

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Мартыненко Яна Владимировна



ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО
ЭЖЕКТОРА В СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО
ГАЗА (СПГ)

Специальность 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и
хранилищ

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Болобов В.И.

Санкт-Петербург - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ О СЖИЖЕННОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ И ГАЗОВЫХ ЭЖЕКТОРАХ.....	9
1.1 Роль сжиженного природного газа в мировом топливном балансе.....	9
1.2 Способы получения, хранения и транспортировки СПГ	12
1.2.1 Дроссельный цикл получения СПГ	14
1.2.2 Детандерный и комбинированный цикл получения СПГ	16
1.2.3 Хранение СПГ	20
1.2.4 Транспортировка СПГ	25
1.2.5 СПГ как газомоторное топливо	28
1.3 Проблема утилизации отпарных газов, образующихся при хранении СПГ, и существующие способы ее решения	30
1.4 Принцип работы эжекторных устройств, их конструкция и неисследованные вопросы.....	37
1.5 Существующий алгоритм расчета газового эжектора и его анализ	47
1.6 Выводы по главе 1	50
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ, МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ПРОЦЕСС ЭЖЕКТИРОВАНИЯ ОТПАРНОГО ГАЗА ВЫСОКОНАПОРНЫМ ПОТОКОМ.....	52
2.1 Условия проведения эксперимента, необходимые для моделирования процесса эжекции отпарного газа.....	52
2.2 Схема экспериментальной установки, ее аппаратное оформление и последовательность операций.....	58
2.3 Выводы по главе 2.....	62
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	63
3.1 Исследование влияния давления и расхода активной среды на эффект эжекции	63
3.2 Зависимость коэффициента эжекции от геометрических параметров эжектора	68
3.2.1 Коэффициент расхода эжекторной установки.....	68
3.2.2 Расстояние от среза сопла до камеры смешения	72

3.2.3 Основной геометрический параметр эжектора α	74
3.2.4 Место ввода низконапорного потока и его направления относительно среза сопла	75
3.3 Исследование возможности аккумуляции смеси газов на выходе из эжектора	76
3.4 Выводы по главе 3.....	77
ГЛАВА 4 АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАБОЧИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТПАРНОГО ГАЗА ИЗ ЕМКОСТИ ХРАНЕНИЯ СПГ В ЗАМКНУТЫЙ ОБЪЕМ.....	78
4.1 Разработка технологической схемы для утилизации отпарного газа из резервуара СПГ с использованием газового эжектора	78
4.2 Алгоритм расчета необходимой эжекторной установки	81
4.3 Пример расчета эжекторной установки.....	83
4.3.1 Определение массы паров, подлежащих аккумуляции при хранении СПГ в резервуаре.....	83
4.3.2 Расчет эжектора.....	86
4.4 Сравнительный анализ утилизации паров предлагаемым и существующими способами.....	88
4.5 Выводы по главе 4.....	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	91
СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ИНДЕКСОВ И СОКРАЩЕНИЙ	92
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	95
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт внедрения результатов диссертационного исследования	107
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патенты на объекты интеллектуальной собственности	109
ПРИЛОЖЕНИЕ В Временные зависимости массового расхода газа при истечении через сопло	112

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Процесс изотермического хранения сжиженного природного газа (СПГ) сопровождается образованием отпарного газа, подлежащего периодическому сбросу. В настоящее время проблема его утилизации решается сжиганием на факеле или сжатием компрессорами в аккумулирующую емкость. Первый способ приводит к существенным потерям дорогостоящего сырья (около 0,2 % при повышении температуры в резервуаре на 1 °С) и сопровождается выделением продуктов сгорания в атмосферу, что противоречит соглашению в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата, регулирующему меры по снижению содержания углекислого газа в атмосфере с 2020 года. Второй – влечет значительные энергетические и капитальные затраты, а также способствует снижению надежности всей системы. Таким образом, при наличии ряда разработанных технических решений, отсутствует простой и экологически нейтральный способ утилизации отпарного газа, не требующий значительных вложений.

