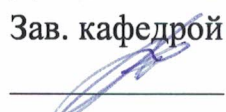


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы
Специальность 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика
Направленность (профиль) образовательной программы – Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

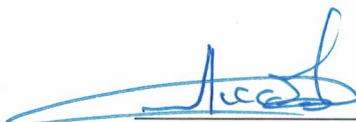
Зав. кафедрой

 В.В. Соловьев
«» _____ 20__ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Разработка резервуара для хранения сжиженного природного газа на стартовом комплексе третьей очереди строительства космодрома «Восточный»

Исполнитель
студент группы 1109-об2


(подпись, дата)

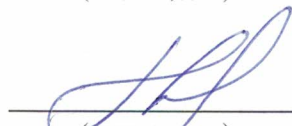
А.А. Левченко

Руководитель
профессор, д-р. техн. наук


(подпись, дата)

А.Д. Плутенко

Консультант
доцент


(подпись, дата)

К.А. Насуленко

Консультант по БЖД
доцент, канд. техн. наук


(подпись, дата)

А.В. Козырь

Нормоконтроль
стар. преп. кафедры СИТРК


(подпись, дата)

М.А. Аревков

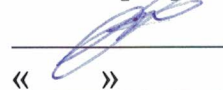
Благовещенск 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 В.В. Соловьев
« » 20 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Левченко Алексея Алексеевича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка резервуара для хранения сжиженного природного газа на стартовом комплексе третьей очереди строительства космодрома «Восточный»

(утверждена приказом от 22.04.2025 № 1055-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 06.06.2025 г.

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: отчеты по практикам, ГОСТы, справочная литература, техническая документация, электронные ресурсы.

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): расчет параметров резервуара хранения СПГ, моделирование процессов заполнения и опустошения резервуара, моделирование нагрузок, возникающих при критических внутренних давлениях, расчеты на прочность.

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) резервуар РЦГ-250. Габаритный чертеж, транспортировка резервуара РЦГ-250 на транспорте, распределение давления при процессе заполнения резервуара,

распределение температур при процессе заполнения резервуара, распределение плотности СПГ при процессе заполнения резервуара, распределение плотности при процессе опустошения резервуара, распределение концентрации СПГ и числа Прандтля при опустошении резервуара, распределение деформаций, распределение напряжений.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: Насуленко К.А., доцент; консультант по БЖД Козырь А.В., доцент, канд. тех. наук.

7. Дата выдачи задания 29.05.2025 г.

Руководитель выпускной квалификационной работы: Плутенко А.Д., профессор, д-р. тех. наук.

Задание принял к исполнению (дата):



(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 75 с., 19 рисунков, 8 таблиц, 3 приложения, 21 источник.

КОСМОДРОМ ВОСТОЧНЫЙ, СПГ, АМУР-СПГ, КРИОГЕННЫЙ РЕЗЕРВУАР, ХРАНЕНИЕ СПГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАПРАВКИ И СЛИВА, МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗОК, МЕТАН, КОМПОНЕНТЫ ТОПЛИВА, ЗАПРАВОЧНЫЕ ЕМКОСТИ

В данной бакалаврской работе будет разработан резервуар для хранения СПГ на стартовом комплексе третьей очереди строительства космодрома «Восточный, смоделированы основные процессы работы резервуара.

Цель работы – разработка резервуара для хранения сжиженного природного газа на стартовом комплексе третьей очереди строительства космодрома «Восточный» для РКН «Амур-СПГ».

Задачи:

- изучить доступную информацию о РКН «Амур-СПГ», применении СПГ, как ракетного топлива и способах его хранения на объектах ракетно-космических комплексах;
- провести расчеты для выбора резервуара хранения СПГ;
- проведение моделирования процессов заполнения, слива продукта из резервуара и моделирования нагрузок, возникающих при критических внутренних давлениях;
- рассмотреть основные меры безопасности при монтаже и эксплуатации резервуара хранения СПГ, выполнить расчеты на прочность;
- оценить стоимость резервуара, его доставки и монтажа.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
1 Основная часть	10
1.1 Общие сведения о третьей очереди строительства космодрома «Восточный»	12
1.2 Общие сведения о РКН «Амур-СПГ»	14
1.3 Общие сведения о транспортировке СПГ	16
1.4 Общие сведения о хранении СПГ	18
1.4.1 Криогенные резервуары	19
1.4.2 Изотермические резервуары	23
2 Расчетная часть	24
2.1 Расчет необходимых параметров для выбора резервуара	27
2.1.1 Количество и объем необходимого топлива	27
2.1.2 Объемы топлива, теряющиеся в заправочных трубопроводах	28
2.1.3 Объемы, теряющиеся в ходе расхолаживания трубопроводов	33
2.1.4 Объем топлива, теряющийся при заправке	34
2.1.5 Объемы топлива для заправки РКН	36
2.1.6 Объемы резервуаров	36
3 Исследовательская часть	37
3.1 Подготовка ПО SolidWorks для моделирования процессов	37
3.2 Моделирование процесса заполнения резервуара	41
3.3 Моделирование процесса опустошения резервуара	43
3.4 Моделирование нагрузок, возникающих при критических внутренних давлениях	46
4 Безопасность жизнедеятельности	50
4.1 Меры безопасности	51
4.1.1 Меры безопасности при погрузке и разгрузке резервуара	51
4.1.2 Меры безопасности при монтаже резервуара	53

4.1.3 Меры безопасности при эксплуатации резервуара	53
4.1.4 Меры безопасности при работе с криогенными продуктами	55
4.2 Расчет на прочность	56
4.2.1 Расчет расчетного давления	58
4.2.2 Расчет пробного давления	59
4.2.3 Расчет обечайки на прочность при действии внутреннего избыточного давления	59
4.2.4 Расчет обечайки на прочность при действии внутреннего избыточного давления и изгибающего момента	61
4.2.5 Расчет днищ	64
4.3 Выводы по разделу	66
5 Экономическая часть	68
Заключение	70
Библиографический список	73
Приложение А	76
Приложение Б	79
Приложение В	81

ОПРЕДЕЛЕНИЕ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ГОСТ – государственный стандарт;
ИР – изотермический резервуар;
КРК – космический ракетный комплекс;
ОАО – открытое акционерное общество;
ОПО – опасные производственные объекты;
ОК – орбитальный корабль;
ПАО – публичное акционерное общество;
ПО – программное обеспечение;
РБ – разгонный блок;
РД – ракетный двигатель;
РЖД – Российские железные дороги;
РКН – ракета космического назначения;
РКЦ – ракетно-космический центр;
РН – ракета-носитель;
САПР – система автоматизированного проектирования;
СПГ – сжиженный природный газ;
СК – стартовый комплекс;
ТК – технический комплекс;
ТР ТС – Технический регламент Таможенного союза.

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития космической отрасли характеризуется необходимостью внедрения эффективных технических решений и перехода на перспективное ракетное топливо. Использование сжиженного природного газа в качестве ракетного топлива определяется его сочетанием энергетических, физических и эксплуатационных преимуществ. Метан, являющийся основным компонентом СПГ, по своим характеристикам превосходит традиционные углеводородные топлива в части энергетической эффективности, экологичности и безопасности эксплуатации. В сравнении с керосином, СПГ обеспечивает более высокий удельный импульс работы ракетных двигателей, позволяя получать больший прирост скорости при аналогичном расходе топлива. Дополнительным преимуществом является меньшая токсичность продуктов сгорания и отсутствие образования коррозионных и агрессивных отложений в магистралях и камерах двигателя, что способствует увеличению ресурса их эксплуатации, снижает сложность обслуживания и повышает общую надёжность системы. В условиях развивающейся концепции многоразового использования ракетно-космических систем выбор в пользу метанового топлива становится весомым технологическим и экономическим аргументом.

Приём, хранение и подача СПГ как ракетного топлива сопряжены с рядом специфических технических задач. Криогенные свойства требуют поддержания его в жидком агрегатном состоянии при сверхнизких, что предъявляет повышенные требования к конструкционным материалам и системам теплоизоляции. Надёжность и герметичность резервуаров для СПГ непосредственно определяют уровень промышленной безопасности стартового комплекса. Инженерная задача проектирования резервуара заключается не только в обеспечении достаточной запаса прочности и устойчивости к внутреннему давлению, но и в минимизации потерь топлива за счёт испарения, предотвращении образования опасных концентраций паров и автоматизации контроля технологических параметров. Система хранения должна обеспечивать

непрерывность процессов, аварийную устойчивость и быструю реакцию на внештатные ситуации. Особое значение имеет интеграция резервуаров в общую архитектуру заправочного комплекса с учётом специфики климатических и сейсмотектонических условий региона космодрома «Восточный».

1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Конструкции ракетно-космических комплексов предусматривают применение различных типов топливных компонентов в зависимости от функционального назначения и технических требований конкретной задачи. Для работы жидкостных ракетных двигателей используются либо высококипящие вещества, либо низкокипящие криогенные жидкости, которые обладают характерными физико-химическими параметрами и требуют соответствующих специализированных инженерных решений при проектировании систем заправки и хранения. Особенностью криогенных топливных компонентов является их температура хранения, что предъявляет строгие дополнительные требования к условиям эксплуатации, арматуре и теплоизоляции. Рабочий процесс с такими жидкостями связан с неизбежным испарением различной интенсивности, возникающим как в системах наземного технологического оборудования, так и в топливных баках ракет-носителей, разгонных блоков и орбитальных аппаратов. Основное преимущество применения криогенных топлив заключается в возможности получения более высокого удельного импульса работающих на них двигателей по сравнению с высококипящими аналогами, что напрямую отражается на росте энергетических характеристик и эффективности всей ракетной системы.

Сжиженный природный газ – это прозрачная, не имеющая цвета и запаха жидкость, обладающая высокой скоростью испарения. При использовании в качестве ракетного горючего данный продукт должен соответствовать установленным физико-химическим характеристикам, определённым в технических требованиях ТУ 021 00480689-96 «Газ горючий, природный сжиженный. Топливо для ракетной техники».

Таблица 1 – Нормы физико-химических показателей СПГ

Показатель		Норма
Объемная доля	метана, не менее	96,0±2,0

	этана, пропана, не более	2,820±2,0
	бутан-гексана, не более	0,036
	гектан-декана, не более	0,001
	непредельных и циклических углеводородов, не более	0,001
	азота, не более	0,130
	диоксида углерода, не более	0,011
	сероводорода и серосодержащих, не более	0,001
Содержание воды (точка росы по влаге), не более, г/м ³		0,012
Содержание твердых примесей, не более, к/м ³		0,001
Размеры частиц механических примесей и кристаллов, не более, мкм		10
Низшая теплотворная способность, кДж/кг		49500

СПГ – низкотемпературная жидкость. Холодные пары СПГ температурой ниже 150 К тяжелее воздуха. Предельно допустимая концентрация углеводородов природного газа в воздухе рабочей зоны равна 300 мг/м³. Температура самовоспламенения СПГ – 450 С. Сброс паров СПГ в открытую атмосферу не допускается, их необходимо дожигать в специальных факельных установках.

Жидкий метан, как ракетное топливо менее мощный, чем водород, но имеет свои преимущества перед водородом, что делает его отличным альтернативным ракетным топливом из-за своего недорогого и простого в обращении состава.

Газообразный метан также можно использовать для наддува топливных баков, что устраняет необходимость в сложных и дорогостоящих системах наддува, например, на основе гелия. Кроме того, метан в шесть раз плотнее водорода, поэтому занимает в шесть раз меньше места. Ступени ракеты могут быть более компактными, и их потенциально легче использовать многократно.

Как энергоноситель СПГ имеет высокие показатели по теплотворности (на 17 % больше, чем у керосина), хладоресурсу (в 3 раза выше, чем у керосина), по сгоранию топлива (отсутствие коксообразования).

Использование метана в составе ракетно-космического является экологически безопасным вариантом. Метан, относясь к криогенному горючему, рассматривается в паре с жидким кислородом, при сгорании в котором дает экологически чистые газообразные продукты, состоящие в основном из водяного пара и моно- и диоксида углерода.

Как топливо для многоразовых ракет, метан является самым удобным вариантом. При сгорании, сжиженный газ выделяет значительно меньше сажи, в отличие от привычных вариантов топлива. Тем самым элементы двигателя не будут подлежать постоянному чистке от несгоревших остатков топлива. Также у метана охлаждающая способность намного выше, что уменьшит, нагрев двигателя во время работы.

Основные преимущества применения топливной пары «жидкий кислород – жидкий метан» включают возможность хранения топлива и окислителя при одинаковых температурах, нетоксичность, недорогое производство и относительную простоту обращения во время эксплуатации ракеты-носителя. Метановая двигательная установка хорошо подходит для использования в широком спектре двигательных установок, начиная от больших ракетных двигателей и заканчивая орбитальными маневровыми двигателями.

Системы хранения СПГ требуют высокой степени автоматизации и контроля, что связано не только с особенностями самого продукта, но и с обеспечением безопасности технологии.

1.1 Общие сведения о третьей очереди строительства космодрома «Восточный»

Роскосмос и РКЦ "Прогресс" в октябре 2020 года подписали контракт на разработку эскизного проекта космического ракетного комплекса с первой российской многоразовой ракетой на метане "Амур". Ракета получит возвращаемую первую ступень и будет запускаться с космодрома Восточный в

Амурской области. Отмечается, что специалисты уже сформировали стартовую схему, состав систем и агрегатов стартового комплекса, их назначение, принципы работы и взаимодействия, расположение на СК и основные конструктивные решения. Параллельно ведутся работы по разработке документации на технологическое оборудование стартового комплекса. Изначально планировалось разместить стартовый комплекс для метановой ракеты в 5 км от аэропортового комплекса космодрома, но сейчас для сокращения сроков и объёма строительных работ рассматривается и другое расположение стартового комплекса: по соседству с площадкой для запуска тяжёлой ракеты «Ангара-А5» с частичным заимствованием её инфраструктуры. В этом случае к строительным работам можно будет приступить уже в 2026 году.

При строительстве стартового комплекса также планируют использовать концепцию пусковой платформы, по аналогии с «Морским стартом» - плавучим космодромом для запуска ракет-носителей модификации «Зенит-3SL», на котором все технологическое оборудование и, по сути, весь стартовый комплекс помещался в единой конструкции для оптимального размещения в ней максимально возможного объема технологического оборудования взамен создания множества отдельных строительных сооружений. Такое решение позволит сократить сроки и стоимость строительных работ, а также обеспечить требования по безопасности и надежности.

Проектом предусмотрено создание облегчённого стартового комплекса без размещения капитальных подземных сооружений и хранилищ для обеспечения военной безопасности. Конструкция стартового стола оптимизируется для минимизации сверхпрочных элементов, так как повышенные требования к нагрузкам не актуальны для коммерческих пусков, что существенно снижает затраты на строительство. Важный акцент будет сделан на развитии сервисной и туристической инфраструктуры. Комплекс будет открыт для иностранных партнёров и посетителей, что позволит демонстрировать им производственные и испытательные мощности, предназначенные для подготовки их космических аппаратов. Дополнительно на территории комплекса предполагается разместить

гостиницы, экскурсионные пространства и современные удобные зоны для наблюдения запусков.

Главное отличие стартового комплекса третьей очереди заключается в его полной автоматизации. Предусматривается реализация такой технологии, при которой все операции с ракетой на стартовой позиции выполняются без непосредственного участия персонала. Это решение позволяет значительно повысить уровень безопасности за счет минимизации влияния человеческого фактора, а также способствует снижению эксплуатационных затрат за счет уменьшения потребности в ручном труде.

Ожидается, что в состав объектов третьей очереди строительства космодрома «Восточный» войдут следующие элементы:

- ракета-носитель среднего класса «Амур-СПГ»;
- комплекс разгонного блока;
- специальные средства транспортирования РН «Амур-СПГ»;
- технический комплекс;
- стартовый комплекс;
- технические комплексы КА и КГЧ (заимствуется из состава комплексов, существующих на космодроме «Восточный»);
- комплекс посадки блока первой ступени.

1.2 Общие сведения о РКН «Амур-СПГ»

РН среднего класса «Амур-СПГ» - двухступенчатая ракета, выполненная по «тандемной» схеме с первой ступенью многократного использования. В качестве компонентов топлива должны использоваться сжиженный природный газ и жидкий кислород.

Согласно предварительным оценкам, ракета-носитель «Амур-СПГ» будет иметь стартовую массу порядка 360 тонн, при высоте около 55 метров и диаметре корпуса 4,1 метра. Конструкция ракеты предусматривает возвращаемую первую ступень, оснащённую посадочными опорами и аэродинамическими решётчатыми рулями, а также вторую ступень одноразового использования; обе

ступени будут работать на метановых двигателях. В случае необходимости, оборудование для посадки может быть демонтировано, что позволит использовать ракету в традиционном одноразовом исполнении. В возвращаемой конфигурации «Амур» сможет доставить на низкую околоземную орбиту до 10,5 тонн полезной нагрузки, что заметно больше по сравнению с 8,5 тоннами у ракет семейства «Союз-2». В одноразовом варианте носитель сможет выводить на такую же орбиту до 12,5 тонн.

Первая ступень ракеты-носителя «Амур-СПГ» будет возвращаемой за счёт динамической посадки на подготовленную площадку вдоль траектории или вблизи стартового комплекса, с последующим возвращением для подготовки к новому запуску. Проект предусматривает возможность повторного использования первой ступени минимум 10 раз, что будет подтверждаться в ходе летных испытаний, также рассматриваются альтернативные способы её спасения.

Одной из отличительных особенностей станет увеличенный головной обтекатель диаметром до 5,1 метра, что позволит запускать современные и перспективные космические аппараты. Проектировщики также рассматривают возможность повторного включения или глубокого дросселирования второй ступени для обеспечения кластерных пусков.

В качестве дополнительной меры повышения надежности «Амур-СПГ» может получить систему горячего резервирования. На первой ступени будет установлено пять метан-кислородных двигателей РД-0169А с тягой по 100 тонн. При отказе одного двигателя предусмотрено автоматическое увеличение тяги остальных для продолжения полёта.

Двигатель для ракеты Амур-СПГ – это комплекс жидкостных ракетных двигателей, разработанных для обеспечения высокоточных исполнительских полетов в космосе и созданных на основе передовых технологий проектирования и производства. Эти двигатели предназначены для работы на экологически чистом топливе с использованием современных систем управления и

диагностики, что сокращает время на подготовку к запуску и повышает безопасность процессов.

На первой ступени ракеты предполагается использование пяти двигателей РД-0169А. Ракетный двигатель выполнен по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа, имеет тягу у Земли 100 тонн, кратность использования – до десяти раз.

РД-0169 представляет собой российский ракетный двигатель, работающий на кислородно-метановой системе. Его разработка осуществляется в КБХА под руководством главного конструктора Виктора Дмитриевича Горохова. В качестве топлива используется сжиженный природный газ (метан), а окислителем – жидкий кислород. Процесс сгорания в камере организован по принципу «газ-газ». Данный двигатель обладает рядом преимуществ, таких как простота в эксплуатации, экологичность и возможность повторного использования. Разработка основывается на двигателе РД0162, с промежуточным вариантом РД0177. Существуют две модификации: РД0169А, предназначенный для первой ступени ракетной носителя Амур-СПГ, и РД0169В, представляющий собой четырёхкамерный двигатель второй ступени той же ракеты.

1.3 Общие сведения о транспортировке СПГ

Состояние природного газа в виде СПГ обеспечивает возможность его транспортировки, а также использования в качестве горючего с минимальным объемом.

При транспортировке и снабжении сжиженного природного газа (СПГ) на третьей очереди строительства космодрома Восточный могут возникнуть несколько значительных трудностей. Одним из основных факторов является необходимость обеспечения безопасной транспортировки СПГ. Это требует строгого соблюдения норм и правил, связанных с его обращением, поскольку газ является легковоспламеняющимся и потенциально опасным веществом. Необходимость в специализированном оборудовании и транспортных средствах

для перевозки СПГ может привести к дополнительным затратам и усложнению логистики.

Климатические условия в регионе, где расположен космодром, могут оказать существенное влияние на процесс транспортировки. Низкие температуры, частые осадки и другие неблагоприятные погодные условия могут замедлить грузоперевозки и потребовать дополнительных мер по обеспечению безопасной и эффективной работы транспортной инфраструктуры.

