2*(ti+tmxxxx)).^2)-(Dinx+2*ti).^2);
V2xxxx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxxxKR).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxxxKR).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2);
V3xxxx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxxxDN).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxxxDN).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2);
Mx=7850*(V1x+2*V2x)/1000;
Mxx=7750*(V1xx+V2xx+V3xx)/1000;
Mxxx=7750*(V1xxx+V2xxx+V3xxx)/1000;
Mxxxx=7850*(V1xxxx+V2xxxx+V3xxxx)/1000;
Ud_Costx=44;
Ud_Costxx=207.9;
Ud_Costxxx=170;
Ud_Costxxxx=270;
Kt=2.5;
Kc=2;
Ksumm=9;
Costx=Mx.*(Ud_Costx*(Kt+Kc+Ksumm)).*1000;
Costxx=Mxx.*(Ud_Costxx*(Kt+Kc+Ksumm)).*1000;
Costxxx=Mxxx.*(Ud_Costxxx*(Kt+Kc+Ksumm)).*1000;
```

```
Costxxxx=Mxxxx.*(Ud_Costxxxx*(Kt+Kc+Ksumm)).*1000;
```

```
figure  
plot(s_1x,Mx,s_1x,Mxx);  
grid on  
xlabel('Толщина стенки,мм');  
ylabel('Масса адсорбера, т');  
%ylim([50,160])  
legend('Для стали 09Г2С','Для стали SA-533M');
```

```
figure  
plot(ti,Mx,ti,Mxx,ti,Mxxx,ti,Mxxxx);  
grid on  
xlabel('Толщина изоляции,мм');  
ylabel('Масса адсорбера, т');  
%ylim([120,230])  
legend('Для стали 09Г2С','Для стали SA-533M','Для стали 15Х5М','Для стали AISI 304SS');
```

```
figure  
plot(ti,Mx,ti,Mxx,ti,Mxxx,ti,Mxxxx);  
grid on  
xlabel('Толщина изоляции,мм');  
ylabel('Масса адсорбера, т');  
%ylim([120,230])  
legend('Для стали 09Г2С','Для стали SA-533M','Для стали 15Х5М','Для стали AISI 304SS');
```

```
%english  
figure  
plot(ti,Mx,ti,Mxx,ti,Mxxx,ti,Mxxxx);  
grid on  
xlabel('Insulation thickness,mm');  
ylabel('Tank mass, tonn');  
%ylim([120,230])  
legend('09G2S','SA-533M','15H5M','AISI 304SS');
```

```
figure  
plot(Mx,Costx./10^6,Mxx,Costxx./10^6,Mxxx,Costxxx./10^6,Mxxxx,Costxxxx./10^6);  
grid on  
xlabel('Tank mass, tonn');  
ylabel('Estimated cost, million rubles');  
legend('09G2S','SA-533M','15H5M','AISI 304SS');
```

%для адсорбера с Din=3.6 м

```
ti=(dx-4.4)./2;  
tmx=s_1x/1000;  
tmxKR=s_2x/1000;  
tmxDN=s_3x/1000;  
tmxx=s_1xx/1000;  
tmxxKR=s_2xx/1000;
```

```

tmxxDN=s_3xx/1000;
tmxxx=s_1xxx/1000;
tmxxxKR=s_2xxx/1000;
tmxxxDN=s_3xxx/1000;
tmxxxx=s_1xxxx/1000;
tmxxxxKR=s_2xxxx/1000;
tmxxxxDN=s_3xxxx/1000;
Dinx=3.6;
Hp=Dinx/2;

V1x=3.14/4*L*(((Dinx+2*(ti+tmx)).^2)-(Dinx+2*ti).^2);
V2x=2/3*3.14*((Dinx/2+ti+tmxKR).^3-(Dinx/2+ti).^3)
V1xx=3.14/4*L*(((Dinx+2*(ti+tmxx)).^2)-(Dinx+2*ti).^2);
V2xx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxKR).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxKR).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2)
V3xx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxDN).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxDN).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2)
V1xxx=3.14/4*L*(((Dinx+2*(ti+tmxxx)).^2)-(Dinx+2*ti).^2);
V2xxx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxxKR).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxxKR).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2)
V3xxx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxxDN).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxxDN).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2)
V1xxxx=3.14/4*L*(((Dinx+2*(ti+tmxxxx)).^2)-(Dinx+2*ti).^2);
V2xxxx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxxxKR).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxxxKR).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2)
V3xxxx=3.14/6*Hp*(((Hp+ti+tmxxxxDN).^2)+3/4*(Dinx+ti+tmxxxxDN).^2)-
(((Hp+ti).^2)+3/4*(Dinx+ti).^2)
Mx=7850*(V1x+2*V2x)./1000
Mxx=7750*(V1xx+V2xx+V3xx)./1000
Mxxx=7750*(V1xxx+V2xxx+V3xxx)./1000
Mxxxx=7850*(V1xxxx+V2xxxx+V3xxxx)./1000
Ud_Costx=44;
Ud_Costxx=207.9;
Ud_Costxxx=170;
Ud_Costxxxx=270;
Kt=2.5;
Kc=2;
Ksumm=9;
Costx=Mx.*(Ud_Costx*(Kt+Kc+Ksumm)).*1000;
Costxx=Mxx.*(Ud_Costxx*(Kt+Kc+Ksumm)).*1000;
Costxxx=Mxxx.*(Ud_Costxxx*(Kt+Kc+Ksumm)).*1000;
Costxxxx=Mxxxx.*(Ud_Costxxxx*(Kt+Kc+Ksumm)).*1000;

```

```

figure
plot(s_1x,Mx,s_1x,Mxx);
grid on
xlabel('Толщина стенки,мм');
ylabel('Масса адсорбера, т');
%ylim([50,160])
legend('Для стали 09Г2С','Для стали SA-533M');

```

figure

```

plot(ti,Mx,ti,Mxx,ti,Mxxx,ti,Mxxxx);
grid on
xlabel('Толщина изоляции,мм');
ylabel('Масса адсорбера, т');
%ylim([120,230])
legend('Для стали 09Г2С','Для стали SA-533M','Для стали 15Х5М','Для стали AISI
304SS');

```

```

figure
plot(Mx,Costx./10^6,Mxx,Costxx./10^6,Mxxx,Costxxx./10^6,Mxxxx,Costxxxx./10^6);
grid on
xlabel('Масса адсорбера, т');
ylabel('Стоимость, млн.рублей');
legend('Для стали 09Г2С','Для стали SA-533M','Для стали 15Х5М','Для стали AISI
304SS');

```

```

%english
figure
plot(ti,Mx,ti,Mxx,ti,Mxxx,ti,Mxxxx);
grid on
xlabel('Insulation thickness,mm');
ylabel('Tank mass, tonn');
%ylim([120,230])
legend('09G2S','SA-533M','15H5M','AISI 304SS');

```