В то же время известен эффект эжекции одной газовой среды другой, отличающийся применением сравнительно простых конструктивных решений. В этой связи тема диссертации, посвященная обоснованию возможности применения газового эжектора для утилизации отпарного газа из хранилищ СПГ с подачей его в аккумулирующую емкость, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования

В работах таких ученых как Г.Н. Абрамович, М.Е. Дейч, К.Г. Донец, А.Н. Дроздов, Е.А. Любин, В.А. Успенский, В.В. Тарасов, *Z. Aidoun*, *K. Ateur* и др. установлены основные закономерности эффекта эжекции и истечения газа из сопла, а также предложены формулы для расчета рабочих параметров эжекторного устройства. В то же время вопросы установления конструктивных размеров эжектора для отпарного газа, в котором в качестве рабочей среды используется природный газ, изучены недостаточно.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.8.5. Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ по пункту 1 «Технологические процессы и технические средства для проектирования, сооружения, эксплуатации, теоретические и практические основы взаимодействия объектов трубопроводного транспорта с окружающей средой с целью создания высокоэффективных, энерго- и ресурсосберегающих, надежных, механически и экологически безопасных сухопутных и морских систем трубопроводного транспорта для добычи, сбора, подготовки, транспортировки и хранения углеводородов, распределения, газоснабжения и нефтепродуктообеспечения, а также других газовых, жидкостных и многофазных сред, гидро- и пневмоконтейнерного транспорта».

Объект исследования – процесс взаимодействия газовых потоков в эжекторном устройстве.

Предмет исследования – параметры и конструкция газового эжектора для утилизации отпарного газа из резервуара СПГ.

Цель работы – снижение энергозатрат и повышение уровня экологической безопасности при утилизации отпарного газа, образующегося в процессе хранения СПГ в резервуарах.

Идея работы - снижение энергозатрат и предотвращение потерь отпарного газа из хранилищ СПГ достигается его утилизацией с использованием газового эжектора, в качестве рабочего тела которого выступает природный газ высокого давления.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

- 1) Проанализировать и обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертации.
- 2) Провести моделирование процесса эжекции отпарного газа высоконапорным газовым потоком, по результатам которого разработать конструкцию модельной эжекторной установки.

3) С использованием экспериментальной установки, разработанной по результатам моделирования, определить рациональные параметры высоконапорного потока, обеспечивающие эжекцию пассивной среды с достижением в аккумулирующей емкости газовой смеси заданных параметров.

4) Разработать алгоритм расчета рабочих и геометрических параметров эжектора и технологическую схему утилизации отпарного газа из хранилищ СПГ с использованием эжекторного устройства.

Научная новизна исследования

1. Установлено, что при стационарном режиме работы газовых эжекторных устройств, расход эжектируемого газа практически не зависит от расхода и давления эжектирующей среды, что объясняется независимостью вязкости газов и, как следствие, силы трения между поверхностными слоями движущихся потоков, от давления активной среды.

2. Экспериментально доказана принципиальная возможность аккумуляции газовой среды с помощью эжектора в замкнутый объем повышенного давления.

Теоретическая и практическая значимость работы

На основе экспериментальных данных определены рациональные параметры высоконапорного потока, обеспечивающие эжекцию пассивной среды с достижением в аккумулирующей емкости газовой смеси заданных параметров.

Разработан научно-обоснованный метод расчета системы утилизации отпарного газа из резервуара СПГ с использованием газового эжектора.

Результаты и рекомендации диссертации приняты к использованию при разработке технических решений по перевооружению объекта КСПГ «Тобольск» в деятельности компании ООО «Газпром СПГ технологии», что подтверждается актом о внедрении (Приложение А).

Методология и методы исследования

При решении поставленных задач используется общенаучный метод исследования, включающий анализ и аналогию при работе с литературными

источниками, имитационное моделирование процесса эжекции при его расчете, эмпирическое исследование путем проведения эксперимента и формализацию при обработке результатов лабораторных испытаний.

Положения, выносимые на защиту

1. При давлениях, когда газ находится в состоянии близком к идеальному, и обеспечении критического перепада расход пассивной среды в эжекторе не зависит от расхода и давления активной среды, что определяет пропорциональность коэффициента эжекции отношению давлений P_n/P_a пассивной и активной среды, и при $P_a, P_n = const$ достигает максимальной величины при отношении расстояния от среза сопла до камеры смешения к диаметру сопла ~ 4 и вводе потока пассивной среды в срез сопла, что справедливо и при эжектировании газа в замкнутый объем.

2. Алгоритм расчета рабочих и геометрических параметров газового эжектора для утилизации отпарного газа из емкости хранения СПГ в замкнутый объем, отличающийся учетом независимости параметров пассивной среды от активной, а также возможностью расчета входных параметров активной среды, исходя из давления на выходе из эжектора.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием общепринятых методов анализа и сходимостью результатов расчета и эксперимента.