Для доставки сжиженного природного газа от установок по его сжижению до стартовой площадки могут быть использованы следующие транспортные средства:

- автомобильные транспортировщики, оснащённые теплоизоляцией экранно-вакуумного или порошково-вакуумного типа;
- железнодорожные цистерны с порошково-вакуумной теплоизоляцией, пригодные для эксплуатации в составах общего пользования и способные перевозить СПГ без необходимости выпуска паров в течение до 15 суток;
- специальные контейнеры, для транспортировки сжиженного природного газа различными видами транспорта: автотранспортом, железной дорогой, водным и воздушным путём;
- самолет Ту-330, создаваемый ОАО «Туполев», в том числе и для перевозки СПГ, и др.

В настоящее время основным видом транспортировки природного газа является трубопроводный. СПГ обычно поставляется в виде газообразного состояния, а в последующем подвергается процессу реверсного сжижения. Газ под давлением 75 атмосфер движется по трубам диаметром до 1,4 метра. По мере продвижения газа по трубопроводу он теряет энергию, преодолевая силы трения как между газом и стенкой трубы, так и между слоями газа. Поэтому через определённые промежутки необходимо сооружать компрессорные станции, на которых газ дожимается до 75 атм.

Транспортировка СПГ с использованием автомобильных цистерн – один из наиболее эффективных методов перевозки. Сначала вещество сжимают и преобразуют в сжиженное состояние. Для этого используется технология, позволяющая опустить его температуру до минус 160 градусов, что приводит к сокращению объема примерно в 600 раз. Это сжатое топливо помещают в специализированные автомобильные цистерны.

Топливо для заправки семейства «Амур-СПГ» будет поставляться газоперерабатывающим комплексом ПАО «Газпром», в соответствии с меморандумом, заключенным между Газпром гелий сервисом и Ракетно-космическим центром Прогресс [1].

1.4 Общие сведения о хранении СПГ

Неотъемлемой частью использования СПГ в качестве энергоносителя является процесс его хранения как в составе объектов производства, так и в составе объектов потребления. Для правильной оценки экономической и экологической составляющих проекта, в состав которого входит система хранения СПГ, а также в целях безопасной эксплуатации системы хранения, необходимо знать параметры работы этой системы.

Необходимость в специализированных хранилищах и регазификационных терминалах сжиженного природного газа может быть вызвана непростой инфраструктурной ситуацией в регионе. Это требует дополнительных инвестиций и временных затрат.

При использовании сжиженного природного газа в системах хранения на старте может возникнуть опасное явление, известное как «ролlover». Это происходит, когда емкость хранилища заполняется новой порцией СПГ, которая имеет отличающиеся физические характеристики от уже имеющейся. Со временем новая и старая порции начинают перемешиваться, что приводит к резкому увеличению давления в газовой подушке. Такой рост давления может спровоцировать разрушение хранилища и утечку вещества, а в случае возникновения искры – к пожару на стартовом комплексе.

К тому же, недостаточная развитая инфраструктура для надлежащего энергообеспечения и сервисного обслуживания СПГ может создать дополнительные сложности. Это особенно актуально в удаленных или труднодоступных районах. Экологические проблемы тоже требуют внимания, так как хранение СПГ может повлиять на окружающую среду, и важно соблюдать экологические нормы и контролировать возможные загрязнения.

Необходимо также учитывать сложности с транспортировкой СПГ к месту хранения, так как отсутствие адекватных условий может негативно сказаться на процессе. Обучение персонала для работы со СПГ – еще одна трудность, поскольку требуется наличие квалифицированных специалистов, которые должны проходить периодическое обучение и сертификацию. Наконец, процесс получения разрешений и соблюдения законодательных норм может затянуть сроки реализации проектов, добавляя дополнительные сложности к хранению СПГ на космодроме.

Хранилища СПГ - важный элемент в процессе работы с СПГ. Хранение осуществляется в резервуарах, которые занимают огромные площади и являются потенциальными источниками производственных рисков и основными источниками потерь продукта.

Согласно проведенному литературному анализу [3] существуют различные конструктивно-технологические схемы хранения СПГ. При этом, несмотря на разные подходы к технологическим решениям, общей характеристикой резервуаров для хранения СПГ является способность хранить газ при очень низкой температуре.

1.4.1 Криогенные резервуары

Поступление тепла из внешней среды в резервуар для хранения приводит к испарению части сжиженного природного газа, в первую очередь его наиболее летучих компонентов – таких как азот и метан. Это приводит к росту концентрации более тяжёлых углеводородов в оставшемся СПГ. Кроме того, возможно возникновение стратификации, то есть разделения СПГ на участки различной плотности. В таких случаях перегретый нижний слой может внезапно

закипеть при контакте с газовой фазой, что создаёт риск быстрого испарения жидкости.

Учитывая термодинамические свойства сжиженного природного газа, его скорость испарения примерно в 2,5 раза ниже, чем у жидкого азота. Благодаря этому, даже для автоцистерн и других небольших резервуаров, вместо вакуумной изоляции допускается использование пенополиуретановой или аналогичной традиционной теплоизоляции. Применение такого подхода может позволить снизить стоимость изготовления резервуаров на 30-40 %, при этом увеличение потерь от испарения будет незначительным.

Резервуары вместе с арматурой и трубопроводами объединяются в единое хранилище заправочной системы. При выборе формы резервуара учитываются его объем, удобство производства, транспортировки и монтажа, особенности эксплуатации, а также требования по защите от внешних температурных влияний.

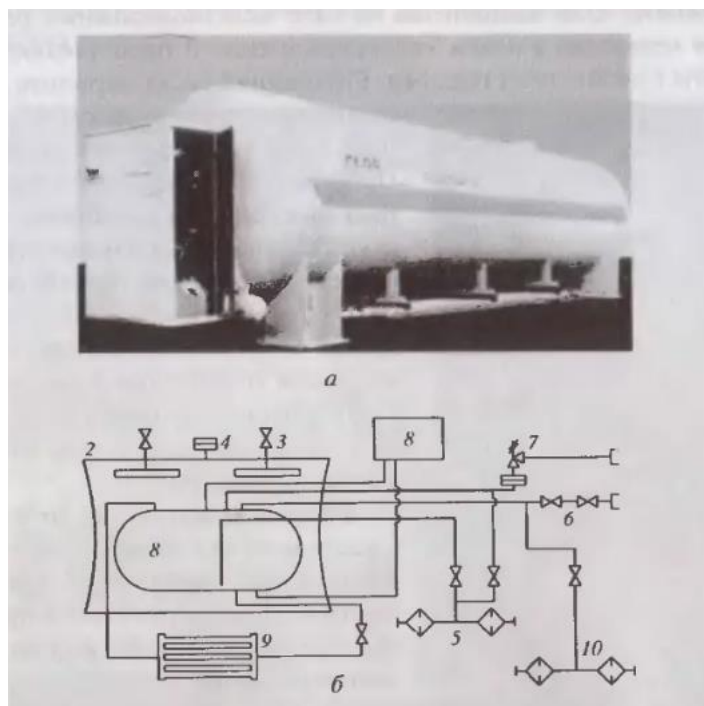


Рисунок 1 – Резервуар-хранилище для СПГ (а) и его схема обвязки (б) (1 – сосуд; 2 – кожух; 3 – вентиль вакуумный; 4 – предохранитель мембранный; 5 – наполнение, слив; 6 – газосброс; 7 – клапан предохранительный; 8 – щит приборов; 9 – испаритель наддува; 10 – наддув сторонним источниками)

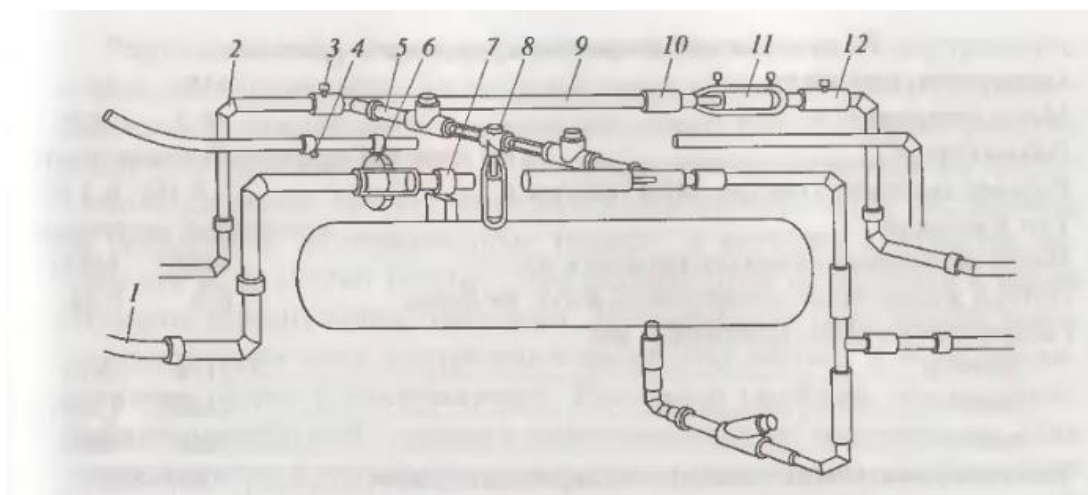


Рисунок 2 – Узел обвязки криогенного резервуара (1 – металлорукав; 2 – колено; 3 – мембранный узел; 4 – опора трубопровода; 5 – компенсатор; 6 – муфта стыка; 7 – опора трубопровода; 8 – тройник; 9 – трубопровод криогенный; 10, 12 – муфты стыка; 11 – адсорбционная секция)

Резервуары, представленные на рисунке 2, предназначены для стационарного хранения и могут использоваться в качестве раздаточных ёмкостей. Конструкция основана на железнодорожных резервуарах, применяемых для транспортировки жидких кислорода и азота, и состоит из двойной оболочки. Управление запорной арматурой осуществляется вручную. Вся арматура размещается в отдельном шкафу, оснащённом приборами контроля уровня жидкости и давления внутри сосуда. Операции по заправке и выдаче СПГ осуществляются с помощью испарителя, в котором формируется газ наддува.

Хранилище сжиженного природного газа следует размещать на таком расстоянии от стартового комплекса, чтобы обеспечить оптимальный баланс между длиной магистральных трубопроводов и безопасностью эксплуатации. Минимизация длины трубопроводов позволяет сократить теплопритоки, снизить гидравлические потери и уменьшить стоимость системы. В то же время, удалённость хранилища должна исключать возможность его повреждения во время запуска ракеты и обеспечивать защиту от чрезвычайных ситуаций.

Для обеспечения безопасности перед процессом заправки требуется провести подготовку всех внутренних поверхностей резервуаров и

трубопроводов, в том числе баков ракеты, контактирующих с СПГ. Для этого выполняют продувку и промывку азотом до достижения концентрации кислорода в азотной среде не более 3 %.

Таблица 2 – Характеристики горизонтальных цилиндрических резервуаров ОАО «Криогенмаш»

Показатель	РЦГ- 50/0,5-1	РЦГ- 100/0,5-1	РЦГ- 150/0,5-1	РЦГ- 250/0,5-1
Вместимость, м ³	55	112	155	245
Рабочее давление, МПа (кгс/см ²)	0,5 (5)	0,5 (5)	0,5 (5)	0,6 (6)
Масса хранимого продукта (СПГ), кг	20 500	41 800	57 800	91 400
Тип изоляции	Экранно-вакуумная			
Потери продукта (СПГ), % от суток	0,142	0,109	0,106	0,087
Масса порожнего резервуара, т	21	38	57	70

Таблица 3 – Характеристики вертикальных цилиндрических резервуаров ОАО «Криогенмаш»

Показатель	РЦВ- 10/1,6	РЦВ- 25/1,6-2	РЦВ- 63/0,5-2
Вместимость, м ³	10,1	25,4	66,3
Рабочее давление, МПа (кгс/см ²)	1,6 (16)	1,6 (16)	0,5 (5)
Масса хранимого продукта (СПГ), кг	4030	9800	2456
Тип изоляции	Экранно-вакуумная		

Потери продукта (СПГ), % от суток	0,142	0,109	0,106
Масса порожнего резервуара, т	4,7	11,8	22

1.4.2. Изотермические резервуары

Широкое распространение за рубежом получили изотермические резервуары, они считаются более экономически выгодными по сравнению с вакуумно-изолированными резервуарами. Изначально такие хранилища были разработаны для больших объёмов сжиженных углеводородных газов (например, аммиака, пропилена, этилена, пропана), при этом давление в них лишь немного превышало атмосферное. В иностранных проектах для хранения крупных количеств СПГ используются различные типы изотермических резервуаров, зачастую построенные на основе резервуаров для нефтепродуктов. В таких конструкциях вместо вакуумной применяется порошковая изоляция, а для предотвращения попадания влаги используется подпор азота. Этот подход позволяет создавать резервуары объёмом до сотен тысяч кубометров по значительно более низкой стоимости, чем при использовании экранно-вакуумной изоляции.

По зарубежным данным, все современные изотермические хранилища СПГ можно разделить несколько типов. Наиболее распространённым является свободно стоящий цилиндрический металлический двухстенный резервуар, вокруг которого возведена невысокая земляная или железобетонная дамба. Наружная оболочка резервуара выполняется из углеродистой стали, внутренняя – из хладостойкой (никелевой) стали или алюминия. Ко второму типу изотермических хранилищ относятся резервуары, представляющие собой наземные двухстенные резервуары с внутренней металлической и наружной бетонной оболочкой.

2 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Для накопления, хранения и выдачи криогенных жидкостей, в том числе сжиженного природного газа, в составе топливных систем, предназначенных для заправки ракет среднего и тяжёлого класса, рекомендуется использовать стационарные криогенные резервуары. Такие резервуары, вместе с системой трубопроводов и необходимой запорной арматурой, формируют единое хранилище топливной системы. Для эффективной работы все элементы хранения должны быть оснащены надёжной вакуумной теплоизоляцией. Это оправдано тем, что расходы СПГ при его подаче в ракетные баки во время заправки существенно превышают расходы на подпитку, что необходимо учитывать при выборе диаметра топливопровода. При подпитке, когда расход минимален, требуется обеспечить поступление криожидкости в бак в однородной (жидкой) фазе, поскольку при низком расходе возможен процесс закипания.

Определение объема хранилища для стартового комплекса является ключевым этапом проектирования и эксплуатации системы хранения сжиженного природного газа. В зависимости от назначения, размеров и видов хранимого продукта криогенные резервуары отличаются друг от друга конструктивными особенностями и используемым материалом. Форма резервуаров для той или иной системы выбирается с учетом требуемого объема, удобства изготовления, перевозки и монтажа, эксплуатационных особенностей, а также требований к защите от внешних температурных воздействий.

Хранилище в целом и его составные элементы являются частью пневмогидравлической схемы заправки и должны обеспечивать выполнение технологических операций, быть удобными в эксплуатации и увязаны со строительной частью.

Современные криогенные резервуары имеют конструкцию, включающую внутренний сосуд, предназначенный непосредственно для хранения криопродукта, и внешний сосуд, играющий роль защитного кожуха. Для

изготовления внутреннего сосуда применяют материалы, устойчивые к воздействию хранимого вещества, такие как легированные стали или алюминий. Наружный кожух обычно изготавливается из углеродистой стали либо алюминия. Особенности конструкции резервуара во многом зависят от варианта крепления внутреннего сосуда к кожуху, что реализуется с помощью различных опорных или подвесных элементов. Между внутренней ёмкостью и кожухом создаётся изолированное пространство, которое вакуумируют и заполняют теплоизоляционным материалом – это может быть либо фольгированная экранная изоляция, либо порошкообразный утеплитель, выбор которых определяется как назначением резервуара, так и производственными стандартами завода-изготовителя. Поскольку в межстенном пространстве поддерживается вакуум, внешний кожух должен быть рассчитан на устойчивость к внешнему (атмосферному) давлению, чтобы предотвратить его деформацию.

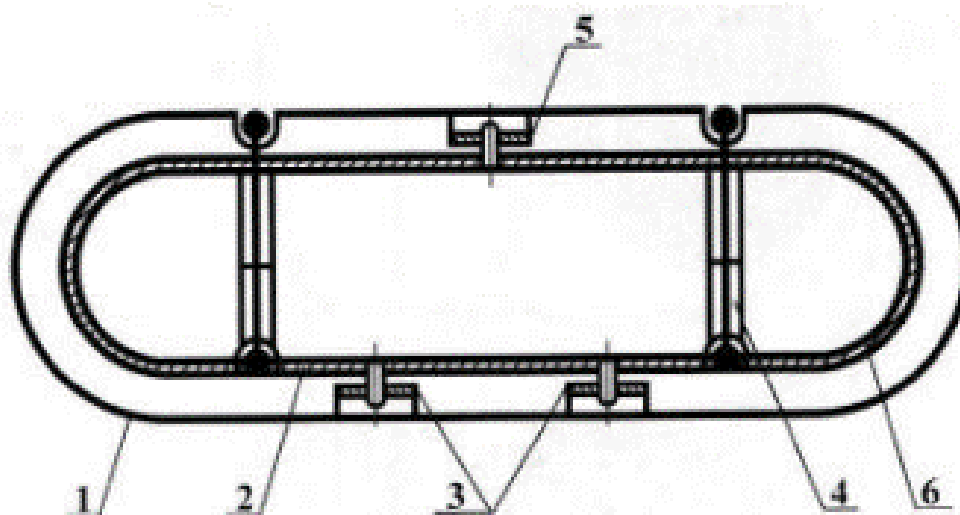


Рисунок 3 – Конструктивная схема криогенного резервуара (1 – кожух; 2 – теплоизоляция; 3,5 – дискные опоры; 4 – подвески; 6 – внутренний сосуд)

Для уменьшения «плескания» жидкости во внутреннем сосуде имеются продольные и поперечные волнорезы. Для доступа в сосуд в крупных резервуарах встраивают люки.

Резервуары заполняются жидкостью при помощи трубы, вводимой в сосуд сверху и достигающей его низа. Для выдачи продукта вытеснением служит испаритель-змеевик, работающий от тепла внешней среды и размещенный так, что жидкость в него поступает самотеком под давлением столба жидкости через специальный вентиль. Во избежание необходимости опорожнения резервуара при появлении течи, в крупных резервуарах все трубы, как правильно выводят через верх емкости.

К основным факторам, определяющим конструктивное решение в выборе параметров резервуара, следует отнести следующие:

- транспортное или стационарное исполнение;
- объем;
- горизонтальное или вертикальное исполнение;
- рабочее давление в сосуде;
- тип теплоизоляции емкости;
- способ выдачи криогенной жидкости;
- длительность хранения криогенной жидкости;
- вид применяемости криогенной жидкости;
- состояние криогенной жидкости;
- применяемость материалов сосуда, оболочки, элементов крепления;
- расположение элементов освидетельствования сосуда;
- запорная арматура.

Для расчета количества заправочных емкостей необходимо знать значения плотности горючего. Плотность СПГ принимаем равной плотности жидкой фазы метана как основного компонента СПГ [3, 4]:

$$\rho_{\Gamma} = 424 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

За объем резервуара принимается геометрический объем его внутренней емкости. Максимальный уровень заполнения резервуара продуктом должен быть не менее, чем на 1 м ниже узла сопряжения цилиндрической стенки с

самонесущим купольным перекрытием или внутренней поверхности подвешного перекрытия.

Для обеспечения заправки РКН в резервуарах хранилища стартового комплекса в заданное время должно быть накоплено необходимое количество компонентов ракетного топлива, обеспечивающее выполнение принятых технологических операций при подготовке РКН к пуску и ее пуске.

2.1 Расчет необходимых параметров для выбора резервуара

Необходимый объем хранилища складывается из основных циклов подготовки РКН к пуску:

- количество топлива для заправки баков первой и второй ступени;
- потери продукта, вызванные «стоянием» ракеты на старте в заправленном состоянии (выкипание компонента);
- потери при сливах и повторных заправках;
- объем заполнения заправочных трубопроводов от емкостей до баков ракеты-носителя;
- объем, теряющийся в ходе захолаживания трубопроводов, баков РН и оборудования системы до температуры кипения;
- объем, теряющийся при заправке и подпитки баков первой и второй ступени за счет внешнего теплового потока.

2.1.1 Количество и объем необходимого топлива

Масса горючего, в нашем случае СПГ, определяется по формуле:

$$M_{\Gamma} = \frac{M_{KT}}{1 + K_T}, \quad (1)$$

где K_T – действительное соотношение компонентов топлива для двигателя [2];

M_{KT} – массовое соотношение компонентов топлива жидкий кислород – метан.