```

figure
plot(Mx,Costx./10^6,Mxx,Costxx./10^6,Mxxx,Costxxx./10^6,Mxxxx,Costxxxx./10^6);
grid on
xlabel('Tank mass, tonn');
ylabel('Estimated cost, million rubles');
legend('09G2S','SA-533M','15H5M','AISI 304SS');

```

## ПРИЛОЖЕНИЕ М

Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке

### RESULTS AND DISCUSSION

Студент

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
2БМ5Б	Дедеев Павел Олегович		

Консультант кафедры ТХНГ

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Профессор	Харламов Сергей Николаевич	д.ф.-м.н, профессор		

Консультант-лингвист

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Коротченко Татьяна Валериевна	К.ф.н.		

## 5.1 Temperature analysis of tank wall

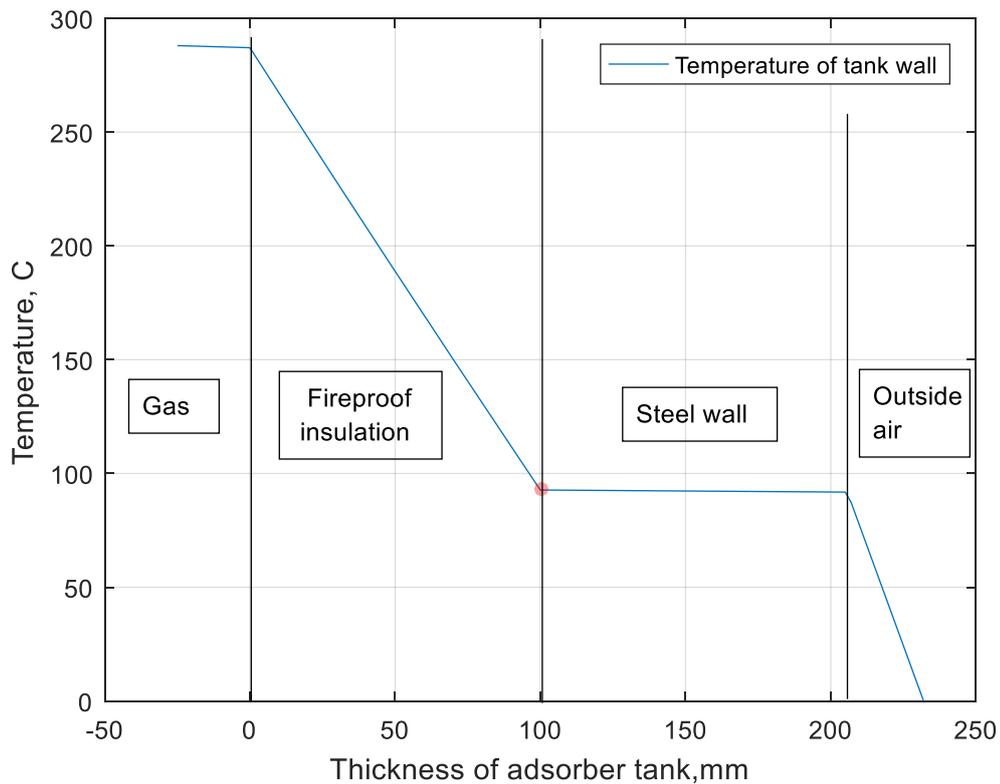


Figure 5.1 – Temperature of tank wall ( $h_{\phi}=100$  mm).

Figure 5.1 does not show temperature to be **logarithmically** dependent on the thickness of tank wall due to the fact that the ratio of diameters did not exceed 2, so the dependence is linear. Nevertheless, the logarithmic dependence is observed when the thickness of insulation is changed, which is proved with Figure 5.2 in Section 5.2.

There is a significant temperature decrease at the junction point of fireproof insulation and steel wall. For example, temperature drops from  $280^{\circ}\text{C}$  to  $94^{\circ}\text{C}$  for an insulation thickness of 100 mm. According to GOST R 51274-99, it is possible to use the calculated temperature value ( $94^{\circ}\text{C}$ ) for the following strength analysis.

### 5.2 ‘Temperature vs insulation thickness’ analysis

The increase of insulation thickness from 10 mm to 400 mm causes the logarithmic decrease of the temperature in the joint point of fireproof insulation and steel wall. The most significant temperature drop is observed for interval of insulation thickness from 10 to 100 mm. In the interval from 100 mm to 400 mm temperature is slightly sloping. The further increase of the insulation thickness causes an asymptotic decrease of inner temperature until it reaches the value of outside one.