Апробация результатов

Основные положения работы, результаты теоретических и экспериментальных исследований прошли апробацию на 5 научных конференциях: Международный форум «Инновационные перспективы Донбасса» (май 2022 г., г. Донецк), XVIII Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (май 2022 г., г. Санкт-Петербург), I Всероссийская научная конференция «Транспорт и хранение углеводородов – 2022» (апрель, 2022 г., г. Санкт-Петербург), Международная научно-техническая конференция «Транспортные и транспортно-технологические системы» (апрель 2023 г., Тюмень), IX

Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса» (май 2023 г., Донецк).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, разработке технологического процесса утилизации отпарного газа из хранилищ СПГ с использованием эжекторного устройства, проектировании и изготовлении лабораторного стенда, проведении экспериментальных и теоретических исследований процесса эжекции газовых сред, получении зависимостей и подготовке рекомендаций для практического применения.

Публикации

Результаты диссертации исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах (6, 54, 55, 56, 74), в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 3 изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 3 патента на изобретения (Приложение Б).

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 87 наименований. Диссертация изложена на 112 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков, 6 таблиц, 3 приложения.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, профессору Болобову В.И., сотрудникам кафедры ТХНГ Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и научному центру «Арктика» за помощь в работе над диссертацией.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ О СЖИЖЕННОМ ПРИРОДНОМ ГАЗЕ И ГАЗОВЫХ ЭЖЕКТОРАХ

1.1 Роль сжиженного природного газа в мировом топливном балансе

Несмотря на возрастающую роль атомной энергетики и альтернативных источников энергии в мировом энергобалансе, горючие ископаемые, такие как природный, нефтяной попутный газы, нефть, каменный уголь, остаются основными энергоресурсами и сохраняют тенденцию развития. При этом более низкий спрос на нефть (-8 эксаджоулей за период с 2019 по 2021 год) компенсировался более высоким потреблением природного газа (+5 эксаджоулей). Тенденция роста наблюдалась и в мировом ценовом сегменте углеводородов. Стоимость природного газа выросла в четыре раза в Европе, в три раза в Азиатском регионе и в 2 раза в США в анализируемый период времени. Продолжился рост цен на ископаемое топливо и в 2022 году.

Более высокое потребление природного газа ограничено отсутствием в ряде стран его разведанных запасов и наличием инфраструктуры для переработки, хранения и транспорта. В этой связи, применение технологии сжижения природного газа и его транспортировки морским способом является ключевым решением обеспечения энергоресурсом территорий высокого спроса [63].

Сжиженный природный газ представляет собой жидкий флюид, хранящийся при температуре $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеющий плотность в 600 раз превышающую плотность природного газа, что позволяет осуществлять его буферизацию и транспортировку в существенно больших объемах по сравнению с природным газом с последующей регазификацией (разжижением) у потребителя. Преимуществами СПГ являются его безопасность (отсутствие фактора воспламенения и взрыва), а также способность при соединении с окружающей средой регазифицироваться и смешиваться с воздухом.

Возможность транспортировки СПГ морским путем приводит к диверсификации рынка энергоресурсов в странах, нуждающихся в импорте, что

является еще одним преимуществом этого криогенного вида топлива и отражено на карте мировых торговых потоков (рисунок 1.1).