Масса компонентов топлива I ступени:

$$M_{KT1cm} = 220 \text{ т.}$$

Находим массу горючего I ступени по формуле (1):

$$M_{Г1cm} = \frac{220}{1+3,5} = 48,89 \text{ т.}$$

Масса компонентов топлива II ступени:

$$M_{KT2cm} = 77 \text{ т.}$$

Находим массу горючего II ступени по формуле (1):

$$M_{Г2cm} = \frac{77}{1+3,5} = 17,11 \text{ т.}$$

Объем топлива, занимаемый данной массой, находится по формуле:

$$V = \frac{M}{\rho_{Г}}, \quad (2)$$

где M – общая масса горючего, используемого для заправки РКН.

Найдем общее количество горючего для заправки баков первой и второй ступени:

$$M = M_{Г1cm} + M_{Г2cm} = 48,89 + 17,11 = 66 \text{ т} = 66000 \text{ кг.} \quad (3)$$

Найдем объем, занимаемый данной массой по формуле (2):

$$V_{Г} = \frac{66000}{424} = 155,66 \text{ м}^3.$$

2.1.2 Объемы топлива, теряющиеся в заправочных трубопроводах

Криогенные трубопроводы служат для транспортировки криогенных веществ в топливные баки ракеты, а при необходимости по ним же может производиться возврат жидкости обратно в резервуары хранения. Основные линии заправочных систем, формируемые такими трубопроводами, могут

обладать значительной протяжённостью. При проектировании таких трубопроводов важно обеспечить их надёжную работу во всём диапазоне эксплуатационных температур: от +50 °С до температур кипения СПГ. Трубопроводы могут использоваться без теплоизоляции лишь в случаях, когда их протяжённость минимальна, продолжительность эксплуатации кратковременна, а скорость потока жидкости значительно высока. В остальных ситуациях для работы с криогенными веществами необходима теплоизоляция труб, чтобы ограничить приток тепла со стороны окружающей среды.

В современных промышленных криогенных трубопроводах наиболее часто применяются порошково-вакуумная и слоисто-вакуумная теплоизоляции. Особенно востребованы такие конструкции в заправочных системах, где внутренний трубопровод обычно выполняется из цельнотянутых или сварных труб из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т – материала с малым коэффициентом линейного расширения. Для изготовления внешнего кожуха используют либо нержавеющую, либо углеродистую сталь. Изолирующее пространство между трубой и кожухом может быть заполнено порошкообразными материалами, либо намотано слоями слоистой вакуумной изоляции с последующим созданием вакуума.

При проектировании и сооружении криогенных трубопроводов на стартовых площадках наибольшей эффективностью и удобством отличается вариант, когда секции труб изготавливаются и вакуумируются полностью на заводе-изготовителе, а на место монтажа поступают в уже готовом состоянии. На объекте такие секции соединяются между собой посредством сварки либо через фланцевые соединения, после чего места стыков дополнительно утепляются специальными теплоизолирующими лентами. Максимальная длина заводских секций определяется возможностями их транспортировки к месту установки. Кроме того, используется унифицированная система секций и стандартных элементов для установки трубопроводной сети, таких как отводы, тройники, гибкие металлорукава и опоры. Такой подход облегчает сборку системы и повышает её надёжность (рисунок 4, 5).

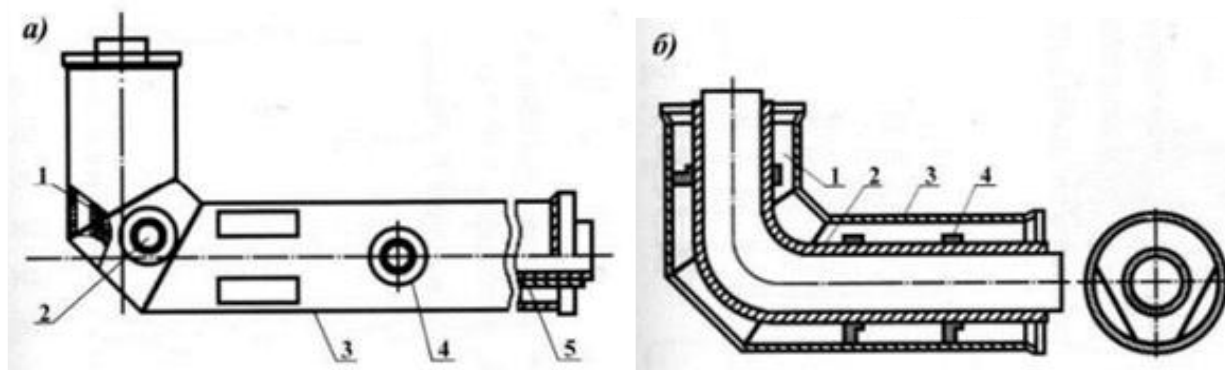


Рисунок 4 – Конструктивные схемы унифицированных колен (а – с цапфовыми опорами (1 – внутренняя труба; 2 – основная опора; 3 – кожух; 4 – вспомогательная опора, 5 - изоляция); б – с дисковыми опорами (1 – внутренняя труба; 2 – основная опора; 3 – кожух; 4 – дисковая опора))

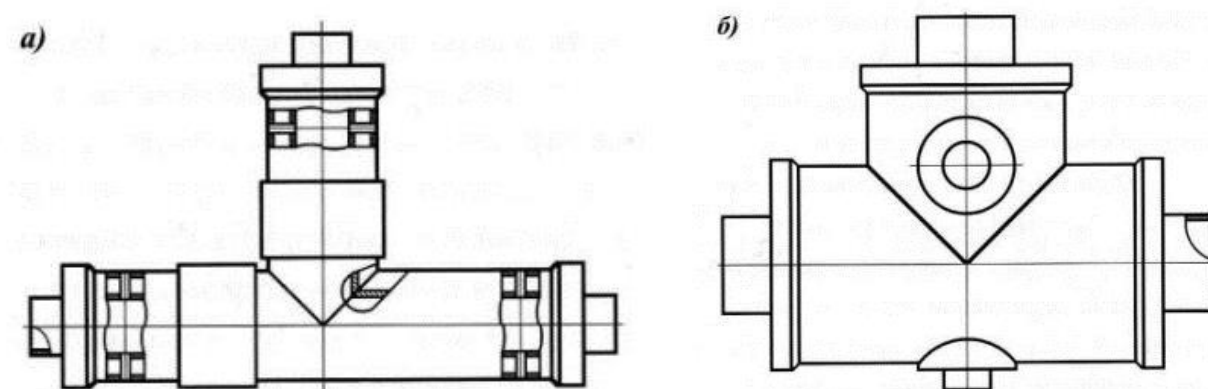


Рисунок 5 – Конструктивные схемы тройников унифицированных колен (а – с дисковыми опорами; б – с цапфовыми опорами)

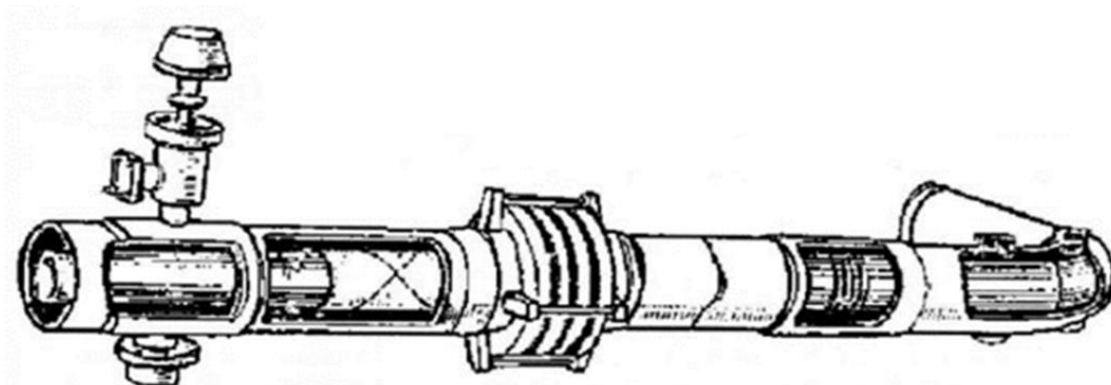


Рисунок 6 – Общий вид части криогенного трубопровода Ду=100 с сильфонным компенсатором, собранного из унифицированных секций

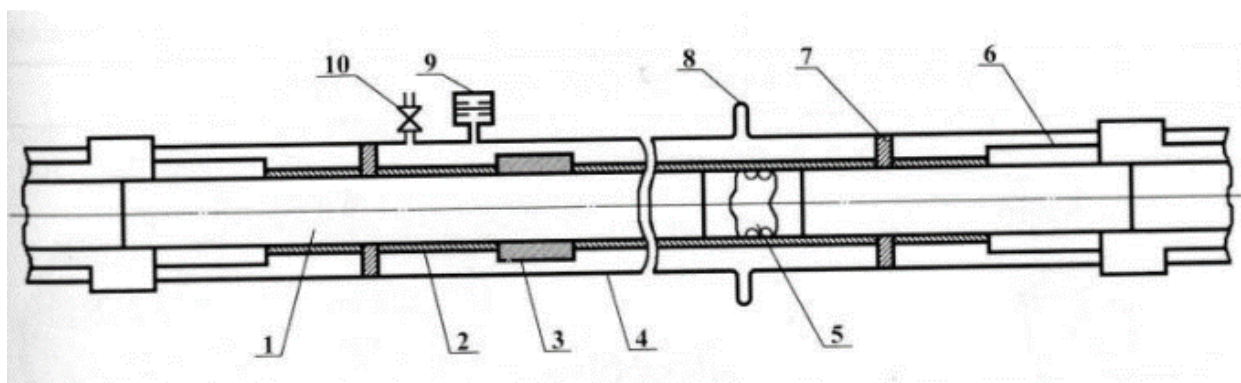


Рисунок 7 – Схема сечения криогенного трубопровода с автономной изоляционной полостью (1 – внутренняя труба; 2 – изоляция; 3 – адсорбционный насос; 4 – кожух; 5 – сильфонный компенсатор температурных напряжений внутренней трубы; 6 – тепловой мост; 7 – дисковая опора; 8 – линзовый компенсатор температурных напряжений кожуха; 9 – разрывная мембрана; 10 – вакуумный вентиль)

Сталь 12X18H10T является оптимальным выбором для трубопроводов напорной магистрали сжиженного природного газа благодаря своей высокой коррозионной стойкости, прочности и устойчивости к низким температурам, что обеспечивает надежность и долговечность системы в условиях агрессивной среды и при высоких давлениях. Кроме того, она хорошо сваривается и сохраняет механические свойства при изменении температуры, что делает её идеальной для использования в критически важных трубопроводах.

Объем заправочных трубопроводов определяется из выражения:

$$V_{\text{труб}} = L \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4}, \quad (4)$$

где L – оптимальное безопасное расстояние от СС до хранилища СПГ;

$d_{\text{вн}}$ – стандартный диаметр напорной магистрали, 100 мм.

Так как формулы для определения оптимального расстояния до хранилища СПГ для топливной пары «CH₄+O₂» нет, то определим формулу исходя из

значений тротилового эквивалента топлива и формулы для топливной пары «водород-кислород».

Таблица 4 – Тротиловый эквивалент для топливных пар

Горючее	Удельный тротиловый эквивалент
Водород [4, с.393]	27,706
Метан [6]	11,941

Формула для определения безопасного расстояния до хранилища компонента топлива:

$$L^{opt} = 5,91F\left(\frac{\overline{C}_{xp}}{C_{\kappa}}\right)^{0,6} M_0^{0,7}, \quad (5)$$

где M_0 - стартовая масса ракеты, 380 т.;

$F\left(\frac{\overline{C}_{xp}}{C_{\kappa}}\right)$ - функция, зависящая от компонента и определяемая эмпирическим

путем.

Значение функции для горючего «водород» - 5,139. Так как значение удельного тротилового эквивалента «водорода» больше в 2,32 раза, то значение функции для компонента топлива «метана» приблизительно примем:

$$F\left(\frac{\overline{C}_{xp}}{C_{\kappa}}\right) \approx 2,21. \quad (6)$$

Следовательно, формула для определения безопасного расстояния до хранилища метана:

$$L^{opt} = 5,91 \cdot 2,21^{0,6} \cdot M_0^{0,7}. \quad (7)$$

$$L^{opt} = 5,91 \cdot 2,21^{0,6} \cdot 380^{0,7} = 608,235 \text{ м.}$$

Найдем значение объема заправочных трубопроводов по формуле (4):

$$V_{мруб} = 608,235 \cdot \frac{\pi \cdot 0,10^2}{4} = 4,775 \text{ м}^3.$$

2.1.3 Объемы, теряющиеся в ходе расхолаживания трубопроводов

Масса продукта, теряющиеся в ходе расхолаживания трубопроводов находится по формуле, где в числителе показано, сколько требуется холода на охлаждение металла, в знаменателе – сколько тепла расходуется на кипение и прогрев 1 кг СПГ:

$$M_3 = \frac{(M^{Mem} + M^{Арм}) \cdot C_p^{Mem} \Delta T}{r + \varphi C_p^{Газ} \Delta T}, \quad (8)$$

где M^{Mem} – масса металла трубопровода, кг;

$M^{Арм}$ – масса металла арматуры, кг;

C_p^{Mem} – теплоемкость металлоконструкции, Дж/кг · град;

$C_p^{Газ}$ – теплоемкость газа, Дж/кг · град;

r – теплота испарения продукта при температуре кипения, Дж/кг · град;

φ – коэффициент использования тепла паров продукта, 0,85. [7]

Масса металла трубопровода определяется:

$$M^{Mem} = \pi(d_{вн} + \delta) \delta L \rho_{См}, \quad (9)$$

где δ – толщина стенки трубы, 0,006 м;

$\rho_{См}$ – плотность трубопровода, 7800 кг/м³;

$$M^{Mem} = \pi(0,1 + 0,006)0,006 \cdot 608,235 \cdot 7800 = 9474,42 \text{ кг.}$$

Масса арматуры трубопровода определяется:

$$M^{Арм} = V_{труб} \cdot \rho_{См}. \quad (10)$$

$$M^{Арм} \approx 4,775 \cdot 7800 = 37245 \text{ кг}.$$

Находим массу продукта на расхолаживание трубопроводов по формуле (8):

$$M_3 = \frac{(9474,42 + 37245) \cdot 320 \cdot (298 - 110)}{510227 + 0,85 \cdot 2237 \cdot (298 - 110)} = 3239,2 \text{ кг}.$$

Объем продукта на расхолаживание находим по формуле:

$$V_3 = \frac{M_3}{\rho_{ср.ком}} = \frac{3239,2}{424} = 7,64 \text{ м}^3. \quad (11)$$

2.1.4 Объем топлива, теряющийся при заправке

Для определения объема, теряющегося при заправке, за счет внешнего стационарного теплового потока необходимо определить стационарный тепловой поток к изолированным трубопроводам.

Трубопроводы напорной магистрали покрыты изоляцией K-FLEX. Вокруг изоляции залит слоем пенополиуретана, и засыпан насыпным грунтом [8]. Все остальные трубопроводы покрыты изоляцией K-FLEX.

Рассчитаем теплоприток через многослойную цилиндрическую изоляционную стенку на 1 метр длины, пренебрегая тепловым сопротивлением самой трубы и сопротивлением теплоотдачи от трубы к СПГ [9]:

$$q_{труб} = \frac{\pi \Delta T}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{D}{d}}, \quad (12)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м · К;

α_n – коэффициент теплопередачи, Вт/м² · К;

D – внешний диаметр теплоизоляции, мм;

d – внешний диаметр трубопровода, мм.

Коэффициент теплоотдачи находим из выражения:

$$\alpha_n = 10,3 + 0,052 \cdot \Delta T = 21,2. \quad (13)$$

$$q_{\text{труб}} = \frac{\pi \cdot 188}{\frac{1}{21,2} + \frac{1}{2 \cdot 0,024} \ln \frac{114,5}{80}} = 78,6 \text{ Вт/м}.$$

Из полученных значений находим потери компонента топлива:

$$Q = q_{\text{труб}} \cdot L_{\text{труб}} + q_{\text{маг}} L_{\text{маг}}, \quad (14)$$

где $q_{\text{маг}}$ – теплота, подводимая к напорной магистрали [4].

$$Q = 78,6 \cdot 608,235 + 5,3 \cdot 608,235 = 51025,94 \text{ Вт}.$$

Тогда объем испарения найдем из выражения:

$$V_{\text{исп}} = \frac{tQ}{r\rho}, \quad (15)$$

где t – время заправки РН.

Время заправки РН найдем из выражения:

$$t = \frac{V_z}{F g_{\text{всас}}}, \quad (16)$$

где F – поперечное сечение трубопровода;

$g_{\text{всас}}$ – скорость течения компонента, 2 м/с.

Поперечное сечение трубопровода, диаметром 80 мм найдем из выражения:

$$F = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,00503 \text{ м}^2. \quad (17)$$

$$t = \frac{155,66}{0,00503 \cdot 2} = 15473,16 \text{ с} = 257,9 \text{ мин.}$$

$$V_{исп} = \frac{15473,163 \cdot 51025,94}{510227 \cdot 424} = 3,647 \text{ м}^3.$$

2.1.5 Объемы топлива для заправки РКН

Необходимый объем СПГ для обеспечения заправки одного РН найдем из следующего выражения:

$$V_{СПГ} = V_{Г} + V_{мруб} + V_{з} + V_{исп} = 155,66 + 4,775 + 7,64 + 3,647 = 171,722 \text{ м}^3. \quad (18)$$

2.1.6 Объемы резервуары

Объем хранилища СПГ найдем из следующего выражения:

$$V_X = k \cdot V_O, \quad (19)$$

где k – коэффициент запаса, учитывающий возможность аварийной дозаправки носителя, испарение СПГ и 90 % заполнение резервуара.

Необходимый объем хранилища для одного пуска:

$$V_X = 2,4 \cdot 171,722 = 412,1328 \text{ м}^3.$$

Исходя из литературного анализа можно сделать вывод, что преимущественно на космодромах используются криогенные резервуары компании ОАО «Криогенмаш». По данным таблицы 2 для нужд стартового комплекса третьей очереди строительства космодрома «Восточный» проектируем 3 горизонтальных криогенных резервуара РЦГ-250 (один резервный).

3 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

Целью исследовательской части является получение детальной информации о поведении СПГ в резервуаре при различных режимах эксплуатации и оценки механических нагрузок на конструкцию. Исследование резервуара, путем моделирования процессов, связанных с эксплуатацией резервуара для хранения СПГ будем проводить с использованием программного обеспечения SolidWorks Flow Simulation.

Первое моделирование сосредоточено на анализе процесса наполнения резервуара, при котором задается расход на входе СПГ. В ходе моделирования исследуется динамика заполнения бака, получаются распределения массовых фракций СПГ и воздуха, а также карты давления внутри резервуара. Это позволяет понять характер распределения параметров в процессе заправки и выявить потенциальные зоны с повышенными нагрузками.

Второе моделирование выполнено для ситуации, когда бак полностью заполнен, и происходит процесс вытекания СПГ. Анализ включает изучение течения и распределения давления во время вытекания, что важно для оценки устойчивости конструкции и безопасности эксплуатации.

Третье моделирование представляет собой связанный гидродинамико-механический расчет. Данное моделирование позволяет посмотреть влияние нагрузок, возникающих при критических внутренних давлениях.

3.1 Подготовка ПО SolidWorks для моделирования процессов

Создаем трехмерную модель выбранного резервуара в ПО SolidWorks.