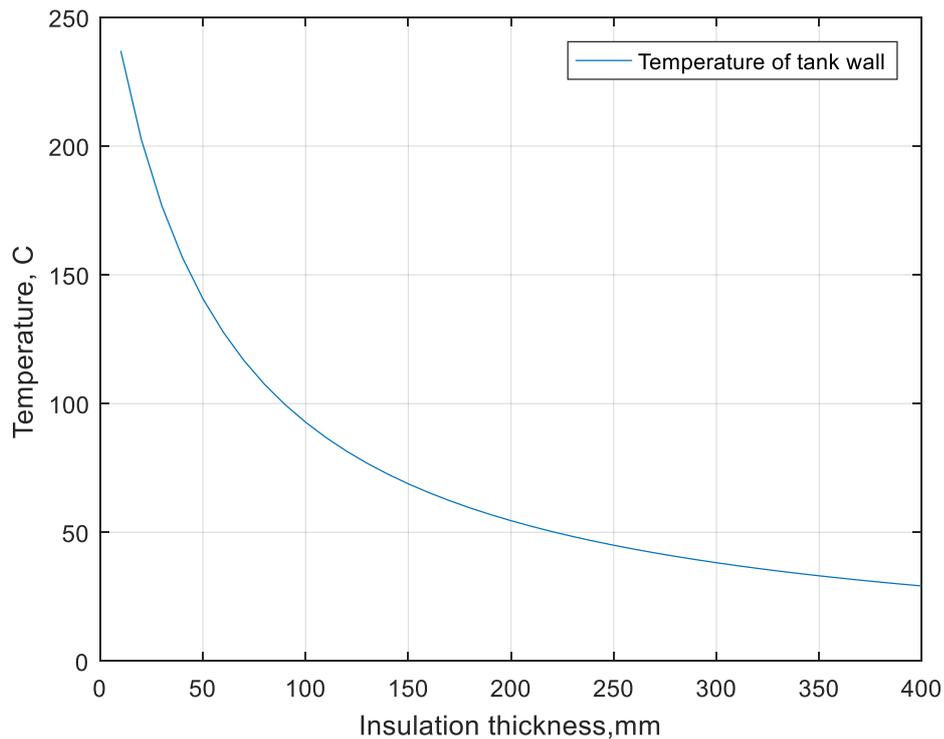


Figure 5.2 –Temperature of joint point “Fire insulation-Steel wall” as a function of insulation thickness

The preferable (so called ‘critical’) insulation thickness is determined with the requirements for the outside tank temperature. According to the recommendations of SP 61.13330.2012 "Thermal insulation of equipment and pipelines. Updated version of SNiP 41-03-2003 ", the external wall temperature should not exceed the value of 75 ° C. According to the graph in Figure 5.2, the preferable external wall temperature of 75 ° corresponds to the interval of insulation thickness 100 ÷ 120 mm.

### 5.3 Thickness of steel wall as a function of pressure, temperature and types of steel

Initial calculation values consist of pressure interval, which is from 0 to 100 bar, and temperature interval from 0 to 260°C. Taken values allow calculating wall thickness as a function of pressure and temperature.

Figure 5.3 proves that pressure affects wall thickness more significantly in comparison with temperature. However, it is worth noting that the increasing pressure influences temperature effect on wall thickness. For example, Figure 5.4 shows, that the thickness corresponding to the pressure of 6 MPa has much narrower distribution of temperatures in comparison with the thickness at the pressure of 10 MPa.

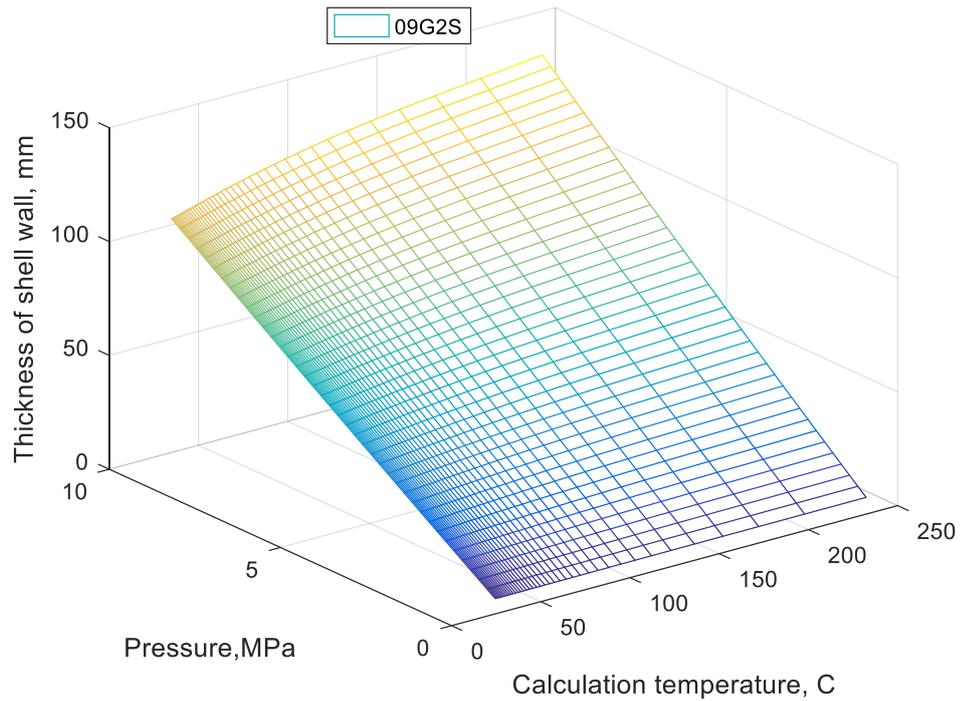


Figure 5.3 – 3D-plot “Thickness of shell wall vs Temperature vs Pressure” for tank option  $D_{in}=3,6$  m and steel 09G2S

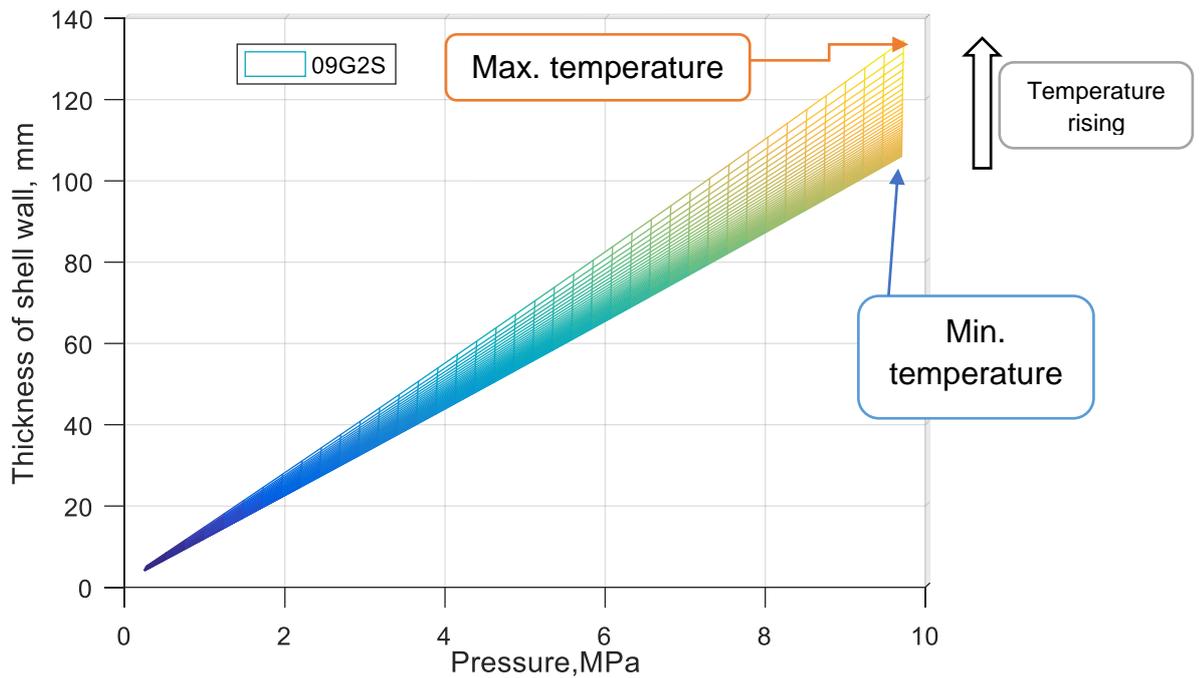


Figure 5.4 – ‘Thickness vs Pressure’ analysis in range of the whole spectrum of temperatures for tank option  $D_{in}=3,6$  m and steel 09G2S.

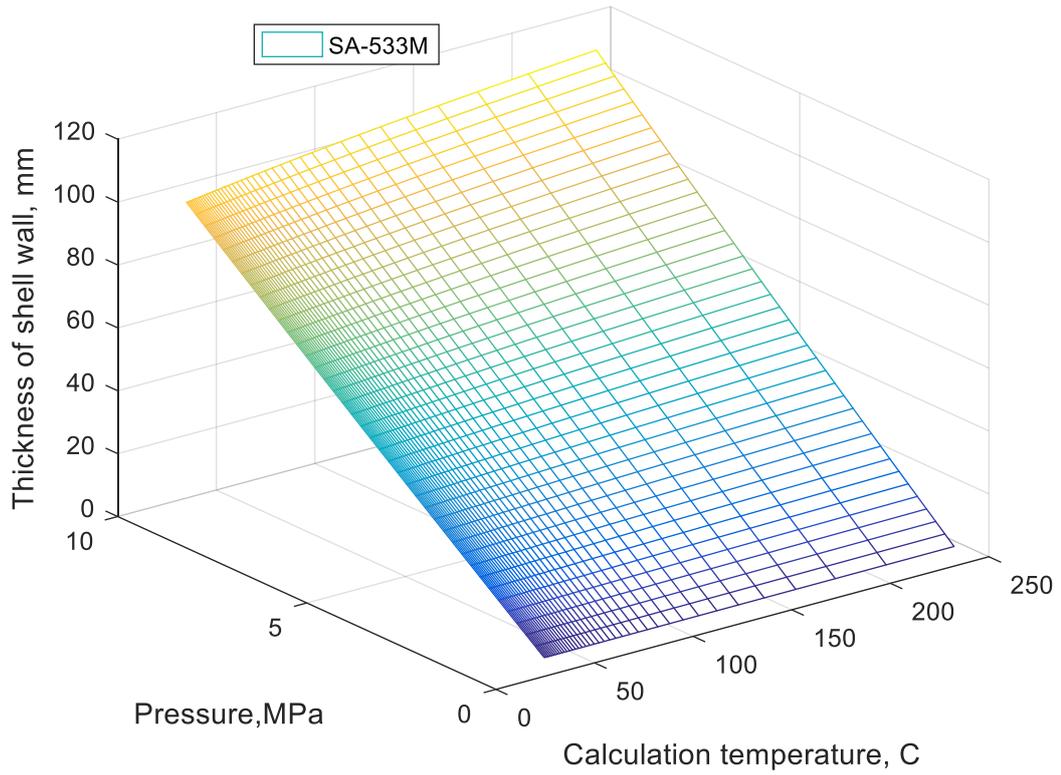