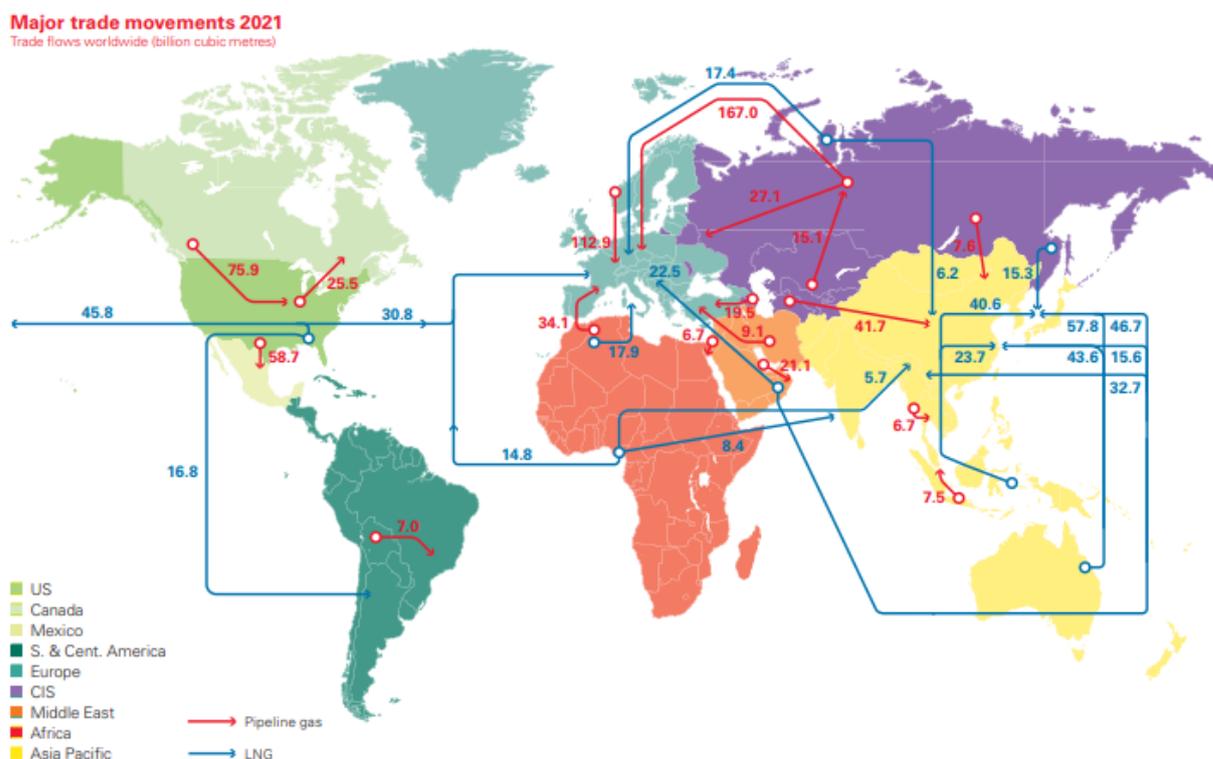


Рисунок 1.1 - Мировые торговые потоки трубопроводного газа и СПГ (млрд. м³) [58]

Из рисунка 1.1 видно, что снабжение энергоресурсом в сжиженном виде активно конкурирует с трубопроводным транспортом природного газа [6]. В Российской Федерации такая конкуренция отсутствует [42]: сжиженный природный газ и трубопроводный являются взаимодополняющими друг друга на внешних и внутренних рынках. Как следует из статистики данных [58], лидерами по экспорту СПГ в 2021 году является Катар (106,8 млрд м³), Австралия (106,8 млрд м³) и США (95 млрд м³). Россия занимает четвертое место, экспортируя при этом 39,8 млрд м³, значительно нарастив объем на 10,7% за период с 2011 по 2021 года. При этом по разведанным запасам природного газа и его добыче Россия занимает лидирующую позицию в мире, что определяет значительный ее потенциал для развития инфраструктуры и технологий по получению, хранению и транспорту СПГ как на международный

рынок, так и в отдаленные регионы внутри страны. По заявлению министра энергетики Российской Федерации Александра Новака объем торговли природным газом в сжиженном состоянии к 2040 году составит более 50%, а Россия займет достойную нишу на рынке СПГ [29].

Согласно долгосрочной программе развития производства сжиженного природного газа [42] на сегодняшний день в России запущены 4 крупно- и среднетоннажных завода по производству сжиженного природного газа:

- «Сахалин-2 СПГ» (2009 г., 9,6 млн.тонн/год);
- «Ямал СПГ» (2018 г., 17,5 млн.тонн/год);
- «Высоцк СПГ» (2019 г., 660 тыс. тонн/год);
- «Газпром СПГ Портовая» (2022 г., 1,5 млн. тонн/год).

Также, в стадии реализации находится проект «Арктик СПГ-2» проектной мощностью 19,8 млн. тонн.

К вероятным проектам по производству СПГ относят «Обский СПГ» (5-6 млн тонн/год), завод в Усть-Луге (13,3 млн тонн/год), «Балтийский СПГ» (13 млн. тонн/год), «Арктик СПГ-1» (19,8 млн. тонн/год). Можно заключить об активной государственной повестке по развитию и расширению географии проектов по производству альтернативного вида энергоресурса (рисунок 1.2).