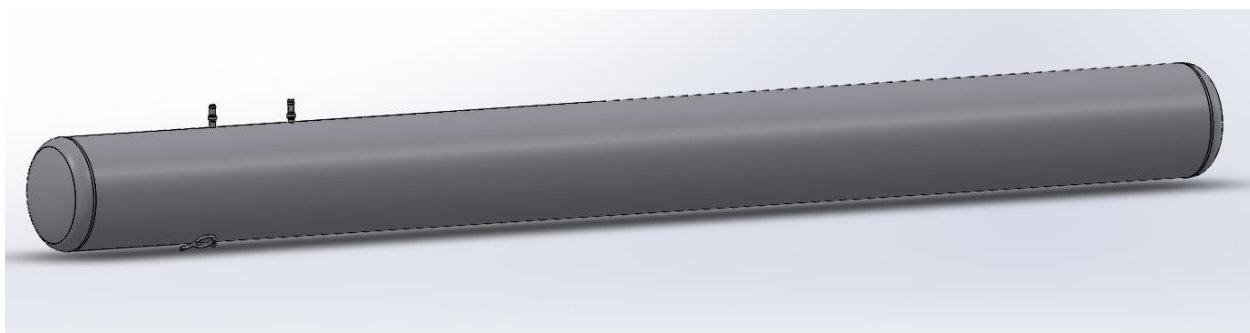


Рисунок 8 – Трехмерная модель резервуара РЦГ-250

Для использования течения жидкости внутри цистерны необходимо убедиться, что модель замкнута, геометрия герметична (нет разрывов или пересечений поверхностей). В нашем случае в модели присутствуют патрубки для входа СПГ и выхода воздуха, на которые при моделировании необходимо установить заглушки.

Моделирование процессов проводится в инженерном модуле программы SolidWorks, для этого иницилируем модуль, создаем новый проект и задаем необходимые для нас параметры проекта.

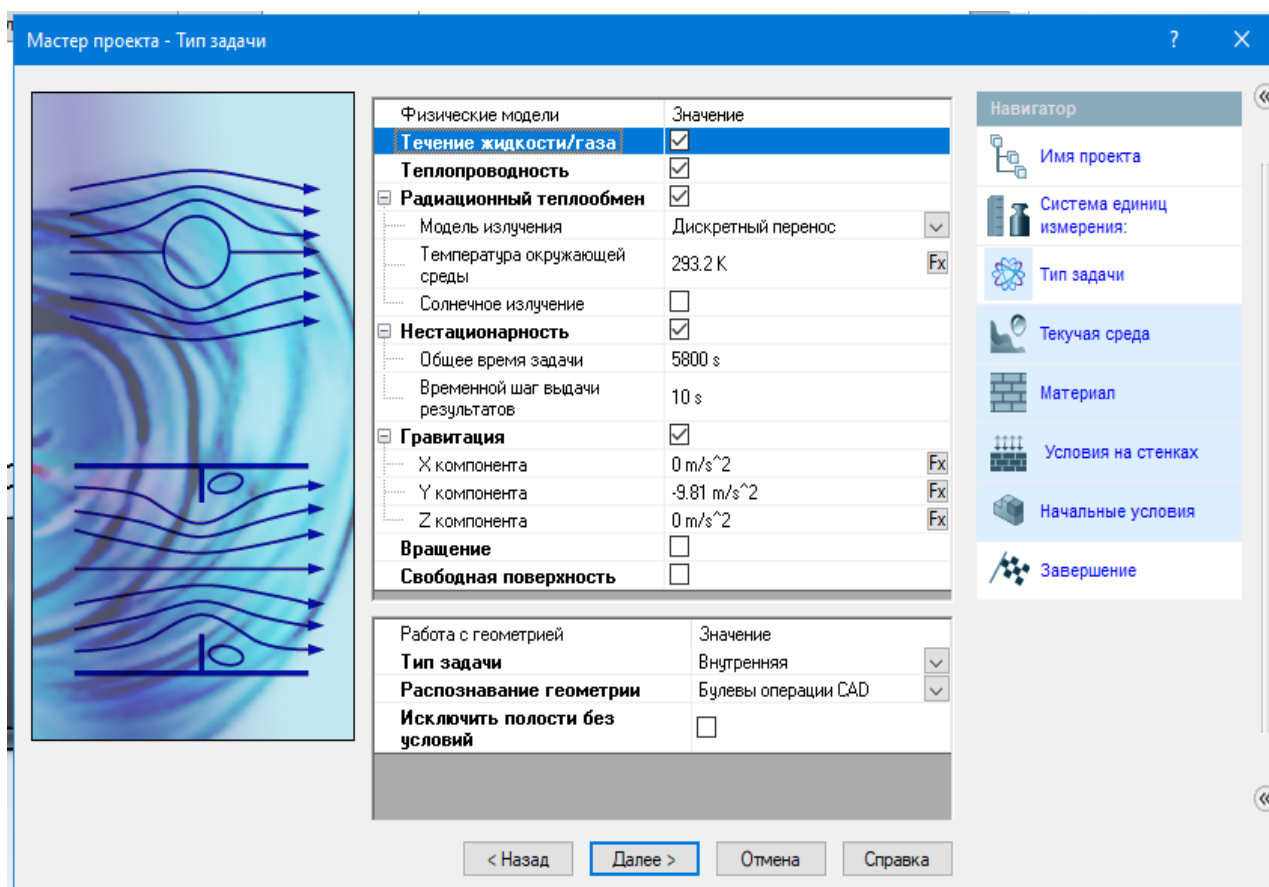


Рисунок 9 – Заданные параметры проекта

Определяем рабочие параметры среды, для этого добавляем СПГ в базу материалов, с характеристиками, указанными в таблице 5.

Таблица 5 – Рабочие параметры моделирования

Наименование	Значение
Плотность (при минус 162°C), кг/м ³	~ 424

Удельная теплоемкость в жидком состоянии (C_p), кДж/(кг·К)	4
Удельная теплоемкость в газообразном состоянии (C_p), кДж/(кг·К)	2,35
Теплопроводность в жидком состоянии (λ), Вт/(м·К)	0,15
Теплопроводность в газообразном состоянии (λ), Вт/(м·К)	0,04
Тепло испарения (L), кДж/кг	520
Критическая температура, °C (K)	-82,6 (190,6)

Добавляем воздух, как вторую среду (для вытеснения из цистерны продукта). В качестве материала используем сталь 12X18H10T импортированную из модели SolidWorks.

Для максимального поглощения тепла из внешней среды выберем модель абсолютно черного тела. Задаем параметры внешней среды на рисунке 10.

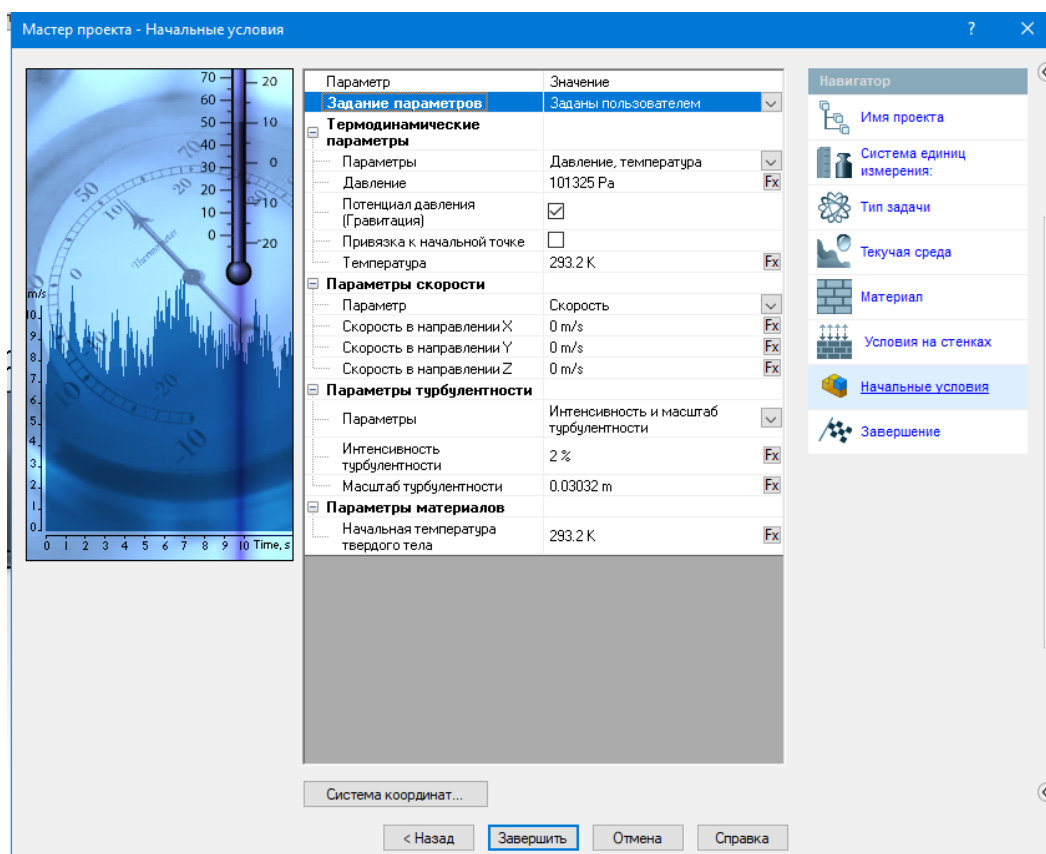


Рисунок 10 – Параметры внешней среды

Для настройки граничных условий используем инструменты создания заглушек для закрытия геометрии на входных и выходных патрубках, с заданными для всего проекта материалом стали X18H10T.

Для настройки входного условия на патрубок для подачи СПГ задаем граничное условие поступления его в цистерну объемный расход $0,05 \text{ м}^3/\text{с}$, что соответствует $180 \text{ м}^3/\text{час}$ (скорость подачи для цистерн малой емкости), установив температуру поступающей жидкости 113 К .

Задаем параметры выходного условия патрубке для выхода воздуха и зададим граничное условие давления окружающей среды (указываем внутреннюю поверхность заглушки, при необходимости используем сечения модели или скрываем ее части).

Задаем внутренние поверхности, как реальные стенки. В нашем случае будут применяться параметры выбранного материала. Создаем глобальную сетку для всей системы и локальную сетку для патрубков (рисунок 12).

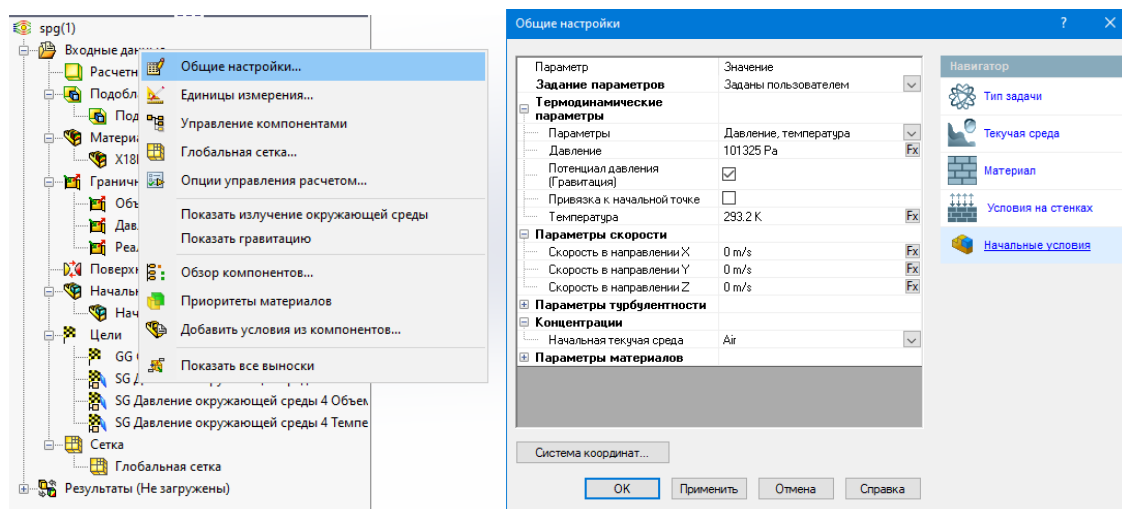


Рисунок 11 – Параметры начальных условий

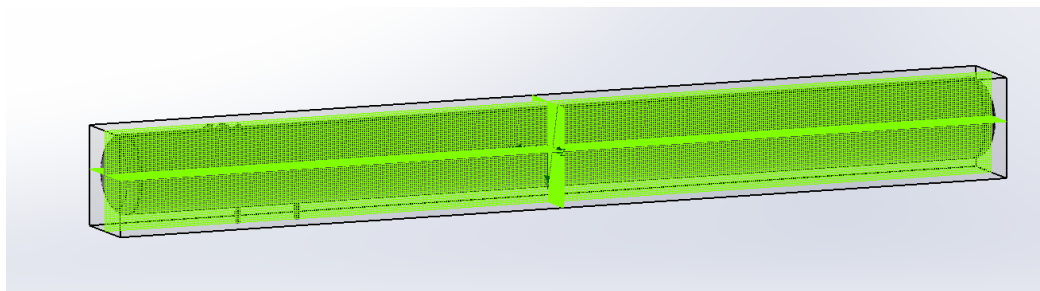


Рисунок 12 – Глобальная и локальная сетка

3.2 Моделирование процесса заполнения резервуара

Перед запуском моделирования процесса заполнения резервуара задаем параметры управления расчетом, как на рисунке 13.

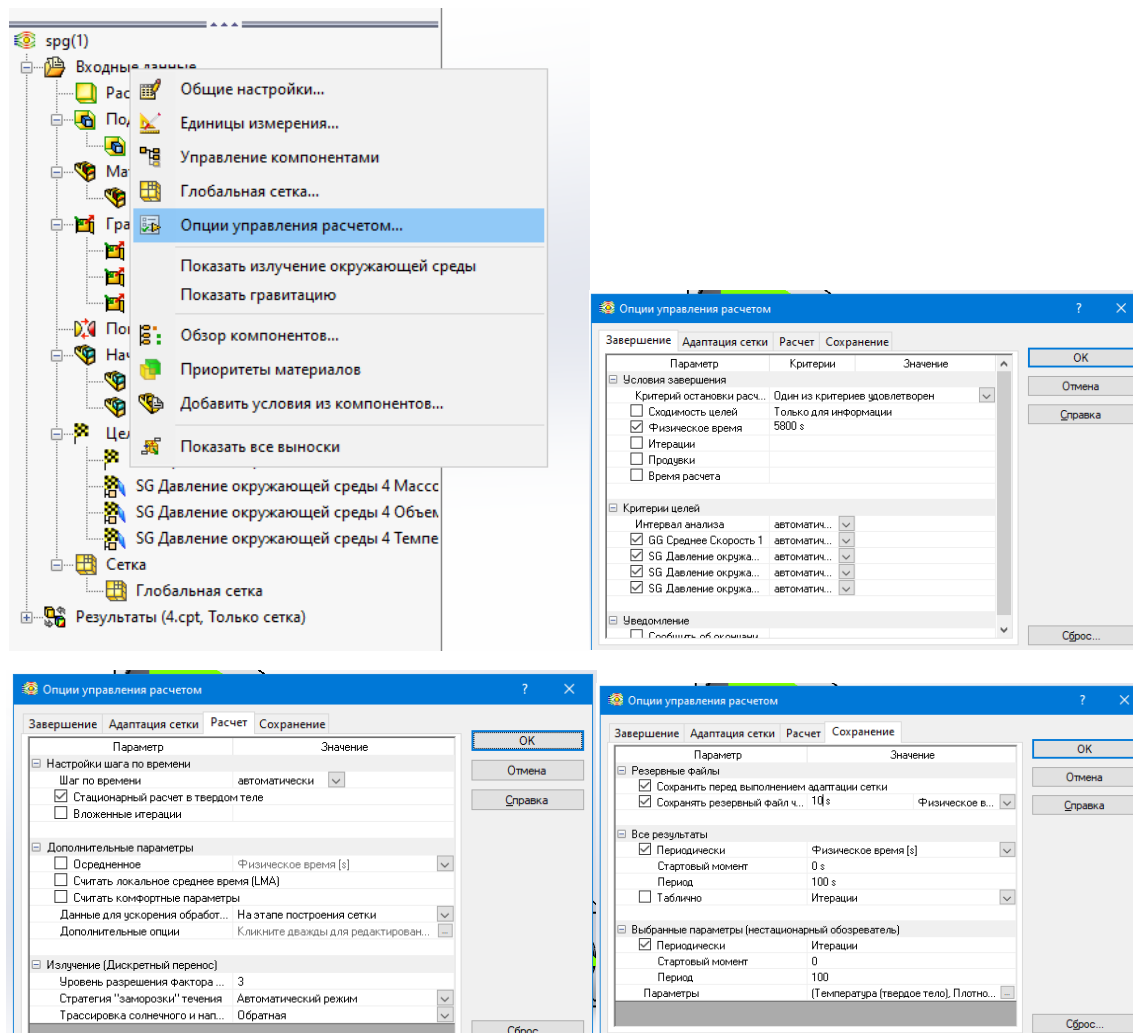


Рисунок 13 – Параметры управления расчетом

Для визуализации потока используем раздел картины на сечении для отображения распределения СПГ и воздуха. Результаты расчетов приведены в приложении А.

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что на начальных этапах заливки СПГ в цистерну возникает сложный динамический процесс, при котором холодный сжиженный газ (113 К) интенсивно взаимодействует с более

теплым воздухом, находящимся внутри резервуара. В этот момент наблюдается несколько критических явлений:

- турбулентное смешивание СПГ с воздухом приводит к резкому тепловому удару, вызывающему мгновенное испарение части жидкости (так называемый "флэш-эффект");
- хаотичные вихревые потоки создают зоны с неравномерным распределением температуры и давления, что значительно увеличивает скорость образования паров кипения;
- ударные нагрузки на конструкцию цистерны при таком режиме заполнения могут сокращать срок ее службы. Поэтому именно для баков СПГ рекомендуется использовать стабилизаторы потока газа.



Рисунок 14 – Стабилизатор потока газа

Стабилизатор потока газа – это устройство, устанавливаемое на входном патрубке, выполняет несколько функций. Основная задача - преобразование турбулентного потока в ламинарный за счет специальной конструкции, которая может включать перфорированные пластины, систему каналов или каскадные камеры. При прохождении через стабилизатор скорость потока СПГ снижается с типичных 3-5 м/с до безопасных 0,5-1 м/с. Одновременно происходит

равномерное распределение жидкости по сечению цистерны, что предотвращает локальные перепады температуры. Важно отметить, что качественный стабилизатор снижает интенсивность испарения на 30-50 % уже на начальной стадии заполнения, так как минимизирует площадь контакта холодной жидкости с теплым воздухом. Дополнительным преимуществом становится защита от гидроударов. В традиционной системе при открытии клапана возникает волна давления. Стабилизатор сглаживает этот импульс, распределяя его по времени. Современные конструкции также учитывают необходимость постепенного вытеснения воздуха - специальные каналы позволяют газам равномерно покидать резервуар без образования опасных зон повышенного давления. При проектировании стабилизаторов потока для СПГ учитываются уникальные свойства среды. Материалы должны сохранять прочность при криогенных температурах. Геометрия подбирается таким образом, чтобы избегать застойных зон, где возможно накопление примесей. Оптимальным считается решение, когда уменьшается число Рейнольдса потока ниже 2000, что гарантирует ламинарный режим течения. На практике это достигается комбинацией расширяющихся камер и дросселирующих элементов. Экономический эффект от применения успокоителей проявляется в нескольких аспектах. Снижение потерь на испарение сохраняет до 2-3 % продукта при каждой операции заправки. Увеличение межремонтного интервала оборудования за счет отсутствия ударных нагрузок дает еще 15-20 % экономии. Наконец, повышается безопасность - статистика показывает, что 40 % аварий при работе с СПГ связаны именно с нарушениями режимов заполнения и опорожнения резервуаров.

3.3 Моделирование процесса опустошения резервуара

Стартовое состояние для моделирования процесса опустошения резервуара соответствует конечному состоянию соответствующему процессу заполнения бака.

В начальных условиях задаём степень заполнения цистерны.