Figure 5.5 – 3D-plot “Thickness of shell wall vs Temperature vs Pressure” for tank option  $D_{in}=3,6$  m and steel SA-533M

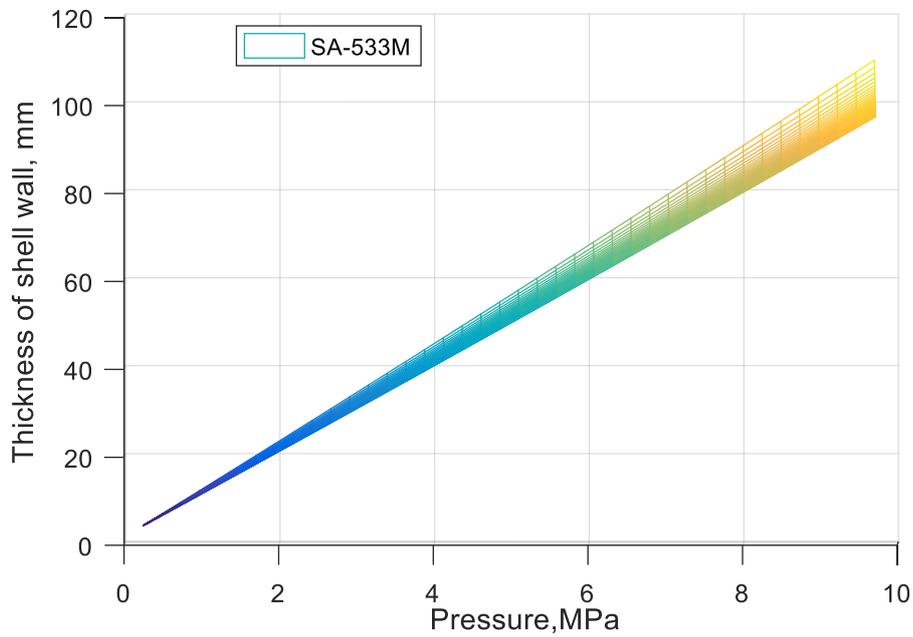


Figure 5.6 – Thickness vs Pressure analysis in range of the whole spectrum of temperatures for tank option  $D_{in}=3,6$  m and steel SA-533M.

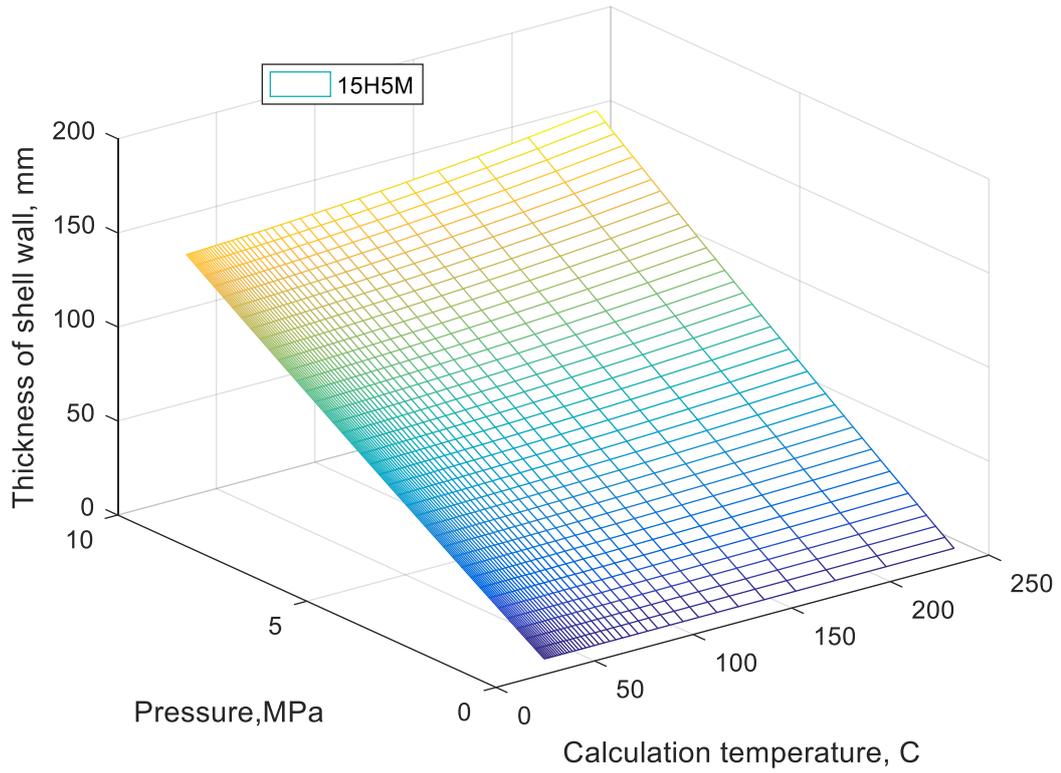


Figure 5.5 – 3D-plot “Thickness of shell wall vs Temperature vs Pressure” for tank option  $D_{in}=3,6$  m and steel 15H5M

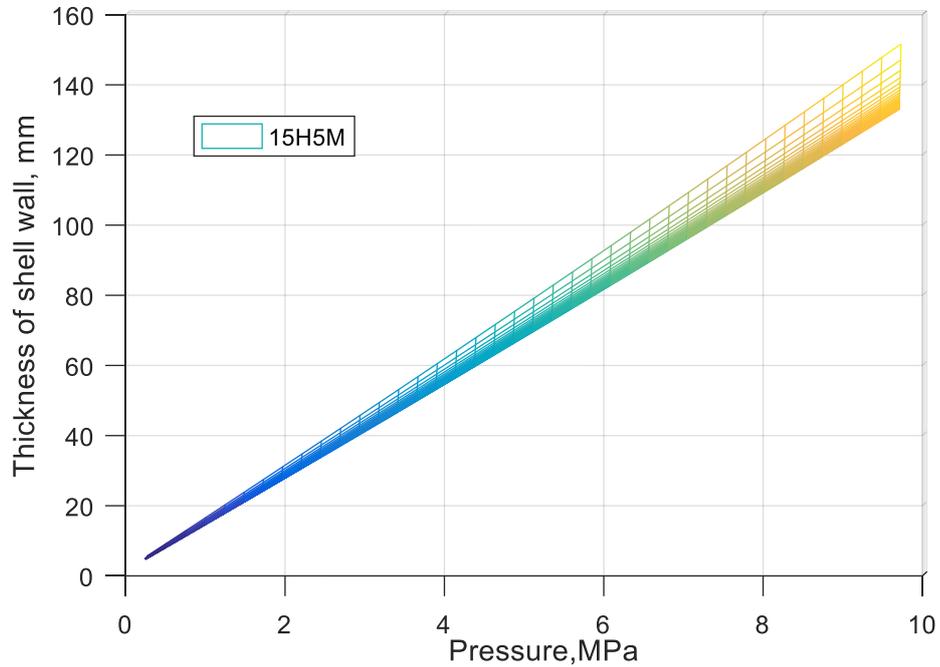


Figure 5.6 – ‘Thickness vs Pressure’ analysis in range of the whole spectrum of temperatures for tank option  $D_{in}=3,6$  m and steel 15H5M

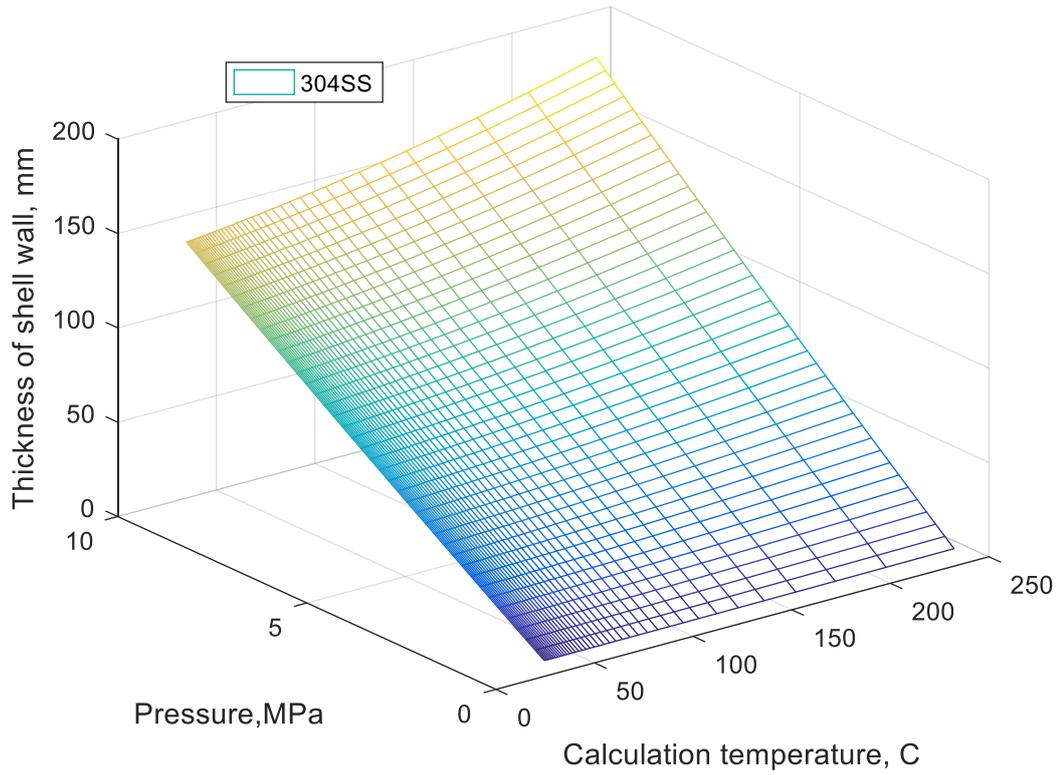


Figure 5.5 – 3D-plot “Thickness of shell wall vs Temperature vs Pressure” for tank option  $D_{in}=3,6$  m and steel AISI 304SS

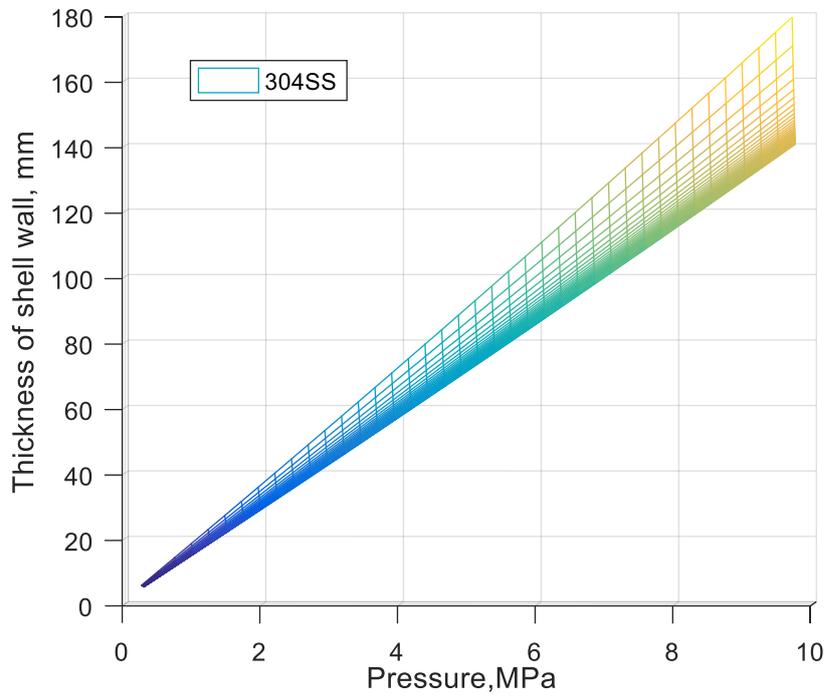


Figure 5.6 – ‘Thickness vs Pressure’ analysis in range of the whole spectrum of temperatures for tank option  $D_{in}=3,6$  m and steel AISI 304SS.

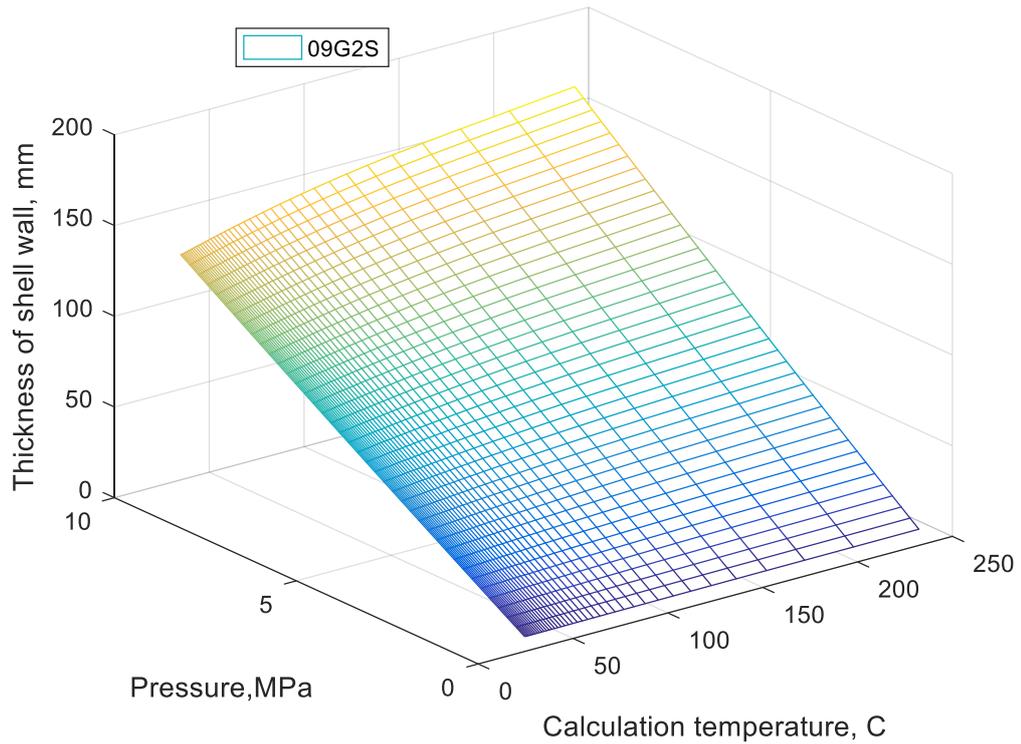


Figure 5.7 – 3D-plot “Thickness of shell wall vs Temperature vs Pressure” for tank option  $D_{in}=4,4$  and steel 09G2S

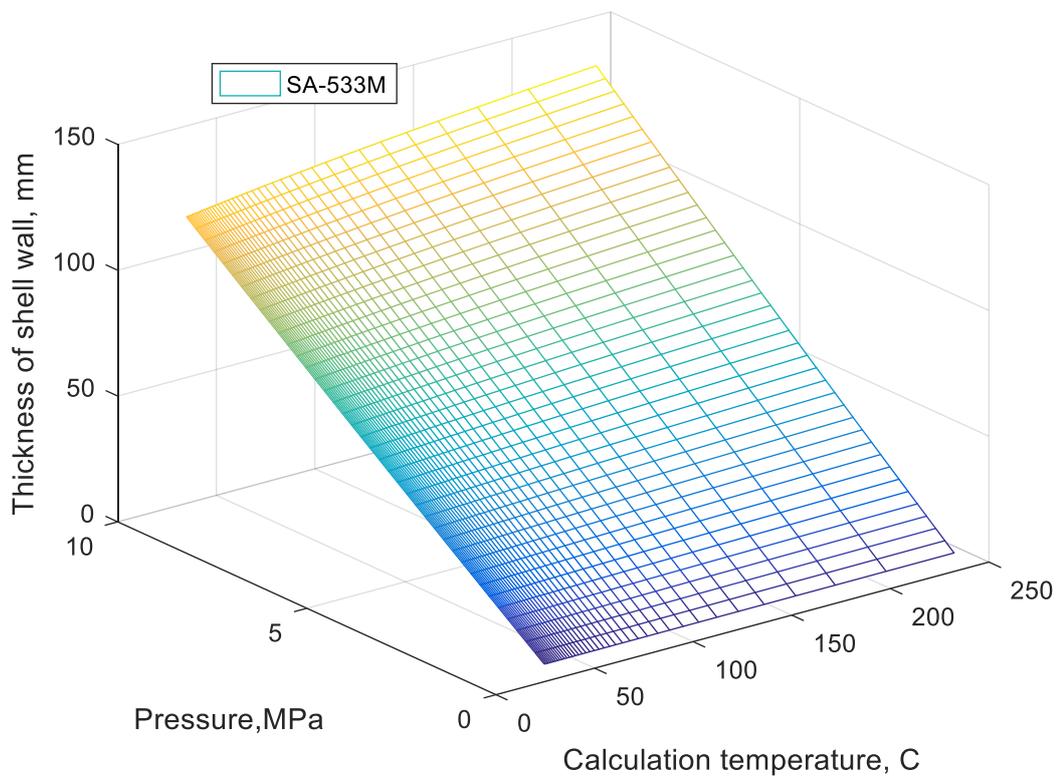


Figure 5.8 – 3D-plot “Thickness of shell wall vs Temperature vs Pressure” for tank option  $D_{in}=4,4$  and steel SA-533M

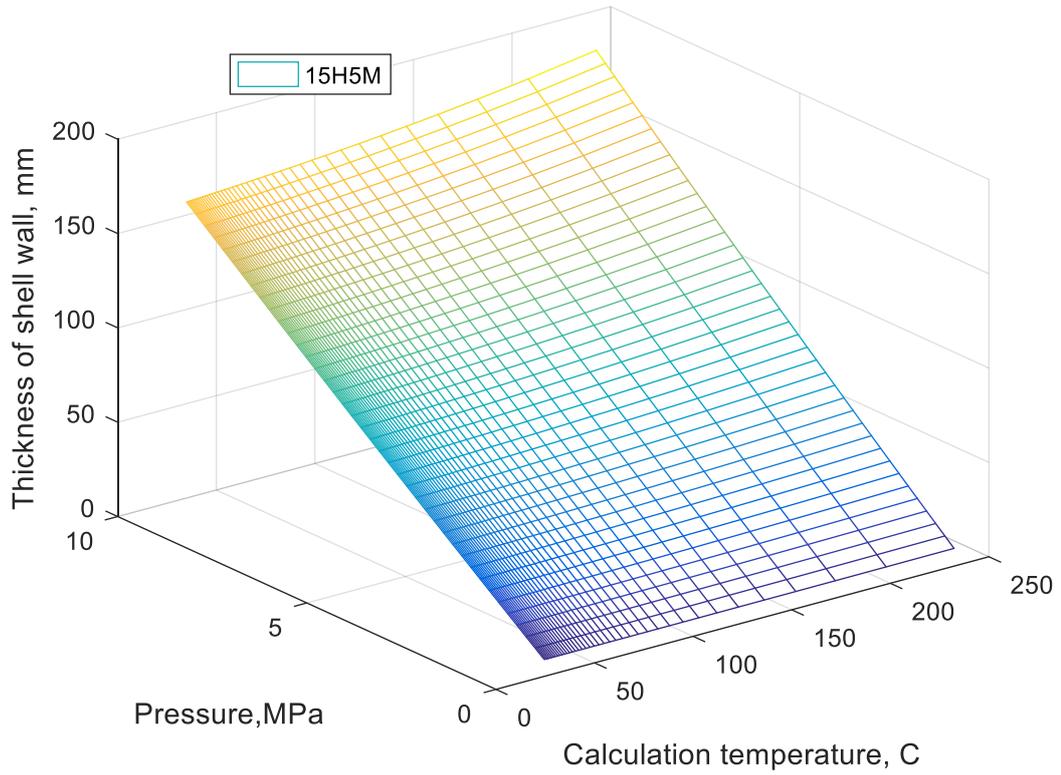


Figure 5.8 – 3D-plot “Thickness of shell wall vs Temperature vs Pressure” for tank option  $D_{in}=4,4$  and steel 15H5M

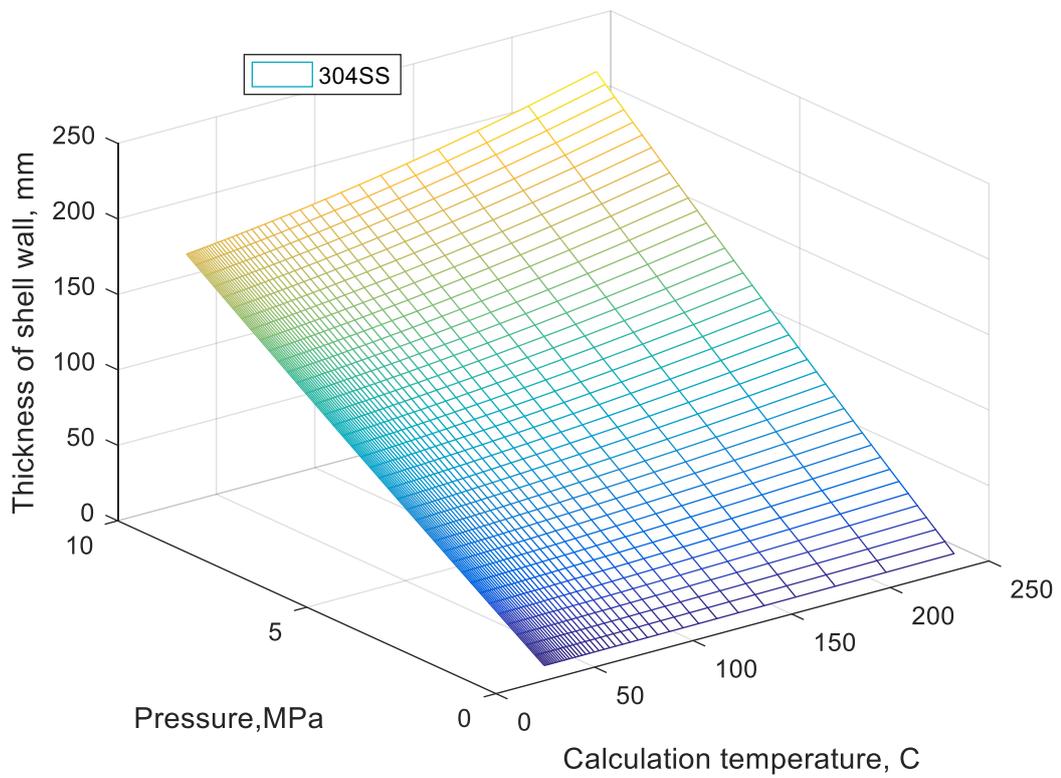


Figure 5.8 – 3D-plot “Thickness of shell wall vs Temperature vs Pressure” for tank option  $D_{in}=4,4$  and steel AISI 304SS

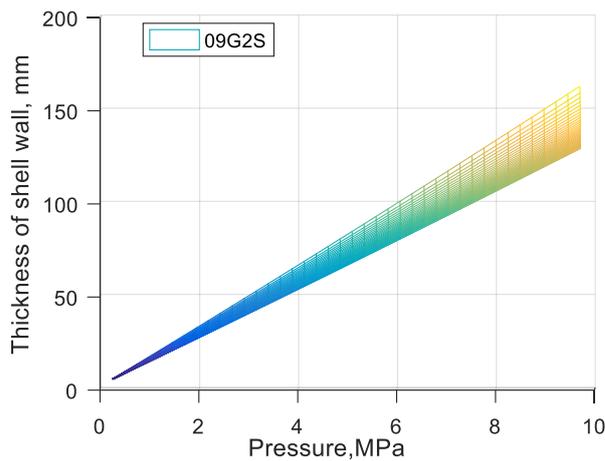


Figure 5.10 – ‘Thickness vs Pressure’ analysis in range of whole spectrum of temperatures for tank option  $D_{in}=4,4$  m and steel 09G2S.

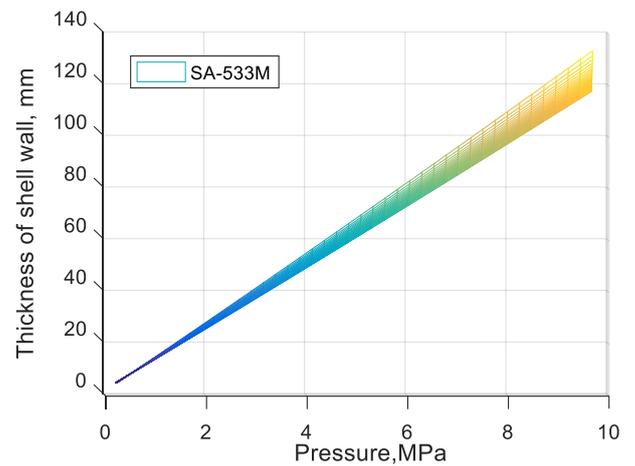


Figure 5.9 – ‘Thickness vs Pressure’ analysis in range of whole spectrum of temperatures for tank option  $D_{in}=4,4$  m and steel SA-533M.