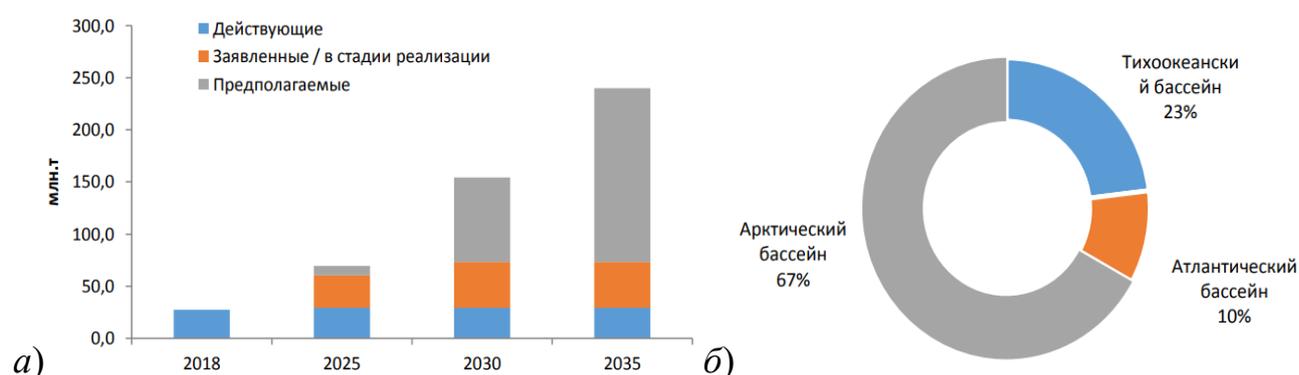


Рисунок 1.2 – Проекты по производству СПГ в России: (а) тенденция развития СПГ-заводов (б) регионы производства СПГ [22]

Возвращаясь к вопросу конкурентоспособности СПГ относительно трубопроводного газа, авторы [24], анализируя поставки энергоресурса с арктического региона на экспорт в ряд стран (Германия, Италия, Турция и

Китай), заключили об экономическом преимуществе морской доставки СПГ в 106,3\$/1 тыс. м³, что на 40,2 % меньше стоимости трубопроводного транспорта.

Стоит отметить преимущества малотоннажных заводов СПГ, обеспечивающих отдаленные от трубопроводной сети регионы и населенные пункты. Так, комплекс хранения и регазификации на территории санатория-профилактория «Озеро Глухое» ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» с 2005 года обеспечивает котельную, мощностью 3 МВт и весь комплекс лечебно-профилактических и жилых корпусов. По расчетам экспертов, для снабжения энергией данного комплекса прокладка 20 км газопровода диаметром 200 мм для подключения к существующей сети обошлась бы на 160 млн. рублей дороже, чем альтернативный способ газификации объекта с использованием СПГ [30].

К настоящему времени разработана и успешно применяется технология производства сжиженного природного газа на газораспределительных станциях (ГРС), за счет энергии газа, выделяющейся при его редуцировании на ГРС (турбодетандерный цикл).

Программа развития производства сжиженного природного газа также предполагает и расширение мощностей автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) и криогенных автозаправочных станций (КриоАЗС), а также перевод транспорта на газомоторное топливо (СПГ или КПГ). Преимуществами метановых двигателей являются их экологичность (сокращение выбросов углекислого газа CO₂) и октановое число метана – 105 (увеличивает срок службы автомобиля в 1,5 раза по сравнению с бензином). По мнению [57] применение СПГ для автотранспорта обеспечивает сокращение выбросов парниковых газов по сравнению с бензином на 15-20%.

1.2 Способы получения, хранения и транспортировки СПГ

Жизненный цикл производства, хранения и транспортировки сжиженного природного газа представляет собой единую технологическую цепочку: газодобывающие скважины, газосборная сеть, газопроводы, заводы по

сжижению газа, криогенные суда-метановозы для перевозки сжиженного газа и станции для его приема, заводы по газификации сжиженного газа (рисунок 1.3) [2, 4].