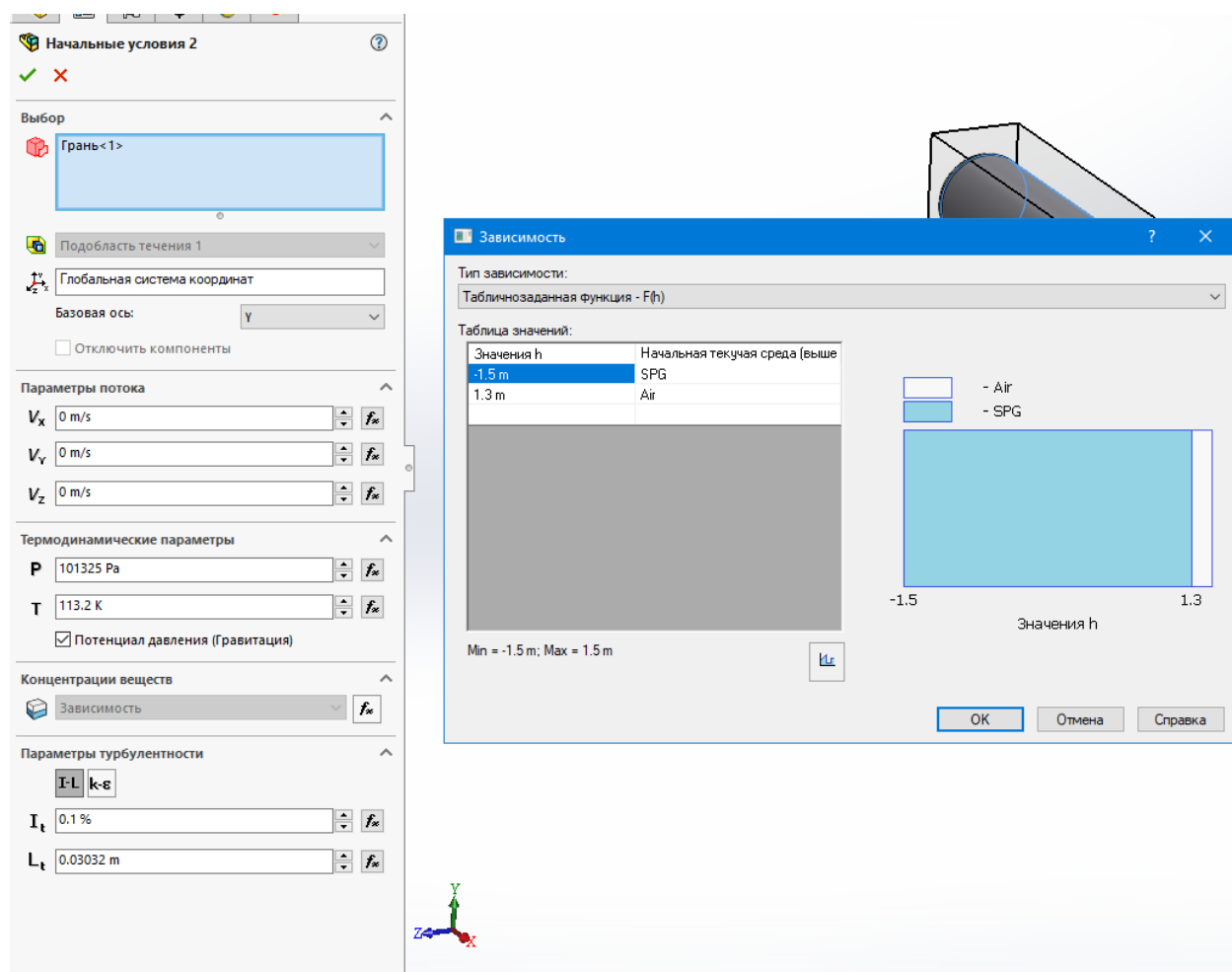


Рисунок 15 – Задаем степень заполнения цистерны

На нижний патрубок прописываем граничное условие – деление окружающей среды. На верхний патрубок задаем подачу вытесняющей смеси (обычного газообразного СПГ из испарителя) под давлением 2 бар. Настройки сетки аналогичные моделированию процесса заполнения резервуара, как на рисунке 12. Результаты расчетов моделирования приведены в приложении Б.

По результатам видно, что в конце процесса по краям цистерны формируются зоны турбулентности. Распределение числа Прандтля (отношение кинематической вязкости к температуропроводности, характеризует соотношение между интенсивностью молекулярного переноса импульса и молекулярного переноса теплоты в потоке) при выдувании сжиженного природного газа из цистерны отражает сложное взаимодействие теплопередачи и гидродинамических процессов. В центральном слое СПГ, где число Прандтля

достигает 2,4 преобладают условия, при которых импульс распространяется быстрее тепла, что характерно для ламинарных режимов течения с доминированием вязкостных эффектов. Это может быть связано с относительно стабильной температурой и давлением в центре цистерны, где теплоперенос замедлен из-за слабого перемешивания и меньшего влияния внешних факторов. Однако на границах – у стенок цистерны, на концах бака и в зоне контакта с вытесняющей средой число Прандтля снижается до 1.5, указывая на усиление теплопереноса. Такое снижение объясняется турбулентными эффектами, охлаждением стенок, фазовыми переходами (например, частичным испарением СПГ) или изменением термодинамических свойств материала.

Неоднородность распределения числа Прандтля создает риски для процесса выдувания. В центральной зоне с высоким значением поток может двигаться быстрее, формируя канал преимущественного истечения, что приводит к неравномерному опорожнению цистерны и остаточным объемам СПГ у стенок. Кроме того, разная интенсивность теплообмена в зонах с низким и высоким числом Прандтля способствует возникновению температурных градиентов. На границе с вытесняющей средой (газом) резкие изменения свойств СПГ, связанные с испарением, могут провоцировать гидродинамическую неустойчивость.

Динамика процесса требует внимания: так как по мере опустошения цистерны давление падает, что меняет режим течения (переход от ламинарного потока к турбулентному) и, как следствие, распределение числа Прандтля.

С точки зрения безопасности, зоны с низким числом Прандтля требуют особого контроля, так как в них возможны локальные переохлаждения, испарение СПГ и образование газовых пробок. Расположение в одной части цистерны клапанов для нагнетания вытесняющей смеси (обычно СПГ из испарителя) и патрубка заборника жидкой фракции приводит к тому что в цистерне формируются циркулирующие потоки вытесняющие жидкую фракцию СПГ в дальнюю от патрубка заборника часть цистерны, параллельно способствуя интенсивному испарению. Данные факторы приводят к и

неполному извлечению СПГ из цистерны. Рекомендацией является установка цистерны под небольшим наклоном в сторону патрубков или выбор резервуаров для эксплуатации с разнесенными клапанами вытесняющей смеси и патрубка заборника на диаметрально противоположенные концы цистерны.

3.4 Моделирование нагрузок, возникающих при критических внутренних давлениях

В ходе проведенного комплексного моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов в цистерне для хранения сжиженного природного газа было установлено, что в штатных режимах эксплуатации, включая процессы заполнения, хранения и слива, максимальное зафиксированное давление в системе не превышало значения 1,5 бар. Данный результат был получен при моделировании заполнения и слива СПГ при контакте с атмосферой. Однако при проектировании ответственных криогенных емкостей принципиально важным является учет возможности возникновения нештатных ситуаций и аварийных режимов работы оборудования. Особое внимание было уделено анализу потенциально опасных явлений, связанных с возможными гидроударными процессами при интенсивном испарении СПГ, которые могут возникать при нарушении герметичности системы, резком изменении температурных условий или отказах систем безопасности. Именно поэтому механический анализ надежности конструкции будем выполнять для существенно более высокого диапазона давлений от 2 до 5 бар, что обеспечивает необходимый запас прочности и соответствует требованиям современных международных стандартов по проектированию криогенного оборудования. Такой подход позволяет гарантировать безопасную эксплуатацию цистерны не только в нормальных рабочих условиях, но и при возникновении различных нештатных ситуаций, включая частичный отказ систем контроля давления, внешние тепловые воздействия или ошибки оператора.

Для проведения моделирования необходимо запустить новое исследование, выбрать поверхности во внутренней полости и задать необходимые значения проекта как на рисунке 16.

Так, как на объекте присутствуют элементы предельно большие (размер самого резервуара), так и предельно маленькие токи контакта бака с патрубками, то используем элемент управления сеткой. Заглушки, добавленные в модель, ранее удаляем и запускаем моделирование. Результаты расчетов приведены в приложение В.

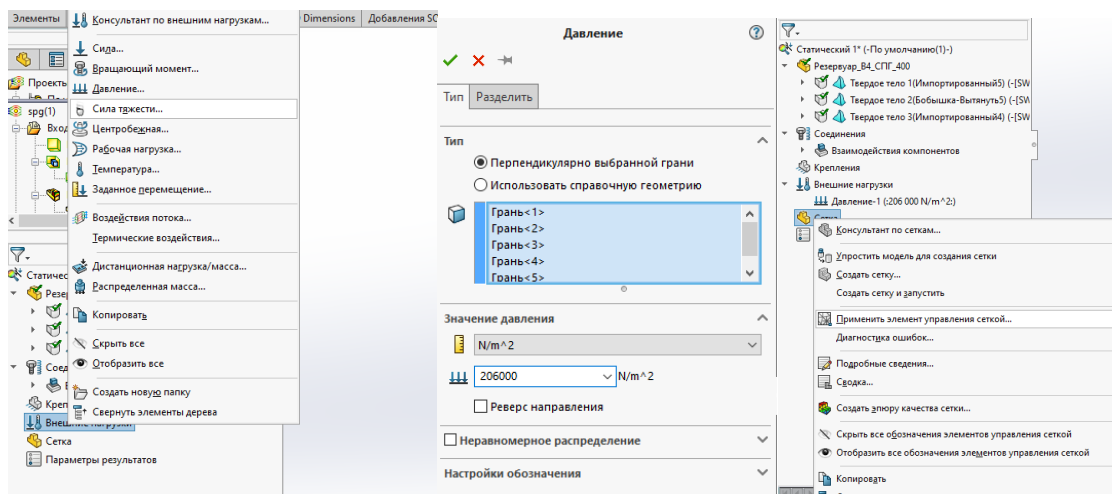


Рисунок 16 – Настройка моделирования

Проведенные расчеты на прочность и устойчивость конструкции подтвердили, что даже при возникновении экстремальных нагрузок, значительно превышающих рабочие параметры, цистерна сохраняет свою герметичность и структурную целостность, что является критически важным для обеспечения безопасности при транспортировке и хранении сжиженного природного газа.

Для оценки запаса прочности конструкции обычно используется коэффициент запаса прочности (или коэффициент безопасности), который определяется как отношение предела текучести материала к максимальным рабочим напряжениям:

Коэффициент запаса прочности определяется по формуле:

$$n = \frac{\sigma_{тек}}{\sigma_{раб}}, \quad (20)$$

где $\sigma_{тек}$ – предел текучести материала;

$\sigma_{\text{раб}}$ – максимальные рабочие (предельные) напряжения.

В нашем случае:

Предел текучести материала ($\sigma_{\text{тек}}$) = $2,7 \cdot 10^8$ Па.

Предельные напряжения для 5 бар ($\sigma_{\text{раб}}$) = $1,55 \cdot 10^8$ Па.

По формуле (20):

$$n = \frac{2,7 \cdot 10^8}{1,55 \cdot 10^8} \approx 1,74 \text{ Па.}$$

Коэффициент запаса прочности 1,74 означает, что конструкция может выдержать нагрузки, превышающие предельные напряжения на 74 % перед достижением предела текучести материала.

В зависимости от области применения, требуемый коэффициент запаса прочности может варьироваться. Обычно для различных инженерных конструкций требуются следующие значения:

Для статических нагрузок и конструкций с низким уровнем риска: 1,5 - 2,0.

Для динамических нагрузок, ударных нагрузок или конструкций с высоким уровнем риска: 2,0 - 3,0 и выше.

Таким образом, коэффициент запаса прочности 1,74 (при использовании предельного давления 5 бар для данного типа цистерн) может быть достаточным для конструкций, работающих в условиях статических нагрузок и низкого уровня риска.

Однако для сейсмоопасных регионов коэффициент запаса прочности должен быть в диапазоне от 3 до 5, соответственно предельное давление не должно превышать 3 бар.

Рассматривая поведение материала в упругой зоне на основе зависимости эффективной деформации (ESTRN) от приложенного давления. Представленные данные показывают, что при давлении 2 бар эффективная деформация составляет $2,03 \cdot 10^{-4}$, а при 5 бар $5,23 \cdot 10^{-4}$. Такая зависимость демонстрирует четкую линейную закономерность, характерную для упругой области деформации. В упругой зоне материал ведет себя предсказуемо: деформации

являются полностью обратимыми, отсутствуют остаточные изменения формы после снятия нагрузки, и соблюдается прямая пропорциональность между напряжением и деформацией. Отношение деформаций практически совпадает с отношением давлений, что подтверждает линейный характер зависимости и работу материала в упругой области. Небольшое расхождение значений может объясняться погрешностями измерений или неидеальными граничными условиями.

Анализ величины деформаций позволяет сделать выводы о жесткости материала. При относительно низких давлениях наблюдаемые деформации составляют доли процента (0,0203 % при 2 бар и 0,0523 % при 5 бар), что типично для многих конструкционных материалов в упругой области. Важно отметить, что полученные значения деформаций существенно ниже типичного предела текучести для большинства конструкционных материалов (обычно 0,1-0,2 %), что однозначно указывает на работу в упругой зоне.

4 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Объектом исследования в рамках данной дипломной работы является криогенный резервуар для хранения сжиженного природного газа. Транспортировка, монтаж и эксплуатация криогенного оборудования связана с возникновением различных рисков для здоровья и безопасности, как работников, так и предприятия:

- нарушение правил транспортировки и монтажа резервуара может привести к серьезным последствиям, включая аварии с выбросами сжиженного природного газа, повреждение оборудования, экологическим загрязнением, экономическим убыткам для компании;

- обморожение кожных покровов и тканей при воздействии пониженных температур. Оптимальная и допустимая температура поверхностей резервуара, ограждающих его устройств, устанавливается согласно СанПиН 2.2.4.3359-16;

- технология сжижения природного газа, в том числе СПГ, относится к категории А взрывопожароопасного производства [19]. Согласно действующим нормативам «Взрыво- и пожароопасные среды при проектировании электрических установок и силовых агрегатов», природный газ относится к взрывоопасным газообразным средам (Класс II, Категория В).

Согласно требованиям Госгортехнадзора России, организации, эксплуатирующие ОПО к работе с резервуаром, допускаются лица, достигшие восемнадцатилетнего возраста, прошедшие медицинское освидетельствование, изучившие устройство резервуара, правила эксплуатации и технического обслуживания, технику безопасности, а также инструкции, действующие в эксплуатирующей организации. Обслуживающий персонал должен пройти обучение, аттестацию и иметь удостоверение на право эксплуатации и обслуживания резервуара в соответствии с Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности «Правилами промышленной

безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением».

4.1 Меры безопасности

4.1.1 Меры безопасности при погрузке и разгрузке резервуара

Для проведения погрузочно-разгрузочных работ резервуар имеет в своей конструкции на наружной поверхности элементы для строповки, такие как, цапфы, ушки, серьги, скобы.

Погрузка и разгрузка резервуара проводится под руководством лица, ответственного за безопасное производство работ по перемещению грузов кранами.

До начала работ по погрузке и разгрузки резервуара с помощью кранов необходимо:

- получить разрешение ответственного лица за безопасное производство работ, сообщить крановщикам вес резервуара;
- проверить освещение на месте, где будет проводиться подъем и перемещение;
- использовать только краны, испытанные в соответствии с требованиями к грузоподъемным средствам, имеющие соответствующие разрешительные документы.

Строповка резервуара при перемещении с помощью двух кранов производится в соответствии с рисунком 49 за элементы строповки, расположенные на наружной поверхности резервуара.

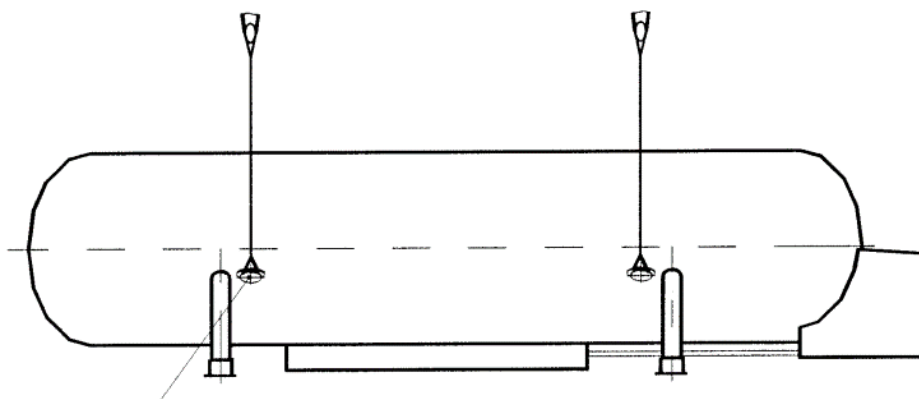


Рисунок 17 – Строповка резервуара двумя кранами

Строповка резервуара при перемещении одним краном проводится по рисунку 50. Длина тросов должна выбираться таким образом, чтобы угол между ними у крюка не превышал 90° . При такой схеме строповки тросы не должны крепиться к резервуару по диагонали относительно оси резервуара. Допускается применение траверсы, длина тросов при этом выбирается такой, чтобы угол между тросом и горизонтом был не менее 45° .

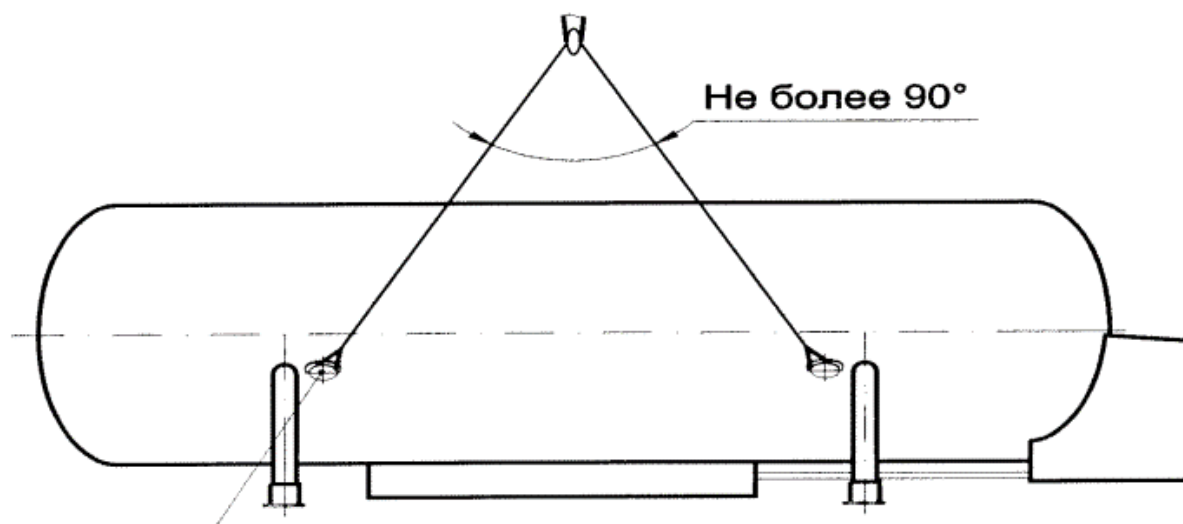


Рисунок 18 – Строповка резервуара одним краном

При подъеме, перемещении и установке резервуара на подвижный железнодорожный состав обслуживающий состав обязан проверить следующие требования:

- в зоне подъема и перемещения резервуара не допускать присутствия лиц, не связанных с проведением его транспортировки и укладки;
- крановщики обязаны выполнять только команды, подаваемые старшим стропальщиком;
- начало выполнения операции кранами, а также изменения направления движения должны сопровождаться звуковыми сигналами крановщика;
- для проверки работоспособности тормоза кранов резервуар поднять на высоту 100-200 мм и дать выдержку;

- нижние части резервуара с возможными элементами упаковки при перемещении кранами должны находиться не менее чем на 0,5 м выше встречающихся на пути предметов;
- допустимый уклон при погрузке резервуаров не более 1:50;
- запрещается строповка резервуаров за консольные опоры, патрубки и другие элементы, если это не оговорено документацией на резервуар.

4.1.2 Меры безопасности при монтаже резервуара

В соответствии с ГОСТ 31385-2016 последовательность сварки, контроль сварных швов и испытаний сварных соединений производить по требованиям монтажной документации системы, в составе которой будет эксплуатироваться резервуар. Не допускается сварка к резервуару в местах, не указанных в монтажной документации системы. Не допускается использовать оболочку и патрубки резервуара для подключения заземляющего контура при проведении работ электродуговой сварки.

Испытание пробным давлением соединений резервуара с трубопроводами и арматурой системы должно производиться пневматически с применением акустико-эмиссионного контроля с использованием воздуха или азота.