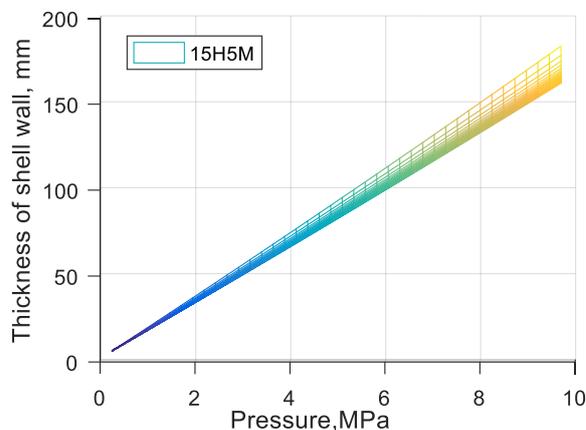


Figure 5.9 – ‘Thickness vs Pressure’ analysis in range of whole spectrum of temperatures for tank option  $D_{in}=4,4$  m and steel 15H5M.

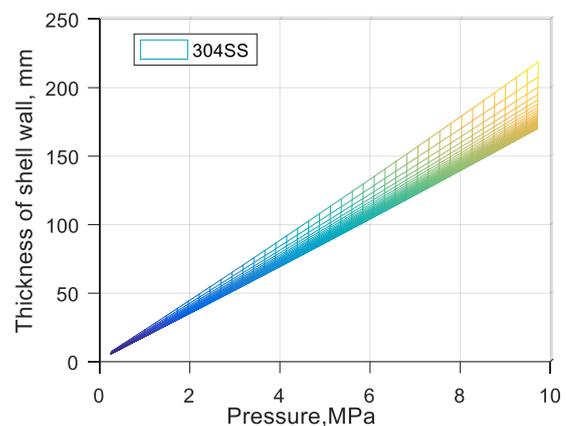


Figure 5.9 – ‘Thickness vs Pressure’ analysis in range of whole spectrum of temperatures for tank option  $D_{in}=4,4$  m and steel AISI-304SS.

Adsorber tanks made of heat-resisting steels SA-533M and 15H5M have dependencies of wall thicknesses which are less susceptible to high temperatures. The steel SA-533M is still preferable for tank construction due to its high strength parameters.

Adsorbers from heat-resistant steels SA-533M and 15X5M are less susceptible to high temperatures on the wall thickness, however, the strength characteristics of 15H5M steel are less than for SA-533M.

Overall, the decrease of pressure for 3 MPa produces the striking drop of wall thickness for 40 mm. However, design limitations oblige to take for design pressure the value of 9.8 MPa because of the working pressure on the suction line of the compressor station. Thus, there is no possibility to optimize tank design in this way.

Summing up, it is necessary in the further analysis to concentrate on the temperature calculation and the change in the insulation thickness. The analysis is provided in Section 5.4.

## 5.4 Dependencies of wall thickness on steel types and insulation thickness

The calculation result is graphical dependencies for two design options of adsorber tanks – A)  $D_{in} = 4.4$  m and  $P = 9.7$  MPa and B)  $D_{in} = 3.6$  m and  $P = 9.7$  MPa

A)  $D_{in} = 4.4$  m (taking into account insulation thickness)

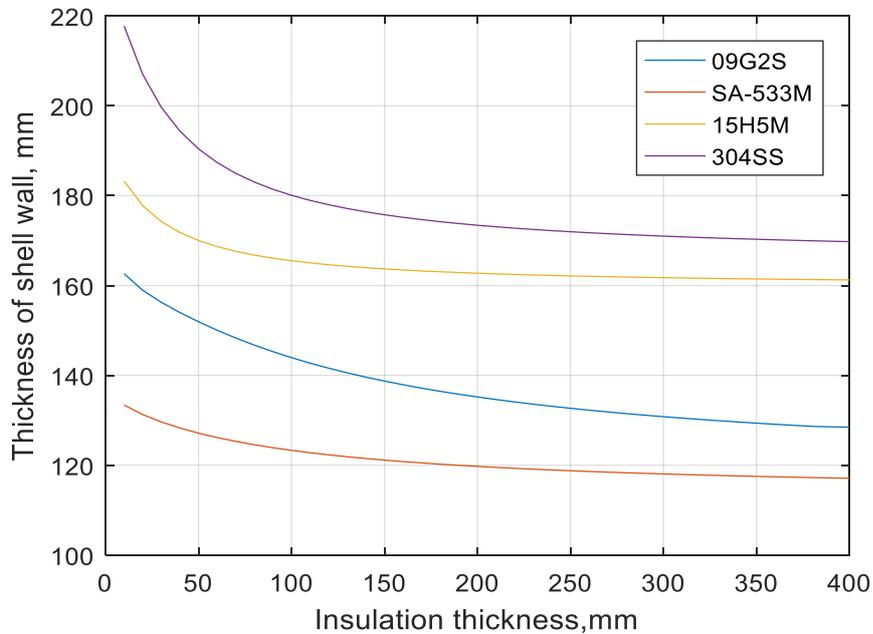


Figure 5.11 – Thickness of shell wall vs insulation thickness for all steels and  $D_{in} = 4.4$  m и  $P = 9.7$  MPa

B)  $D_{in} = 3.6$  m (taking into account insulation thickness)