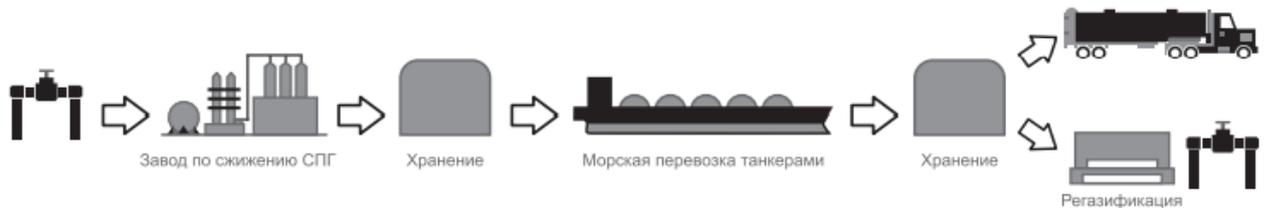


Рисунок 1.3 – Жизненный цикл производства и транспортировки СПГ [2]

Одним из самых дорогостоящих этапов производства СПГ является сжижение газа на заводе, что составляет, в зависимости от технологии, от 15 до 30 % от общих затрат [27]. Вследствие чего, даже незначительное повышение эффективности процесса сжижения увеличивает конкурентоспособность данного вида топлива.

С момента получения первого СПГ (США 1941 г.), запатентовано значительное количество технологий сжижения природного газа. Наибольшее распространение получили следующие технологические схемы:

- для крупнотоннажных заводов – классические каскадные циклы на однокомпонентных хладагентах и однопоточные каскадные циклы с холодильным агентом, являющимся многокомпонентной смесью;
- для средне- и малотоннажных заводов – простые дроссельные холодильные циклы, а также детандерные дроссельные холодильные циклы и циклы с использованием многокомпонентных холодильных агентов.

Выбор технологии обусловлен экономическими показателями, зависящими от давления и состава подводимого газа, объемов сжижения, наличием оборудования и т.д.

«Принципиально можно выделить два больших класса установок для получения СПГ: первый класс, если рабочим телом в цикле служит непосредственно природный газ, который сжижается; и второй класс установок, в которых применяется специальное рабочее тело для сжижения

природного газа. Это могут быть чистые вещества, например азот, или многокомпонентные смеси. При выборе цикла большое значение имеют состав и параметры природного газа (ПГ) — температура и давление. Обычно температура природного газа перед подачей на цикл сжижения близка к температуре окружающей среды, а давление составляет 0,6 — 1,2 МПа при подаче газа от ГРС и 3,0 — 4,0 МПа от магистрального газопровода» [21].

1.2.1 Дроссельный цикл получения СПГ

Такие циклы характеризуются надежностью и простотой эксплуатации, однако имеют низкую эффективность. «На рисунке 1.4 приведена схема дроссельной системы охлаждения с контуром предварительного охлаждения, в котором используется парокompрессионная холодильная машина. Природный газ сжимается в компрессоре до 20,0 МПа. Производительность установки 1100 кг/ч. Схема реализована на газонаполнительной компрессорной станции АО «Криогаз» (г. Санкт-Петербург). Высокое давление рабочего тела в сочетании с контуром предварительного охлаждения позволяет получить СПГ с энергозатратами 0,8 кВт·ч/кг (здесь и далее энергозатраты отнесены к единице массы пол ученного СПГ). Указанные энергозатраты близки к характерным значениям для малотоннажных ожижителей (0,7 — 0,9 кВт·ч/кг). Подобные установки имеют существенный недостаток: желаемая эффективность установки достигается только при высоких давлениях природного газа, что предполагает использование высоконапорных поршневых компрессоров, как правило смазываемых. Снижение давления до средних значений 3,5 — 7,0 МПа резко уменьшает эффективность системы сжижения.» [21]

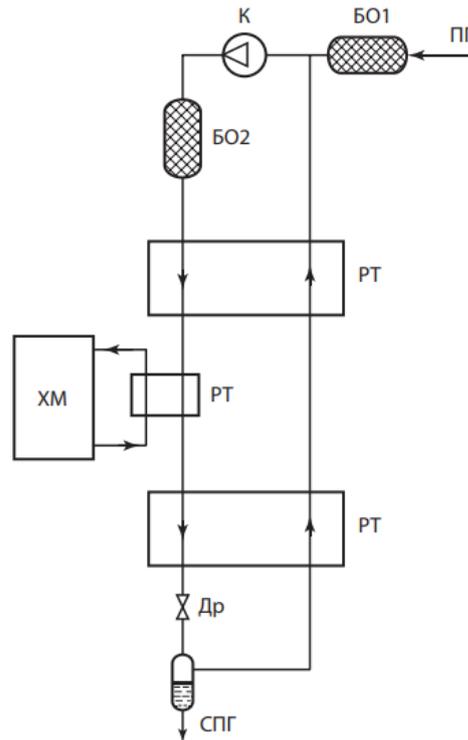


Рисунок 1.4 – Дроссельная система с контуром предварительного охлаждения на базе холодильной машины:

БО1, БО2 – блоки очистки; РТ – рекуперативные теплообменники; ХМ – холодильная фреоновая машины; К – компрессор; Др - дроссель

«На рисунке 1.5 приведена технологическая схема установки сжижения природного газа на ГРС-1 в г. Калининграде. Эта установка относится к установкам с дроссельным циклом высокого давления и предварительным охлаждением, СПГ производится на мало тоннажном комплексе, совмещенном с АГНКС на базе ГРС. Комплекс состоит из двух объединенных между собой параллельных блоков сжижения производительностью по 1500 кг/ч каждый. Газ, поступающий из магистрального газопровода, пройдя блок осушки, редуцируется, а затем дожимается до давления 20 МПа. Далее газ проходит через три теплообменника (ТО1 — ТО3), охлаждаясь до $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$. В первом и третьем теплообменниках охлаждение проводится обратным потоком паров СПГ, а во втором — парокомпрессионной холодильной машиной. После дросселирования в сепараторе происходит отделение СПГ от паровой фазы.

Расчетный коэффициент ожижения природного газа составляет 40 %. Расчетные удельные затраты электроэнергии — 0,870 кВт·ч /кг СПГ. К недостаткам данной схемы можно отнести большие энергозатраты при сравнительно невысоком коэффициенте ожижения, зависимость работы комплекса от работы ГРС. Также к технологическим недостаткам можно отнести необходимость дросселирования, при котором давление газа понижается со значений в магистральном газопроводе до давления всаса компрессора.» [21]

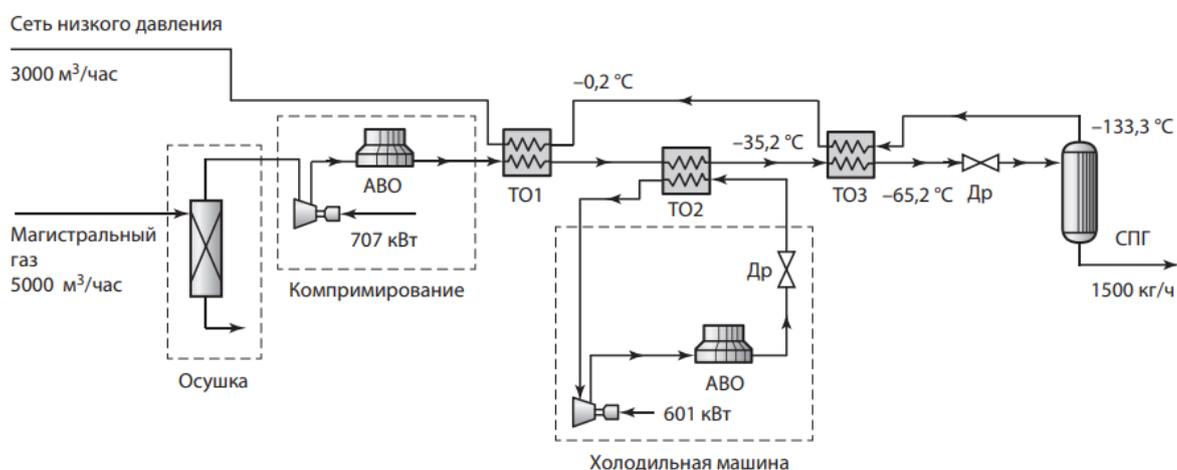


Рисунок 1.5 – Установка сжижения природного газа на ГРС-1 в г. Калининграде: ТО1-ТО3 – теплообменники; Др – дроссель; АВО – аппарат воздушного охлаждения

1.2.2 Детандерный и комбинированный цикл получения СПГ

В малотоннажных установках детандеры могут быть использованы в различных технологических схемах. «Следует выделить два варианта использования детандеров. Первый, когда детандер применяется в цикле, где рабочим телом является сам природный газ. И второй, когда детандер устанавливается во внешнем контуре, где рабочим телом может быть чистое вещество (азот) или смесь (азот-метан). В некоторых случаях применение двух детандеров, установленных на разных температурных уровнях, позволяет создать ожижитель с низким энергопотреблением.