Согласно [21] на площадке размещения резервуара должен быть контур заземления, к которому подсоединяется резервуар заземляющими проводниками. Сопротивление заземляющего контура при защите только от накопления статического электричества не должно быть более 100 Ом. Подсоединение к заземляющему контуру производится к бобышкам в двух, противоположных по длине резервуара, местах.

4.1.3 Меры безопасности при эксплуатации резервуара

Перед пуском резервуара в эксплуатацию он должен быть поставлен на учет в органах Ростехнадзора в соответствии с Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности «Правилами промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением». В формуляре и паспорте резервуара необходимо проверить отметки

о проведении первичного технического освидетельствования, срока следующего (периодического) ТО и разрешении на пуск в эксплуатацию в составе системы хранения. Также монтаж резервуара на фундамент, по требованиям документации системы, в которой он используется должен быть завершен.

Эксплуатация резервуара должна осуществляться в строгом соответствии с требованиями Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правил промышленной безопасности при использовании оборудования, работающего под избыточным давлением» и инструкции по эксплуатации на систему, в составе которой эксплуатируется резервуар.

Согласно ГОСТ Р 56217-2014 при заполнении резервуара сжиженным природным газом контролировать давление в резервуаре и уровень. При заправке продуктом запрещается превышать максимальный уровень, равный 95 % от вместимости резервуара. Рабочее давление не должно превышать величины 0,6 МПа.

Сброс паров продукта из внутреннего сосуда через предохранительные клапаны в безопасное место, которое должно быть обязательно предусмотрено в составе системы, например, в дренажные стояки.

В соответствии с ГОСТ Р 54317-2011 при эксплуатации необходимо контролировать отсутствие масла и жиров на поверхностях, контактирующих продуктом.

При эксплуатации резервуара необходимо соблюдать следующие правила:

- обслуживающий персонал должен быть обеспечен спецодеждой и защитными очками;
- при работе пользоваться только штатным и чистым, без следов масла и грязи инструментом;
- все работы по подъему и перемещению оборудования должны выполняться под руководством ответственного лица;
- обслуживающий персонал резервуара должен немедленно докладывать руководителю работ обо всех обнаруженных неисправностях;

– любое лицо из обслуживающего персонала должно уметь оказывать первую помощь пострадавшему от отравления растворителями, обморожения и ожогов и применять средства пожаротушения.

4.1.4 Меры безопасности при работе с криогенными продуктами

При работе с криопродуктами необходимо помнить, что криогенные жидкости при попадании на открытые или слабозащищенные участки тела приводят к тяжелым обморожениям. Во избежание обморожения при попадании жидкого продукта на тело необходимо защищать руки кожаными или брезентовыми перчатками, глаза – защитными очками, на ноги одевать кожаные, кирзовые или валяные сапоги, работать в суконной чистой одежде летом и в меховой или ватной одежде зимой.

Работы, при которых существует вероятность пролива жидких криопродуктов, должны выполняться с особой осторожностью, в строгом соответствии с требованиями инструкций системы хранения, обязательной защитной спецодежде. К таким работам и операциям относятся:

- наполнение и опорожнение железнодорожных и автомобильных цистерн;
- взятие проб жидкости из резервуаров;
- аварийный дренаж жидкого криопродукта через предохранительные и дренажные клапаны;
- заполнение сосудов малой вместимости.

При обморожении жидким криопродуктом пострадавшего, прежде всего, надо снять спецодежду и освободить пораженное место от одежды, затрудняющей кровообращение, немедленно сделать теплую ванну для пораженного места (температура воды от 40 °С до 50 °С) после этого вызвать врача. Во избежание ухудшения состояния пораженного участка тела не допускается сухое отогревание его растиранием.

В процессе работы с криопродуктом не допускается проливать его на оборудование, площадки обслуживания, металлоконструкции, особенно из чугуна и черных металлов, во избежание их разрушения.

Жидкий криопродукт, находящийся в замкнутом объеме, испаряется под действием внешнего теплопритока, что приводит к постоянному росту давления.

При необходимости проведения работ в закрытых полостях, где возможно скапливание паров криопродукта, должны быть выполнены следующие требования:

- остаточная атмосфера в полости должна быть заменена на воздушную, путем продувок и полосканий регламентным воздухом;
- при продувке применять воздух, очищенный от масла и влаги, с точкой росы не более 233 К (минус 40 °С);
- должен быть проведен анализ газовой среды в полости, результат анализа считается положительным при объемной доле кислорода $(21 \pm 2) \%$;
- все разъемные коммуникации, соединяющие полость с источником давления рабочих и регламентированных сред должны быть отсоединены и заглушены.

4.2 Расчет на прочность

Расчеты на прочность выполняются в соответствии с ГОСТ Р 52857.2-2007 и Техническим регламентом Таможенного союза «О безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением» (ТР ТС 032/2013). Данные документы устанавливают нормы и методы расчета на прочность цилиндрических обечаек, конических элементов, выпуклых днищ и плоских крышек сосудов и аппаратов, применяемых в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и смежных отраслях промышленности, работающих в условиях однократных статических нагрузок под внутренним избыточным давлением, вакуумом или наружным давлением, под действием осевых и поперечных усилий и изгибающих моментов.

Расчеты проводятся с целью обеспечения надежности и безопасности сосудов, работающих под давлением, путем определения предельных значений нагрузки, которых конструкция может выдержать без разрушения. Эти данные позволяют выявить потенциальные слабые места, минимизировать риск аварийных ситуаций и гарантировать соответствие конструкции установленным нормативным требованиям. Кроме того, он способствует оптимизации проектных решений, позволяя выбирать наиболее подходящие материалы и конфигурации, что может снизить вес и стоимость конструкции, сохраняя при этом необходимый запас прочности и эксплуатационную надежность.

Расчеты на прочность являются ключевым этапом в проектировании и эксплуатации безопасных и эффективных сосудов под давлением. Полученные данные будут служить основой для дальнейшего проектирования и оптимизации конструктивных решений.

Процесс расчета на прочность состоит следующих этапов:

- расчет расчетного давления;
- расчет пробного давления;
- расчет обечайки на прочность при действии внутреннего избыточного давления;
- расчет обечайки на прочность при действии внутреннего избыточного давления и изгибающего момента;
- расчет днищ.

Таблица 6 – Основные параметры резервуара для расчета давлений

Наименование показателя	Величина показателя
Рабочее давление, МПа	0,6
Рабочая среда	СПГ
С внешней стороны резервуара	вакуум
Плотность хранимого продукта, кг/м ³	424
Рабочая температура, °С	от минус 196 до 20

Расчетная температура, °С	20
Материал внутреннего сосуда	Сталь 12Х18Н10Т
Внутренний диаметр сосуда, мм	3000

4.2.1 Расчет расчетного давления

Под рабочим давлением для резервуара следует понимать максимальное внутреннее избыточное или наружное давление, возникающее при нормальном протекании рабочего процесса, без учета гидростатического давления среды и без учета допустимого кратковременного повышения давления во время действия предохранительного клапана или других предохранительных устройств.

Для нахождения расчетного давления в сосудах пользуемся следующей формулой:

$$p = p_k - 0,1 \cdot p_{раб} + p_z + p_{вак}, \quad (21)$$

где p_k – давление при полном открытии предохранительного клапана, МПа;

p_z – гидростатическое давление, МПа;

$p_{вак}$ – давление, учитывающее вакуум в теплоизоляционной полости, 0,10 МПа.

Давление при полном открытии предохранительного клапана ищем по формуле:

$$p_k = K \cdot p_{раб}, \quad (22)$$

где K – коэффициент настройки предохранительного клапана.

$$p_k = 1,15 \cdot 0,6 = 0,69 \text{ МПа}.$$

Гидравлическое давление ищем по формуле:

$$p_z = \rho \cdot D \cdot g. \quad (23)$$

$$p_z = 424 \cdot 3000 \cdot 9,81 \cdot 10^{-9} = 0,0125 \text{ МПа}.$$

Ищем расчетное давление в сосуде по формуле (20):

$$p = 0,69 - 0,1 \cdot 0,6 + 0,0125 + 0,10 = 0,7425 \text{ МПа}.$$

4.2.2 Расчет пробного давления

Под пробным давлением в сосуде или аппарате следует понимать давление, при котором проводится испытание сосуда или аппарата.

Пробное давление в сосуде при атмосферном давлении в теплоизоляционной полости находим по формуле:

$$p_{np} = p \cdot 1,25. \quad (24)$$

$$p_{np} = 0,7425 \cdot 1,25 = 0,93 \text{ МПа}.$$

Находим пробное давление во внутреннем сосуде при вакууме в теплоизоляционной полости:

$$p_{np} = 1,25 \cdot p - p_{\text{вак}}. \quad (25)$$

$$p_{np} = 1,25 \cdot 0,7425 - 0,10 = 0,83 \text{ МПа}.$$

4.2.3 Расчет обечайки на прочность при действии внутреннего избыточного давления

Таблица 7 – Основные параметры резервуара для расчета обечайки

Наименование показателя	Величина показателя
Материал обечайки	Сталь 12X18Н10Т
Допускаемое напряжение для материала обечайки по ГОСТ Р 52857.1-2007, МПа	184

Коэффициент прочности продольных сварных швов	1,0
Внутренний диаметр обечайки, мм	3000
Исполнительная толщина стенки обечайки, мм	12
Прибавка для компенсации коррозии и эрозии, мм	0
Прибавка для компенсации минусового допуска на толщину листа по ГОСТ 19903-74 и ГОСТ 7350-77, мм	1,35
Технологическая прибавка, мм	0
Сумма прибавок к расчетной толщине стенки обечайки, мм	1,35
Расчетное давление, МПа	0,7425

Условие применимости расчетных формул выполняется, если:

$$\frac{s - c}{D} \leq 0,1, \quad (26)$$

где s – давление при полном открытии предохранительного клапана, МПа;

p_c – исполнительная толщина стенки обечайки, мм;

c – сумма прибавок к расчетной толщине стенки обечайки, мм;

D – внутренний диаметр обечайки, мм.

$$\frac{12 - 1,35}{3000} = 0,004 < 0,1.$$

Необходимую толщину стенки обечайки находим по формуле:

$$s \geq s_p + c, \quad (27)$$

где s_p – расчетная толщина стенки обечайки.

Расчетную толщину стенки обечайки ищем по формуле:

$$s_p = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p}, \quad (28)$$

где p – расчетное давление, МПа;

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение для материала обечайки по ГОСТ Р 52857.1-2007, МПа;

φ_p – сумма прибавок к расчетной толщине стенки обечайки, мм.

$$s_p = \frac{0,7425 \cdot 3000}{2 \cdot 184 \cdot 1,0 - 0,7425} = \frac{2227,5}{2 \cdot 184 \cdot 1,0 - 0,7425} = 6,06 \text{ мм.}$$

Обечайка имеет достаточную толщину стенки:

$$12,00 \text{ мм} > 6,06 + 1,35 = 7,41 \text{ мм.}$$

Допускаемое внутреннее избыточное давление находим по формуле:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)}. \quad (29)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 184 \cdot 1 \cdot (12 - 1,35)}{3000 + (12 - 1,35)} = 1,30 \text{ МПа.}$$

4.2.4 Расчет обечайки на прочность при действии внутреннего избыточного давления и изгибающего момента

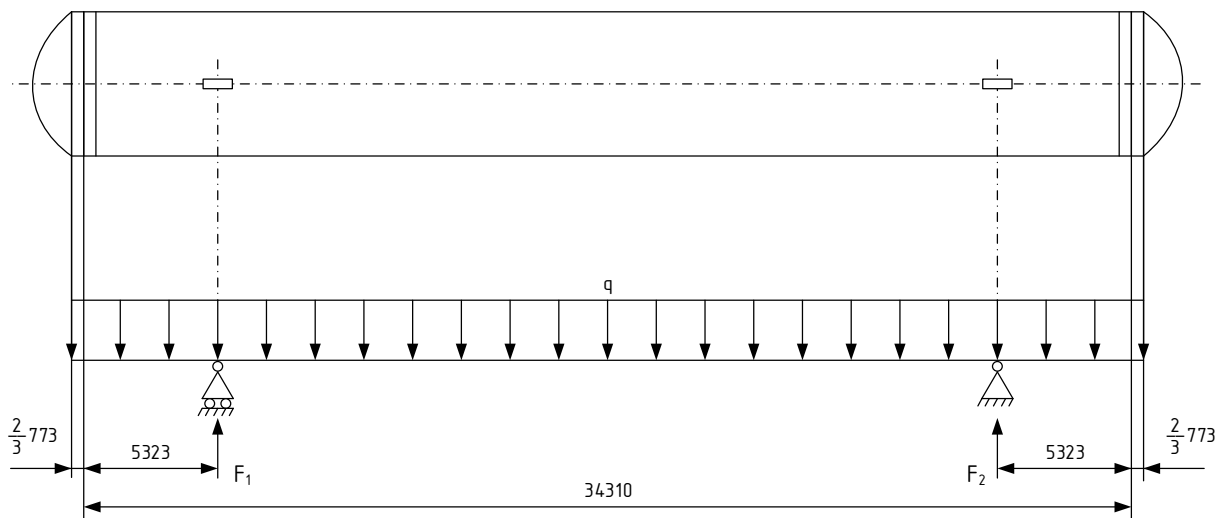


Рисунок 19 – Расчетная схема изгиба обечайки

Условие прочности обечайки при совместном действии нагрузок имеет вид:

$$\frac{p \cdot D}{4 \cdot (s - c)} + \frac{4 \cdot M_{12} \cdot K_9}{\pi \cdot D^2 \cdot (s - c)} \leq [\sigma] \cdot \varphi, \quad (30)$$

где M_{12} – расчетный изгибающий момент между опорами, $H \cdot мм$;

K_9 – коэффициент, учитывающий частичное заполнение жидкостью;

φ – коэффициент прочности сварных швов обечайки, равный 1,0.

Найдем распределенную нагрузку эквивалентного сосуда:

$$q = \frac{(m_c + m_{LN}) \cdot g}{L + \frac{4}{3} \cdot H}, \quad (31)$$

где m_c – расчетная масса резервуара в изоляции, 38940 кг;

m_{LN} – расчетная масса продукта в резервуаре, 91400 кг;

g – ускорение свободного падения, $м/с^2$.

$$q = \frac{(38940 + 91400) \cdot 9,81}{34310 + \frac{4}{3} \cdot 773} = \frac{1278635,4}{34340,67} = 37,23 \frac{H}{мм}.$$

Находим момент:

$$M_0 = q \cdot \frac{D^2}{16}, \quad (32)$$

$$M_0 = 37,23 \cdot \frac{3000^2}{16} = 20941875 H \cdot мм.$$

Находим усилие:

$$F_1 = F_2 = \frac{(m_c + m_{LN}) \cdot g}{2}. \quad (33)$$

$$F_1 = F_2 = \frac{(38940 + 91400) \cdot 9,81}{2} = 639317,7 \text{ Н}.$$

Ищем расчетный изгибающий момент между опорами:

$$M_{12} = M_0 + F_1 \cdot \left(\frac{L}{2} - a \right) - \frac{q}{2} \cdot \left(\frac{L}{2} + \frac{2}{3} \cdot H \right)^2. \quad (34)$$

$$\begin{aligned} M_{12} &= 20941875 + 639317,7 \cdot \left(\frac{34310}{2} - 5323 \right) - \frac{37,23}{2} \cdot \left(\frac{34310}{2} + \frac{2}{3} \cdot 773 \right)^2 = \\ &= 1783941875 \text{ Н} \cdot \text{мм}. \end{aligned}$$

Коэффициент, учитывающий частичное заполнение жидкостью берем из выражения:

$$\begin{aligned} K_9 &= \max \{ 1,6 - 0,20924 \cdot (x-1) + 0,028702 \cdot x \cdot (x-1) + 0,4795 \cdot 10^{-3} \cdot \\ &\cdot y \cdot (x-1) - 0,2391 \cdot 10^{-6} \cdot x \cdot y \cdot (x-1) - 0,29936 \cdot 10^{-2} \cdot (x-1) \cdot x^2 - \\ &- 0,85692 \cdot 10^{-6} \cdot (x-1) \cdot y^2 + 0,88174 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 \cdot (x-1) \cdot y - \\ &- 0,75955 \cdot 10^{-8} \cdot y^2 \cdot (x-1) \cdot x + 0,82748 \cdot 10^{-4} \cdot (x-1) \cdot x^3 + \\ &+ 0,48168 \cdot 10^{-9} \cdot (x-1) \cdot y^3; 1,0 \}, \end{aligned} \quad (35)$$

где x, y – коэффициенты.

Найдем коэффициент x :

$$x = \frac{L}{D}. \quad (36)$$

$$x = \frac{34310}{3000} = 11,4.$$

Найдем коэффициент y :

$$y = \frac{D}{s - c}. \quad (37)$$

$$y = \frac{3000}{12 - 1,35} = 281,7.$$

$$K_9 = \max\{1,6 - 0,20924 \cdot (11,4 - 1) + 0,028702 \cdot 11,4 \cdot (11,4 - 1) + \\ + 0,4795 \cdot 10^{-3} \cdot 281,7 \cdot (11,4 - 1) - 0,2391 \cdot 10^{-6} \cdot 11,4 \cdot 281,7 \cdot (11,4 - 1) - \\ - 0,29936 \cdot 10^{-2} \cdot (11,4 - 1) \cdot 11,4^2 - 0,85692 \cdot 10^{-6} \cdot (11,4 - 1) \cdot 281,7^2 + \\ + 0,88174 \cdot 10^{-6} \cdot 11,4^2 \cdot (11,4 - 1) \cdot 281,7 - 0,75955 \cdot 10^{-8} \cdot 281,7^2 \cdot \\ \cdot (11,4 - 1) \cdot 11,4 + 0,82748 \cdot 10^{-4} \cdot (11,4 - 1) \cdot 11,4^3 + 0,48168 \cdot 10^{-9} \cdot \\ \cdot (11,4 - 1) \cdot 281,7^3; 1,0\} = \max\{1,1; 1,0\} = 1,1.$$

Условие прочности обечайки при совместном действии выполняется:

$$\frac{1,28 \cdot 3000}{4 \cdot (12 - 1,35)} + \frac{4 \cdot 1783941875 \cdot 1,1}{\pi \cdot 3000^2 \cdot (12 - 1,35)} \leq 184,0 \cdot 1,0.$$

$$90,14 \text{ МПа} < 184,0 \text{ МПа}.$$

4.2.5 Расчет днищ

Таблица 8 – Основные параметры резервуара для расчета днищ

Наименование показателя	Величина показателя
Материал днища	Сталь 12X18Н10Т
Допускаемое напряжение для материала обечайки по ГОСТ Р 52857.1-2007, МПа	184
Наружный диаметр днища, мм	3032
Исполнительная толщина стенки днища, мм	16
Прибавка для компенсации минусового допуска на толщину листа по ГОСТ 19903-74 и ГОСТ 7350-77, мм	1,35

Технологическая прибавка к толщине стенки днища по 2082 409151 ДТ, мм	1,6
Сумма прибавок к расчетной толщине стенки днища, мм	2,95
Коэффициент прочности сварных швов	1,0
Расчетное давление, МПа	0,7425

Условие применимости расчетных формул выполняется при:

$$0,002 \leq \frac{s_1 - c}{D} \leq 0,100. \quad (38)$$

$$0,002 \leq \frac{16 - 2,95}{3000} = 0,004 < 0,1.$$

Необходимая толщина стенки днища:

$$s_1 \geq s_{1p} + c, \quad (39)$$

где s_{1p} – расчетная толщина стенки днища, мм.

Находим расчетную толщину стенки днища по формуле:

$$s_{1p} = \frac{p \cdot D_1 \cdot \beta_1}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi}, \quad (40)$$

где β_1 – коэффициент по ГОСТ Р 52857.2-2007.

$$s_{1p} = \frac{1,28 \cdot 3032 \cdot 1,13}{2 \cdot 184 \cdot 1,0} = \frac{4385,48}{368} = 11,92 \text{ мм.}$$

$$16 \text{ мм} > 11,92 + 2,95 = 14,87 \text{ мм.}$$

Днище имеет достаточную толщину стенки.

Ищем допускаемое внутреннее избыточное давление по формуле:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s_1 - c)}{D_1 \cdot \beta_2}, \quad (41)$$

где β_2 – коэффициент формы днища.