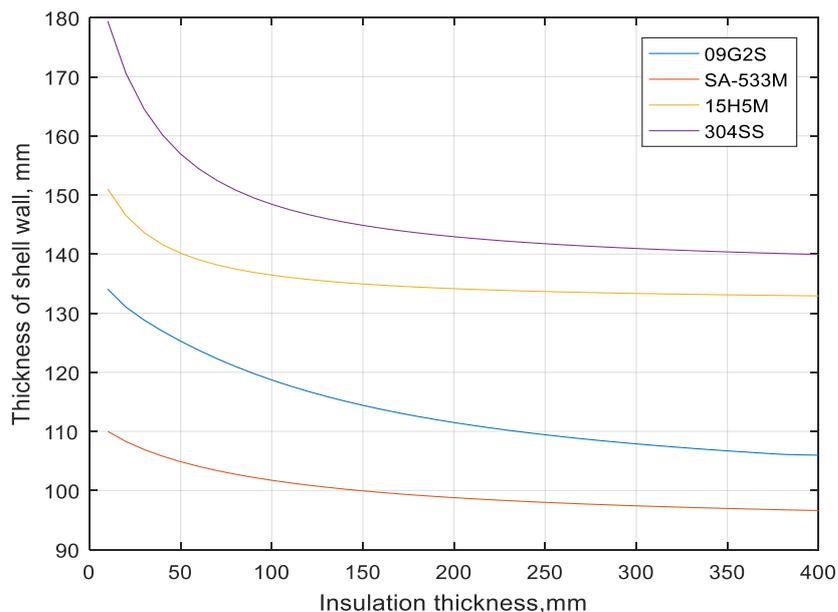


Figure 5.12 – Thickness of shell wall vs insulation thickness for all steels and  $D_{in} = 3.6$  m и  $P = 9.7$  MPa

A qualitative difference in wall thicknesses is clearly visible, and it is possibly caused with a change of steel type. The steel 09G2S shows greater sensitivity to temperature changes than other steels. In case of steels SA-533M and 15H5M, the temperature effect also takes place, but it is not so noticeable.

In addition, the decrease of intervals between the thicknesses of tanks made from different steels is observed while insulation thickness increases in both tank design versions. Obviously, this happens due to two main reasons: 1) the decrease of the temperature in the joint point of fireproof insulation and steel wall; 2) different temperature "sensitivities" of steels.

Slope decrease in the thickness of tank wall is observed in the interval of insulation thickness from 100 to 400 mm for steels SA-533M and 15H5M. In case of SA-533M the preferable insulation thickness is 100-120 mm, and this statement also corresponds to the conclusions provided in Section 5.2.

Strong drop of wall thickness is observed in the insulation range from 10 to 180 mm for steels 09G2S and AISI 304SS. Then the decrease becomes flatter. Consequently, one of possible ways to reduce the metal consumption will be thickening of fireproof insulation. For example, in case of 09G2S the preferable interval is from 120 to 140 mm. As for AISI 304SS, usage of that steel should be considered inadvisable.

## 5.5 Dependency of tank mass on steel type and insulation thickness

The calculation result is graphical dependencies for two design options of adsorber tanks, which are A)  $D_{in} = 4.4$  m and  $P = 9.7$  MPa and B)  $D_{in} = 3.6$  m and  $P = 9.7$  MPa

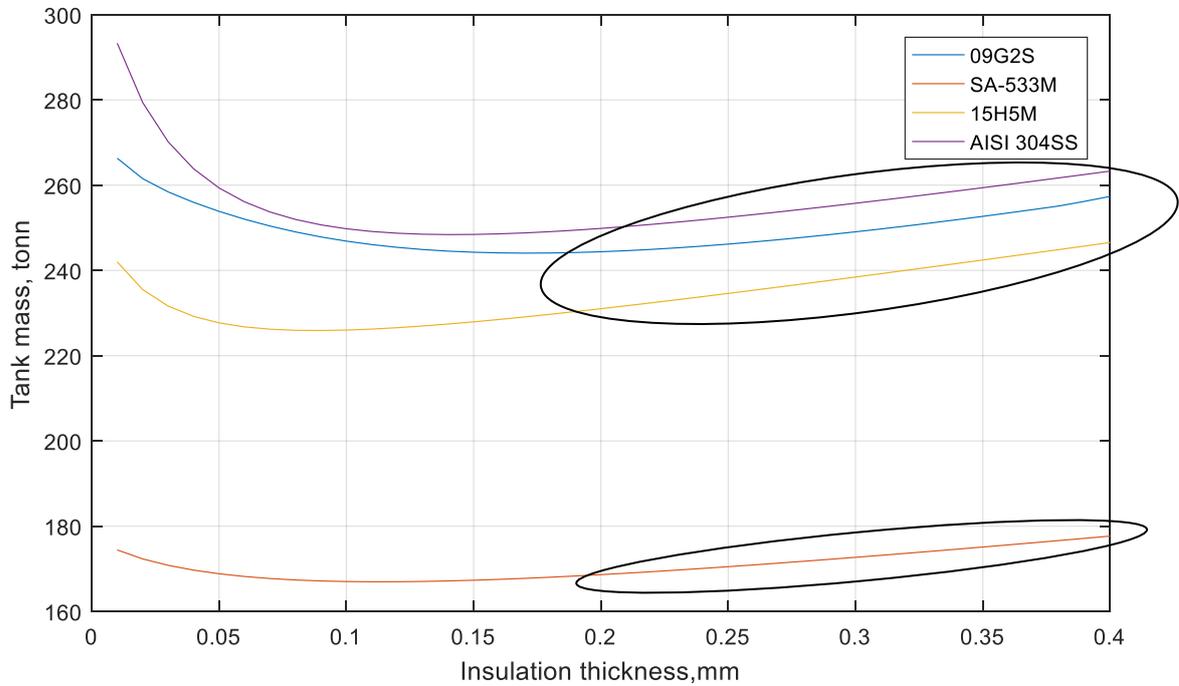


Figure 5.13 – Tank mass ( $P=97$  bar и  $D_{in}=4,4$ m) vs insulation thickness