Коэффициент формы днища находим формуле:

$$\beta_2 = \max \left\{ 0.9; 0.12 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{D_1}{s_1 - c}} + 3.20 \right) \right\}. \quad (42)$$

$$\beta_2 = \max \left\{ 0.9; 0.12 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{3032}{16 - 2.95}} + 3.20 \right) \right\} = \max \{0.9; 1.12\} = 1.12.$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 184 \cdot 1.0 \cdot (16 - 2.95)}{3032 \cdot 1.12} = 1.41 \text{ МПа}.$$

4.3 Выводы по разделу

В данном разделе были рассмотрены меры безопасности, которые необходимо соблюдать при погрузке и разгрузке резервуара, его монтаже, эксплуатации и работе с криогенными продуктами. Особое внимание уделено вопросам правильной строповки и перемещения резервуара, использования сертифицированного грузоподъемного оборудования, а также требованиям к заземлению и испытанию устройства на герметичность с помощью современных методов контроля. При эксплуатации криогенного резервуара обязательным условием является соблюдение норм по максимальному уровню заполнения и допустимому рабочему давлению, а также регулярный контроль состояния оборудования и отсутствие загрязнения рабочих поверхностей маслами и жирами. Работа с криопродуктами требует строгого соблюдения техники безопасности и использования специальных средств индивидуальной защиты, чтобы минимизировать риск обморожений и травм.

Расчёт на прочность для резервуара хранения СПГ объёмом 250 м³ показал, что конструкция соответствует требованиям промышленной безопасности: толщина стенок, днища и сварных соединений обеспечивает необходимый запас прочности к рабочему и аварийному давлению, отсутствуют участки с превышением допустимых напряжений, используемые материалы гарантируют надёжную работу при низких температурах СПГ (до минус 162 °С), а также подтверждается герметичность и устойчивость резервуара к эксплуатационным нагрузкам и потенциальным аварийным воздействиям, что позволяет сделать вывод о безопасности и пригодности резервуара к длительной эксплуатации.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В экономической части работы основной задачей является определение стоимости выбранного оборудования, доставка его до места установки и стоимость монтажных работ на территории космодрома «Восточный»

Расчет стоимости работ по закупке, доставке и монтажу будет производиться в условных единицах (далее – у.е.), значение которых составляет денежную сумму в рублях по текущему курсу.

Стоимость всех работ складывается найдем по следующей формуле:

$$C_p = C_m + C_d + C_{рез.}, \quad (43)$$

где C_m – стоимость монтажа резервуаров;

C_d – стоимость доставки резервуаров;

$C_{рез.}$ – стоимость всех резервуаров.

Стоимость таких резервуаров от производителя ОАО «Криогенмаш», согласно их коммерческим предложениям колеблется в диапазоне от 110 до 125 млн у.е. в зависимости от дополнительных опций. Для расчетов возьмем среднее значение – 120 млн у.е.

$$C_{рез.} = n + C_{1рез.}, \quad (44)$$

где n – количество резервуаров;

$C_{1рез.}$ – стоимость одного резервуара, млн. у.е.

$$C_{рез.} = 3 \cdot 120 = 360 \text{ млн. у.е.}$$

Стоимость транспортировки обычно берется около 20 % от стоимости резервуаров. В эту сумму входят следующие дополнительные расходы:

– оформление спецразрешений ОАО «РЖД» на перевозку негабаритных грузов;

- разработка схем погрузки и крепления;
- страхования;
- погрузо-разгрузочные работы;
- автоперевозка от станции назначения до площадки.

Стоимость доставки резервуаров найдем по формуле:

$$C_{\partial} = 20\% \cdot C_{рез}. \quad (45)$$

$$C_{\partial} = 20\% \cdot 360 = 72 \text{ млн у.е.}$$

Работы по монтажу резервуаров согласно нормативам и опыту аналогичных проектов оцениваются в 35 % от стоимости резервуара.

Монтаж резервуара включает следующие подготовительные работы:

- подготовка строительной площадки (фундамент, опоры);
- разгрузка и установка резервуаров на место;
- крепление и анкерование;
- монтаж технологических трубопроводов и арматуры;
- подключение контрольно-измерительных приборов и автоматики;
- проведение гидроиспытаний и пусконаладочных работ;
- ввод в эксплуатацию.

Стоимость монтажа резервуаров найдем по формуле:

$$C_{м} = 35\% \cdot C_{рез}. \quad (46)$$

$$C_{м} = 35\% \cdot 360 = 126 \text{ млн у.е.}$$

Найдем стоимость всех работ по формуле (43):

$$C_p = 126 + 72 + 360 = 558 \text{ млн у.е.}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения бакалаврской работы, в которой изучался вопрос по разработке резервуара для хранения сжиженного природного газа для третьей очереди космодрома «Восточный», на основе проведенных расчетов ключевых параметров резервуара и всестороннего анализа данных о перспективной ракетеносителе «Амур-СПГ», применении СПГ в качестве ракетного топлива, а также современных методах и технологиях хранения сжиженных криогенных жидкостей, был обоснован выбор горизонтального резервуара объемом 250 м³ РЦГ-250 с экранно-вакуумной изоляцией.

В САПР SolidWorks была спроектирована трехмерная модель резервуара РЦГ-250 для проведения комплексного моделирования процессов эксплуатации резервуара.

При моделировании нагрузок, возникающих при критических давлениях было выявлено, что при рабочем давлении 5 бар расчетные напряжения в стенках цистерны достигают 155 МПа (для стали 12Х18Н10Т, используемой в конструкции, предел текучести составляет 270 МПа), что обеспечивает коэффициент запаса прочности 1,74. Данное значение соответствует требованиям для статически нагруженных конструкций с низким уровнем риска, где допустимый коэффициент варьируется в диапазоне 1,5-2,0. Однако в условиях сейсмической активности международные стандарты предписывают увеличение коэффициента до 3-5 для компенсации динамических нагрузок, таких как вибрации, ударные воздействия и резкие изменения напряженного состояния конструкции. Таким образом, для обеспечения коэффициента 3 максимальное рабочее давление не должно превышать 3 бар. При этом в экстремальных сейсмических условиях (требующих коэффициента 5) давление необходимо ограничить 1,5-2 бар, что гарантирует сохранение упругой деформации материала и исключает риск пластических деформаций или разрушения. Проведенный анализ деформаций цистерны при различных давлениях демонстрирует, что материал конструкции работает исключительно в

упругой зоне, что подтверждается линейной зависимостью между приложенным давлением и эффективной деформацией. При давлении 2 бар величина деформации составляет $2,03 \cdot 10^{-4}$ (0,0203 %), а при 5 бар $5,23 \cdot 10^{-4}$ (0,0523 %). Такие значения соответствуют классическому закону Гука, где напряжение пропорционально деформации, а модуль упругости материала остаётся постоянным. Это свидетельствует, что в реальных условиях в материале будут отсутствовать пластические деформации, остаточные напряжения и микротрещины, что критически важно для обеспечения долговечности и сейсмостойкости конструкции и позволяет использовать цистерну в условиях повышенных динамических нагрузок без потери функциональности и срока службы.

Исследование гидродинамики процессов залива и слива СПГ из цистерны подтвердило, что даже в её текущей конфигурации эксплуатация возможна, однако с существенными ограничениями по эффективности и безопасности. Без модернизаций цистерна сохраняет базовую функциональность, но в штатном режиме работы наблюдаются повышенные риски: турбулентность при заполнении может провоцировать гидроудары (при высокой скорости заполнения) и флэш-эффект с потерями СПГ до 5 % за цикл, а при сливе остаточные объёмы жидкости (1,5-2 %) остаются в застойных зонах, создавая потенциал для аварийного испарения. Ключевым элементом становится установка стабилизатор потока газа, который может преобразовать турбулентное движение СПГ в ламинарное (на начальных этапах заполнения цистерны) за счет перфорированных пластин или каскадных камер. Такой подход может снизить колебания давления на 40-60 %, минимизирует риск гидроударов и сокращает испарение СПГ на 30-50 %. При этом увеличивается скорость заполнения цистерны. Одновременно рекомендуется оптимизация расположения патрубков – разнесение клапана подачи вытесняющего газа и заборника жидкой фазы на противоположные концы цистерны, что устраним циркулирующие потоки, предотвращает образование застойных зон и обеспечивает равномерное вытеснение СПГ. Дополнительно усиление креплений с применением

виброизоляционных материалов (демпферы из высокопрочной резины или композитов) и динамических распорок позволяет гасить до 90 % вибраций, перераспределяя энергию сейсмических нагрузок и предотвращая резонансные явления. При отсутствии возможности доработок, безопасная эксплуатация цистерн для СПГ требует соблюдения минимальных стандартов. Ключевым аспектом является ограничение скорости залива до 0,5-1 м/с. Это необходимо для решения нескольких задач: снижения турбулентности, минимизации флэш-эффекта (мгновенного испарения при контакте с теплыми поверхностями) и поддержания давления в пределах 2-3 бар. Соблюдение этого диапазона скоростей также способствует уменьшению ежегодных экономических потерь СПГ, оцениваемых в 5-7 %, которые связаны с испарением и остаточными объемами в цистерне. Важно отметить, что время заполнения цистерны варьируется в зависимости от скорости подачи: при 180 м³/час оно составляет примерно 1,3 часа, а при снижении скорости до 72 м³/час увеличивается до 3,5 часов.

Безопасность при работе с резервуаром СПГ требует строгого соблюдения регламентированных мер и процедур на всех этапах, от погрузочно-разгрузочных работ до эксплуатации и технического обслуживания. Игнорирование или несоблюдение требований может привести к аварийным ситуациям, травмам и материальному ущербу. Регулярный контроль за состоянием оборудования, обучение персонала и строгое соблюдение инструкций – важные факторы безопасности при работе с данным видом оборудования.

Согласно проведенному экономическому расчету стоимость резервуаров, в количестве трех штук для нужд третьей очереди строительства космодрома «Восточный, а также стоимость доставки и монтажа обойдется 558 млн. у.е.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Подписан меморандум о сотрудничестве между РКЦ «Прогресс» и Газпром гелий сервис [Электронный ресурс]: материалы сайта Госкорпорации «Роскосмос». Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/32903/> (дата обращения 02.02.2025).

2 Мухамедов, Л.П. Основы проектирования транспортных космических систем : моногр. / Л.П. Мухамедов. – учеб. пособие. М. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. – 265 с.

3 Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели: учебник для вузов : моногр. / М.В. Добровольский. – 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. Д.А. Ягодникова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 488 с

4 ГОСТ Р 55892-2013. Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Общие технические требования. – введ. 2014-01-06. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 38 с.

5 Глушко В.П., Космонавтика: Энциклопедия : моногр. / В.П. Глушко. – М. : Изд-во Советская энциклопедия, 1985. – 525 с.

6 ГОСТ 31369-2021. Газ природный. Вычисление теплоты сгорания, плотности, относительной плотности и числа Воббе на основе компонентного состава. – введ. 2023-01-07. Москва : Изд-во Российский институт стандартизации, 2021. – 47 с.

7 Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники (инженерное пособие). Книга 2. / под редакцией И.В. Бармина. – Москва : Изд-во Полиграфикс РПК, 2006. – 375 с.

8 Федорова Е.Б. Комплексное научно-технологическое обоснование производства сжиженного природного газа : дис. д-ра техн. наук. : 05.17.07 / Е.Б. Федорова ; М. :Изд-во Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) им. И.М. Губкина, 2020. – 360 с.

9 ГОСТ Р 58032-2017. Проектирование и производство на месте вертикальных цилиндрических стальных емкостей с плоским дном для хранения охлажденных сжиженных газов с рабочей температурой от 0 °С до -165 °С. Часть 2. Металлоконструкции. – введ. 2022-01-01. Москва, Изд-во Стандартиформ, 2018. – 42 с.

10 Бармин И.В. Сжиженный природный газ вчера, сегодня и завтра / И.В. Бармин, И.Д. Кунис / под ред. А.М. Архарова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 256 с.

11 Ахмеров Э.В. Анализ технических решений в области транспорта и хранения сжиженного природного газа / Э.В. Ахмеров, В.А. Воронов, Е.Д. Карякина. – М. : Изд-во Вестник международной академии холода. Холодильная техника, 2019. С. 15–22.

12 СП 326.1311500.2017. Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности. М. Изд-во ИД «Юриспруденция», 2018. С. 4-6.

13 Каталог по производству СПГ в России [Электронный ресурс]: материалы сайта для поставщиков оборудования “Energybase.ru”. Режим доступа: <https://energybase.ru/processing-plant/liquefied-natural-gas> (дата обращения 23.11.2024).

14 Ильинский А.А. Транспорт и хранение промышленных сжиженных газов : моногр. / А.А. Ильинский. – М. : Изд-во Химия, 1976. – 160 с.

15 Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-космической техники (инженерное пособие). Книга 1 / под редакцией И.В. Бармина. – Москва : Изд-во Полиграфикс РПК, 2006. – 420 с.

16 Козлов С.Н. Химические ракетные топлива / С.Н. Козлов, Л.Д. Ленкина, А.В. Литвинов. – Бийск : Изд-во Алтайского государственного технологического университета им И.И. Полужнова, 2018. – 146 с.

17 Архаров А.М. Криогенные системы. Том 1. Основы теории и расчета / А.М. Архаров, И.В. Мафенина, Е.И. Микулин – 3-е изд. перераб. и доп. – Москва : Изд-во «Машиностроение», 1996, – 289 с.

18 Криогенные системы. Том 2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем / под ред. А.М. Архарова, А.И. Смородина / 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Изд-во «Машиностроение», 1999. – 361 с.

19 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – Москва : Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, 2003. – 43 с.

20 ПБ 03-576-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – Москва : Изд-во НТД «Промышленная безопасность», 2008. – 187 с.

21 ГОСТ Р 71145-2023. Сосуды криогенные стационарные. Общие технические условия. – введ. 2024-02-01. Москва, Изд-во Российский институт стандартизации, 2023. – 24 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