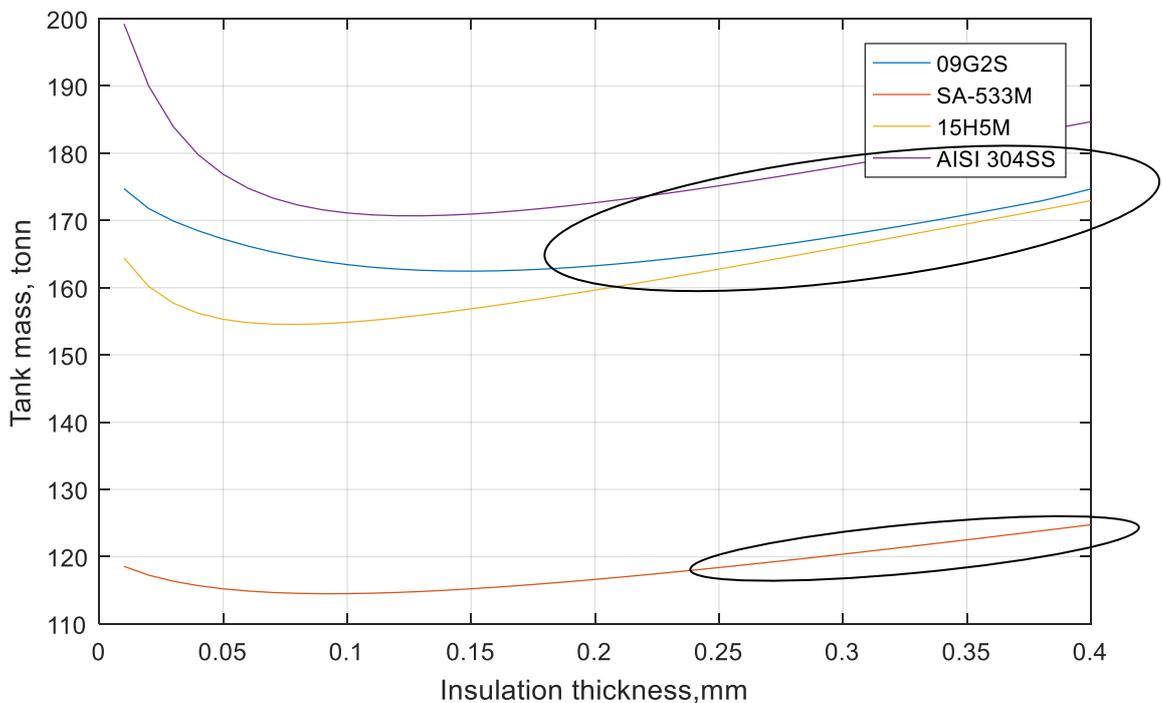


Figure 5.14 – Tank mass ( $P=97$  bar и  $D_{in}=3,6$ m) vs insulation thickness

The tank mass is calculated as the sum of shell, bottom and cover masses. The obtained values are used to plot the graph of the tank mass versus the thickness of the insulation for several steel types.

A significant reduction of the tank mass is clearly noticeable for the interval of insulation thickness from 10 to 150 mm. However, the tank mass increases with a further increase in insulation thickness, and that may be caused with an error in the approximation formulas for the allowable stress. The range of insulation thickness from 150 to 400 mm operates with temperatures, which are not included into experimental data for allowable stresses. It leads to inadequate approximation results for insulation thickness over 150 mm, and it is not possible to correctly calculate allowable stresses. This fact requires updating experimental data of the ultimate strength and compression strength of steels in the temperature range from -20 to 60 °C.

## 5.6 Estimated cost vs insulation thickness, mass and steel type

The calculation result is graphical dependencies for two design options of adsorber tanks, which are A)  $D_{in} = 4.4$  m and  $P = 9.7$  MPa and B)  $D_{in} = 3.6$  m and  $P = 9.7$  MPa

A)  $D_{in} = 4.4$  m (taking into account insulation thickness)

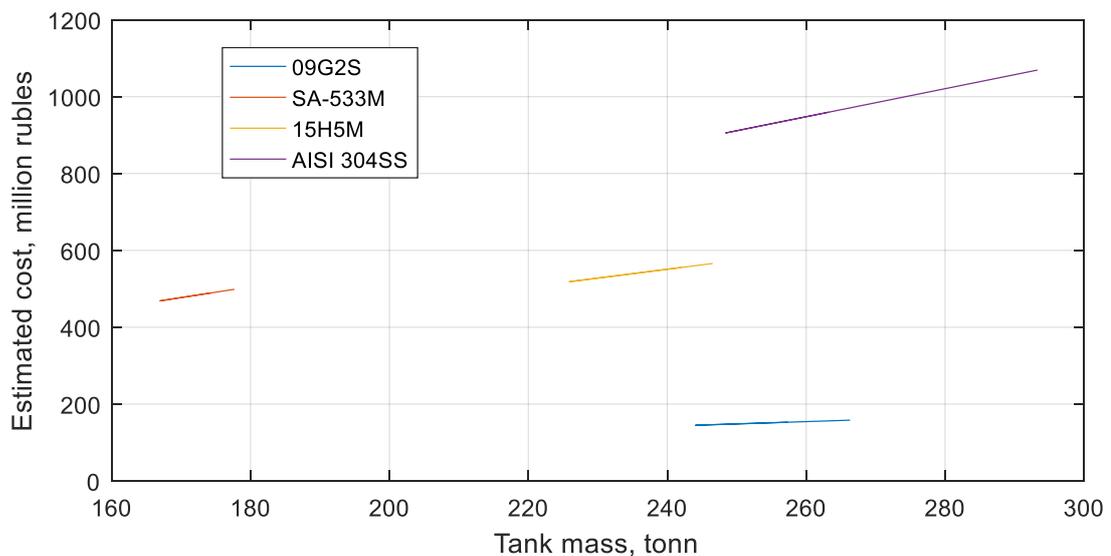


Figure 5.15 – Estimated cost vs tank mass

The linear character of cost dependence on mass is noticeable for all types of steel, and that fact corresponds with the theoretical basis. It is worth noticing that the adsorber tank based on 09G2S or 15H5M steels is heavier (by 60-70 tons) than the adsorber based on SA-544M, which, obviously, is the most lightweight of all options. In case of estimated cost, the division into three categories is clearly noticeable, which are the adsorber from steel 09G2S in the range of 160-170 million rubles, the adsorbers from steels SA-533M and 15H5M in the range of 400-460 million rubles, and the adsorber from steel AISI 304 SS in the range from 790 to 900 million rubles.