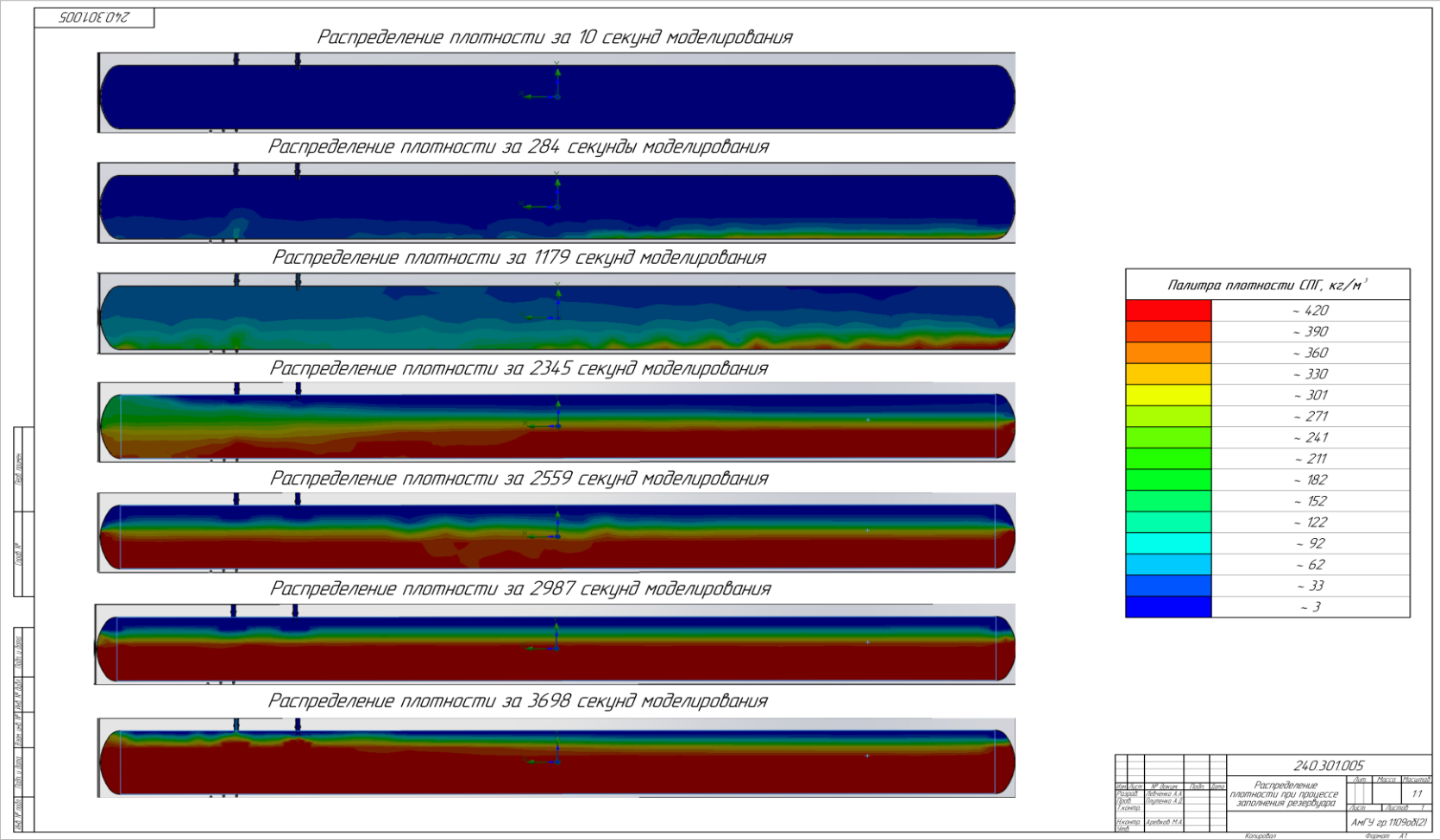


Рисунок А.1 – Распределение плотности при процессе заполнения резервуара

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

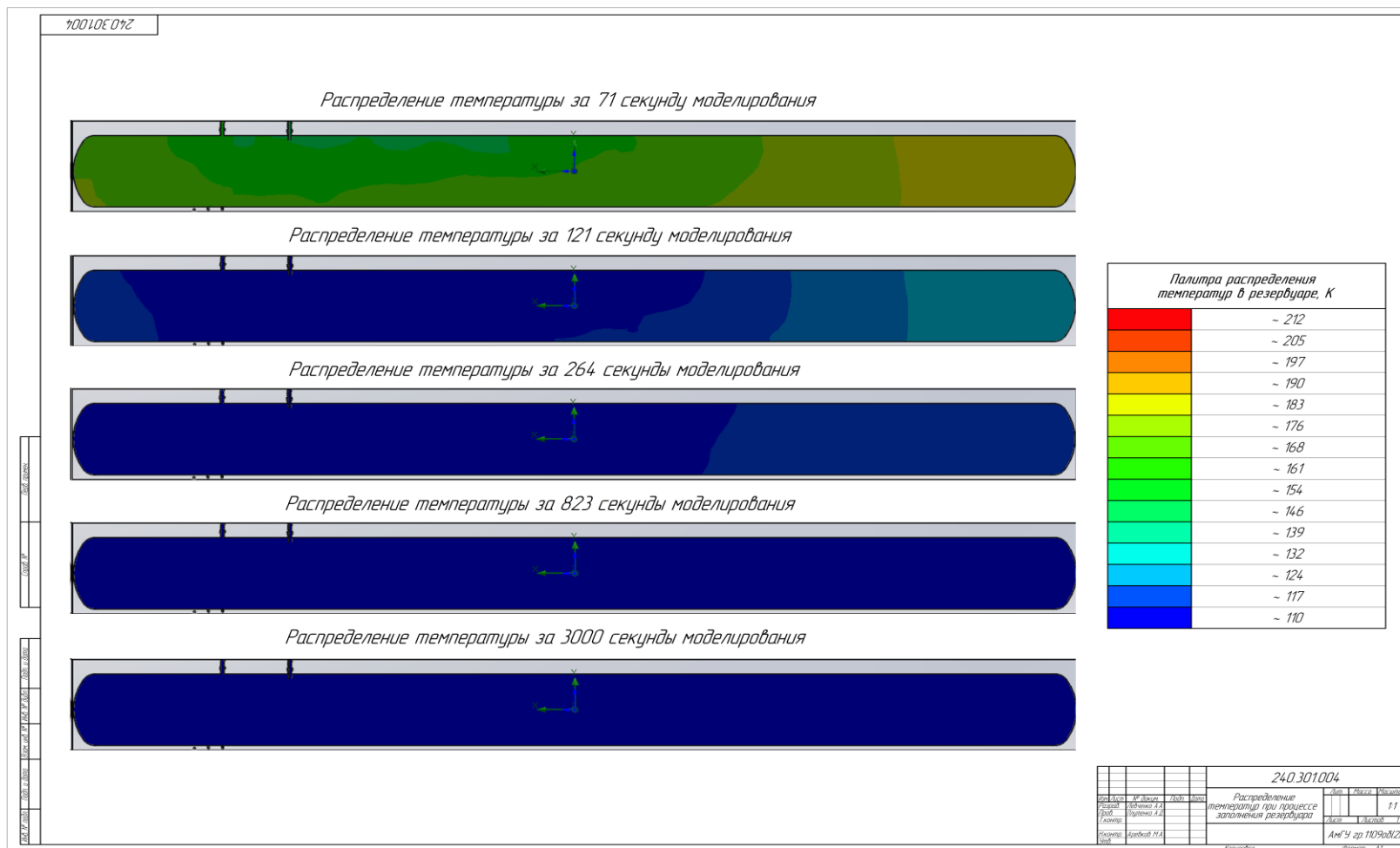


Рисунок А.2 – Распределение температуры при процессе заполнения резервуара

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

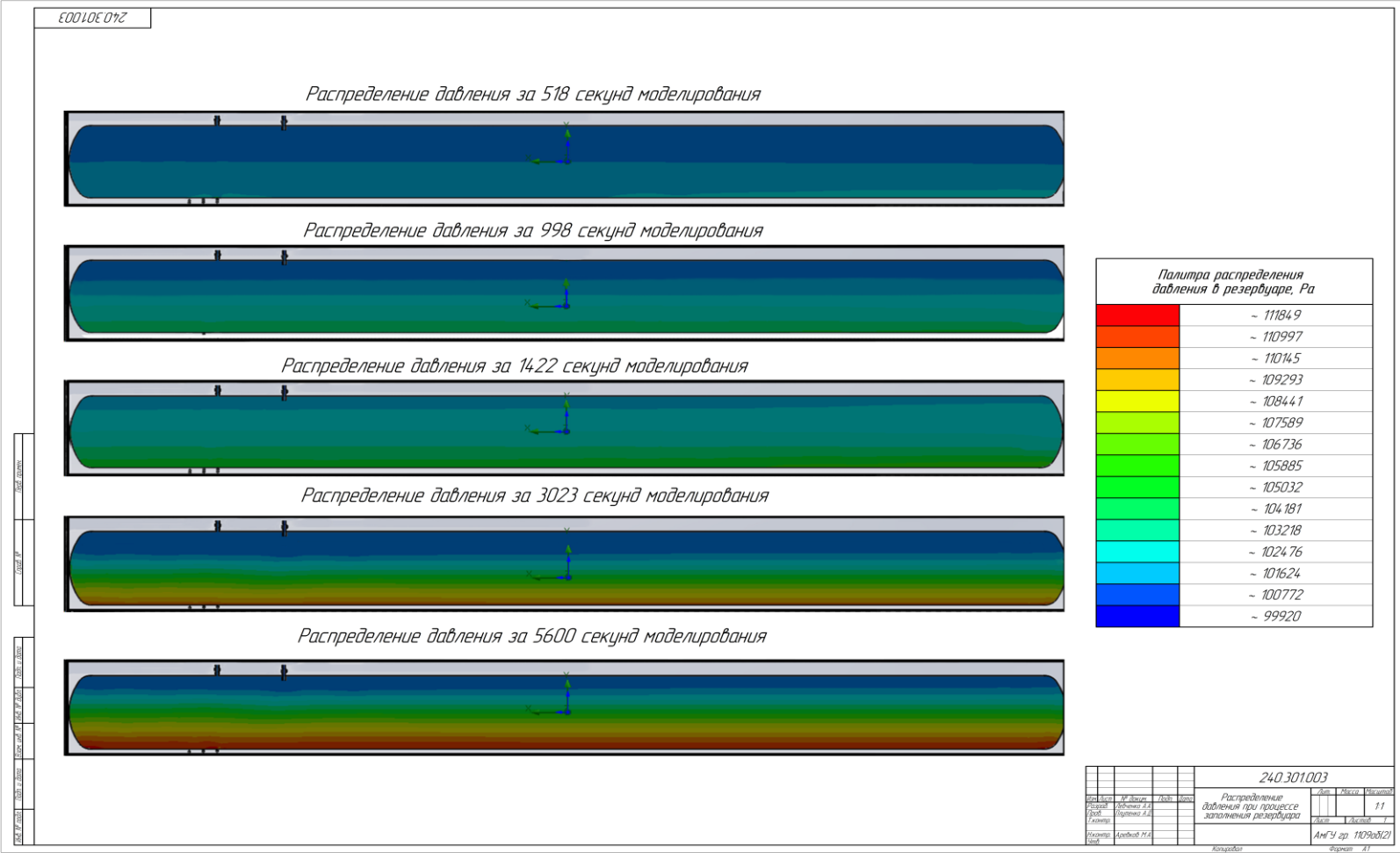


Рисунок А.3 – Распределение давления при процессе заполнения резервуара

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

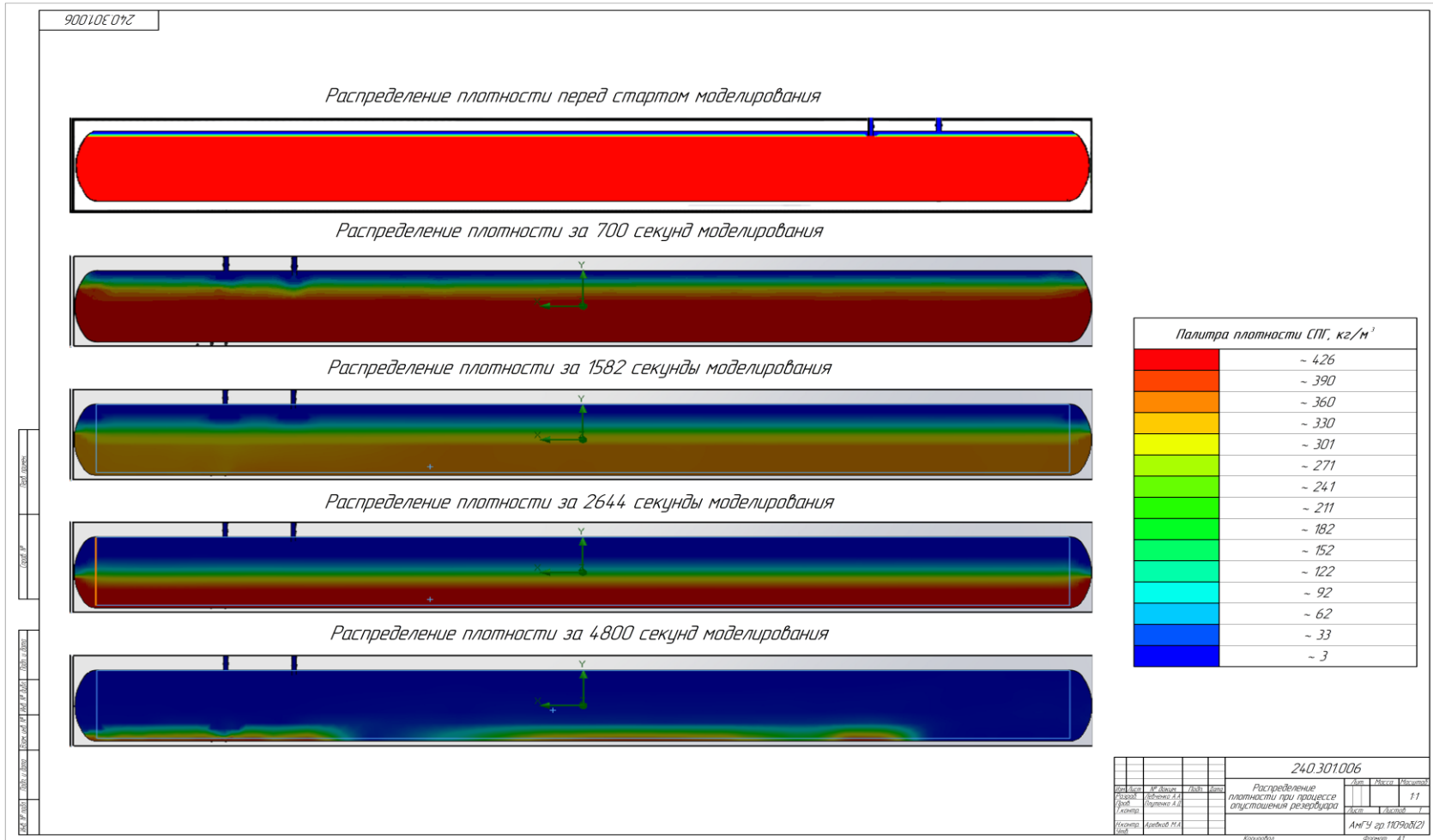


Рисунок Б.1 – Распределение плотности при процессе опустошения резервуара

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

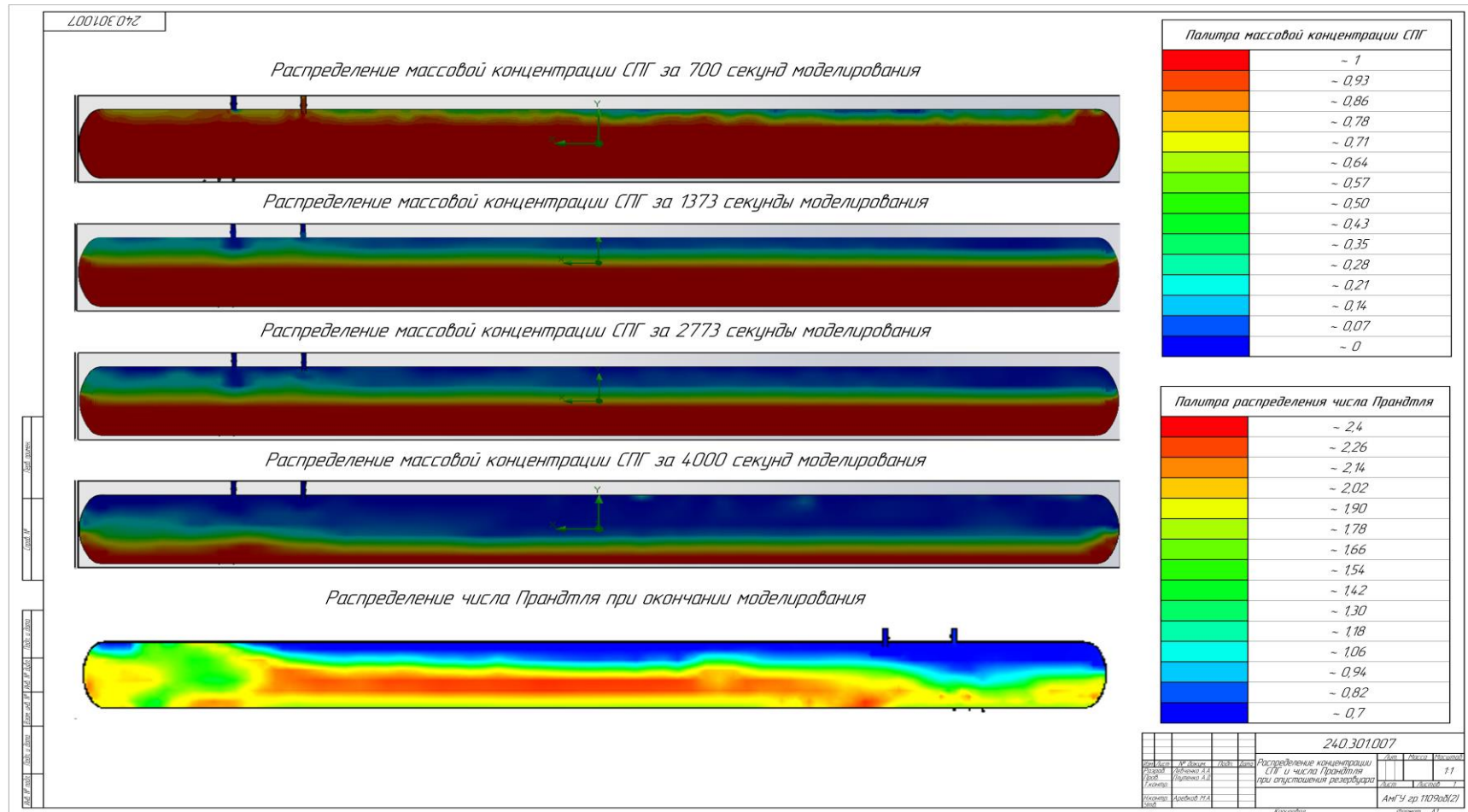


Рисунок Б.2 – Распределение концентрации СПГ и числа Прандтля при процессе опустошения резервуара

ПРИЛОЖЕНИЕ В

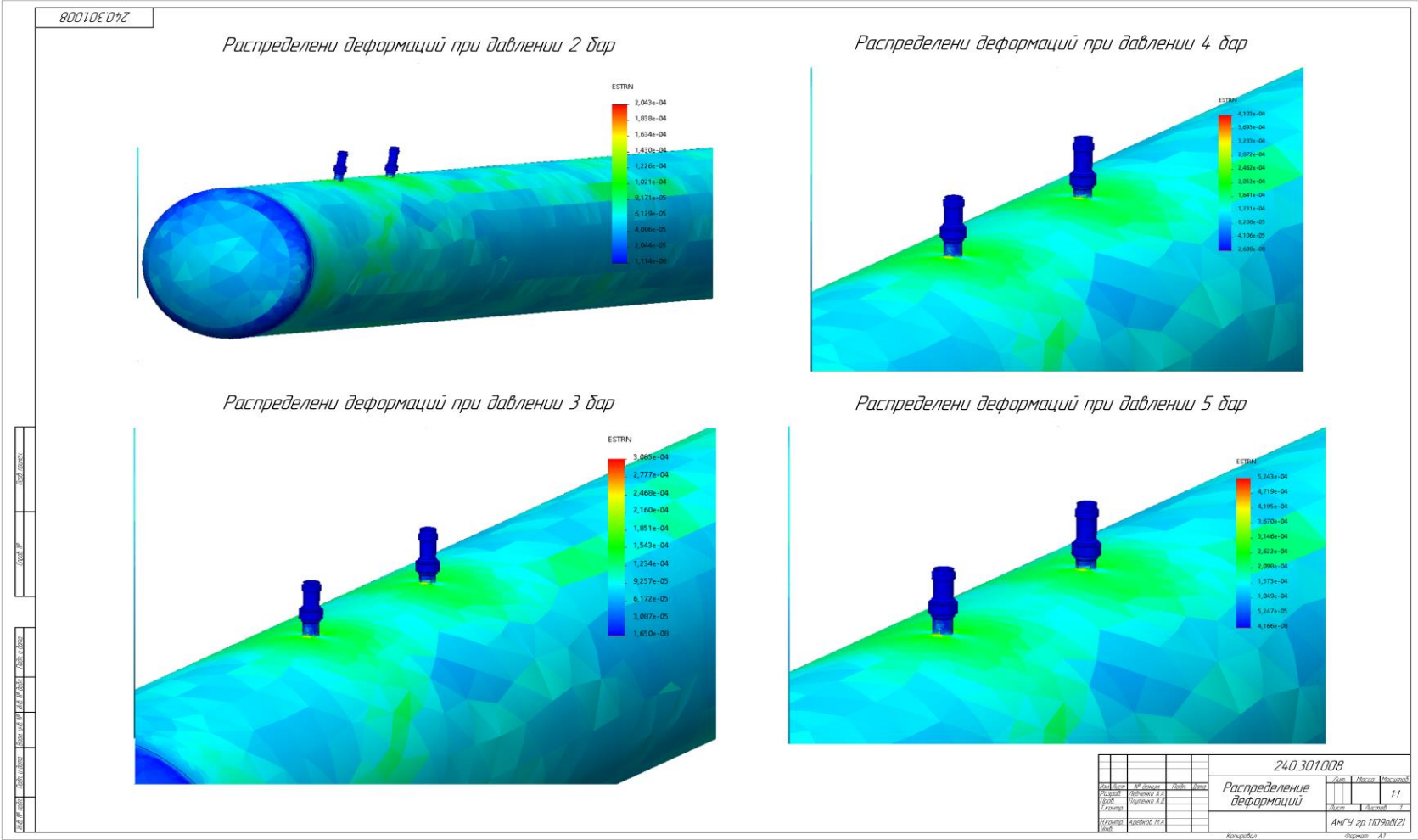


Рисунок В.1 – Распределение деформаций

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ В

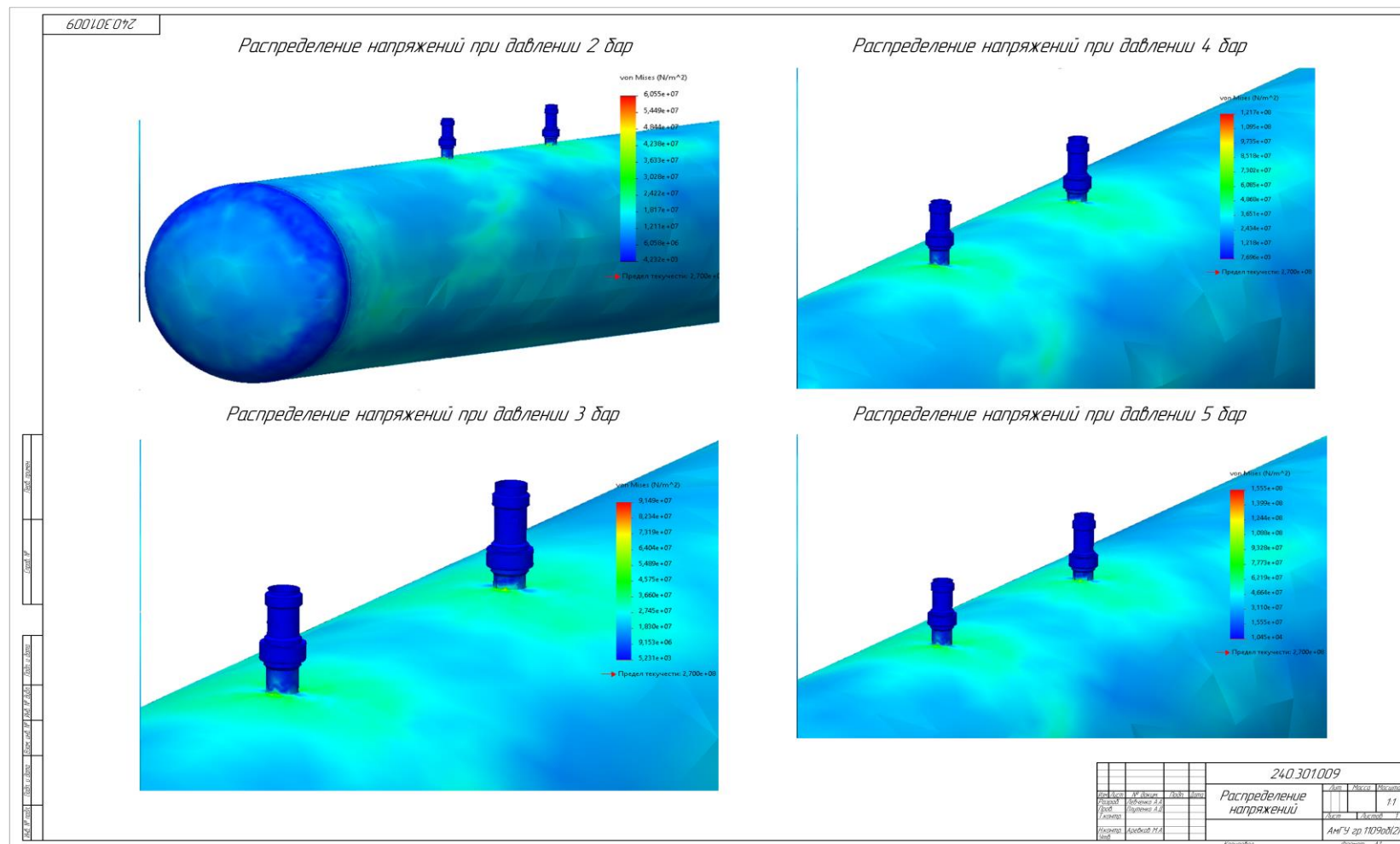


Рисунок В.2 – Распределение напряжений