B)  $D_{in}= 3.6$  m (taking into account insulation thickness)

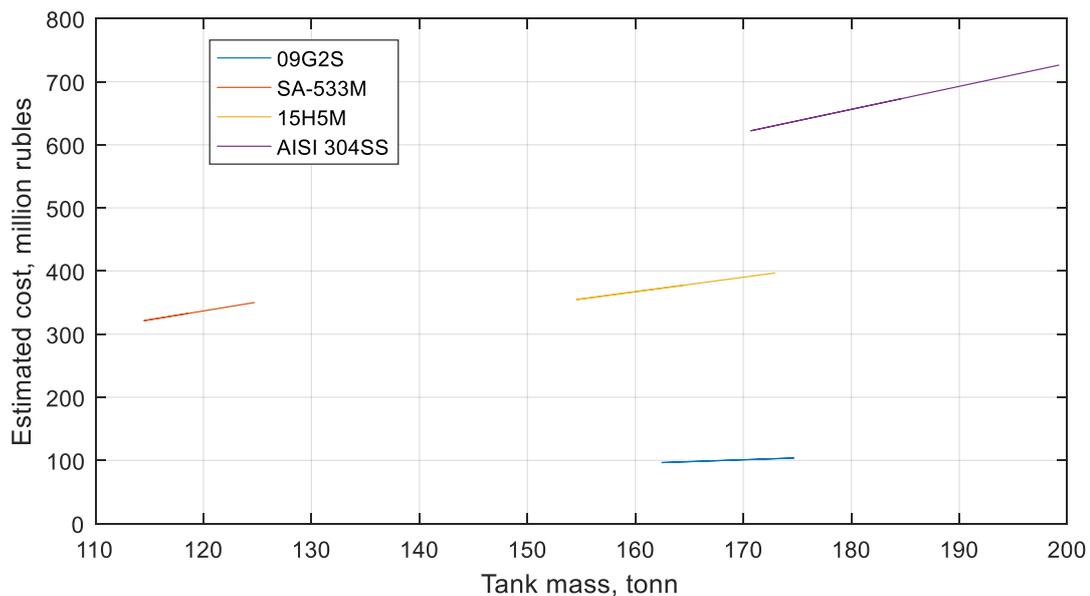


Figure 5.16 – Estimated cost vs tank mass

A similar situation is observed for another tank option (see Figure 5.16), here the adsorber tank made from steel 09G2S is in the range of 150-160 million rubles, adsorber tanks from steel SA-533M and 15H5M are in the range 470-400 million rubles, and adsorber tank from steel AISI 304 SS is from 610 up to 710 million rubles.

To provide optimization strategy for adsorber tank construction at least two key aspects should be considered, which are the final cost and tank mass. If the tank cost is a key factor in the project, it is recommended to choose the steel 09G2S as structural material together with the preferable inner insulation thickness of 120-140 mm. In combination with a relatively low price of the structural material, this insulation will reduce the metal consumption and heat losses in the regeneration mode and ensure the safety of the production process.

In case when the tank mass is important factor in the choice of the structural material (for example, in case of poor transport infrastructure at the project area), steel SA-533M should be chosen. This choice will significantly reduce the total mass, and inner insulation in the thickness range of 100-120 mm will provide an external wall temperature below 75°C as required with SP 61.13330.2012 "Thermal insulation of equipment and pipelines. Updated version of SNiP 41-03-2003"

Adsorber tank made from steel 15H5M should be considered as project material in case of large amount of CO<sub>2</sub> in the natural gas. Adsorber tank made from steel AISI 304SS is not suitable for tank design from economic viewpoint.