На рисунке 1.6 приведен цикл сжижения ПГ, построенный на базе детандер-компрессорного цикла. В этой схеме природный газ является как сжижаемым продуктом, так и рабочим телом. Для эффективной работы давление природного газа в магистрали должно быть не ниже 2,5 — 3,0 МПа. Необходимо иметь детандеры, которые способны надежно работать с парожидкостными потоками с относительно большой долей жидкости (0,3 — 0,4). Кроме того, доля ожижения природного газа в приведенной схеме должна оставаться ниже определенных значений, чтобы поток высокого давления охлаждался потоком низкого давления в рекуперативном теплообменнике. Авторским коллективом ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» была разработана технология малотоннажного производства СПГ на ГРС.» [21].

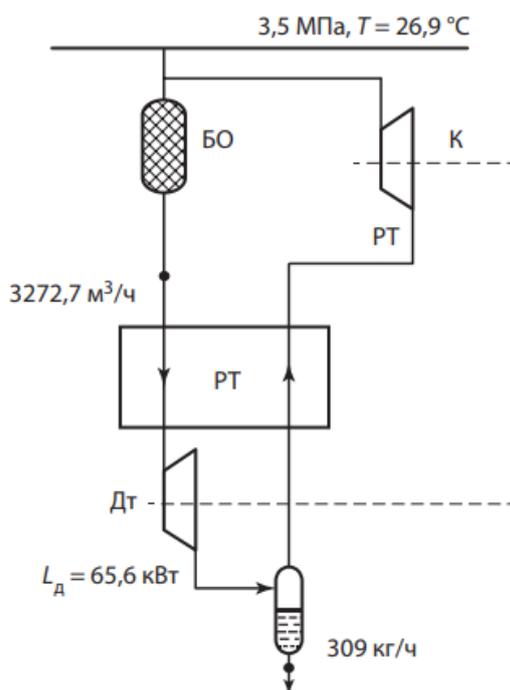


Рисунок 1.6 – Цикл с парожидкостным детандером: БО – блок осушки; РТ – пластинчато-ребристый теплообменник; Дт – детандер; К - компрессор

«Комбинированная схема установки приведена на рисунке 1.7. По сути, комплекс представляет собой ГРС, производящую два продукта для объектов газопотребления: СПГ и выпарной газ, близкий по составу к природному газу. В январе 2013 года комплекс производства СПГ на ГРС-4 г. Екатеринбурга был

запущен в опытно-промышленную эксплуатацию» [21]. Природный газ высокого давления, поступающий из ГРС на вход комплекса, разделяют на два потока. Первый поток пропускают на блок очистки и осушки, второй служит для утилизации тепла от агрегатов комплекса. Осушенный и очищенный газ подвергают сжатию с помощью компрессора, который приводится в действие турбодетандером. Связанные единым валом и размещенные в одном корпусе компрессор и детандер образуют детандер-компрессорный агрегат. Далее сжатый газ охлаждают в теплообменнике ТО1, при этом нагревается газ линии утилизации тепла. После теплообменника ТО1 газ разделяют на две линии: технологический поток (для выработки холода) и производственный поток (для сжижения природного газа). Технологический поток через теплообменник ТО2 направляется в детандер, приводит во вращение турбину детандера. Далее холодный поток с выхода детандера добавляют в обратный поток паров из сепаратора. Полученную смесь подают противотоком в основной теплообменник ТО2 для охлаждения производственного потока. Очищенный производственный поток пропускают через теплообменники, где сжатый газ охлаждается обратным потоком несжиженной части газа производственного потока из сепаратора, смешанного с холодным потоком из детандера. Затем производственный поток пропускают через дроссель, после которого продукт попадает в емкость в виде парожидкостной смеси. Здесь жидкость (СПГ) отделяют от холодных паров, которые сбрасывают через теплообменники в распределительный трубопровод. Не считая затрат электроэнергии, используемой для вспомогательных систем (системы контроля и автоматики, привода смазочного насоса турбодетандера, освещения, криогенного насоса для отгрузки СПГ и прочих вспомогательных систем), комплекс не расходует энергии извне на сжижение природного газа. Однако коэффициент сжижения невелик и составляет 11 %.

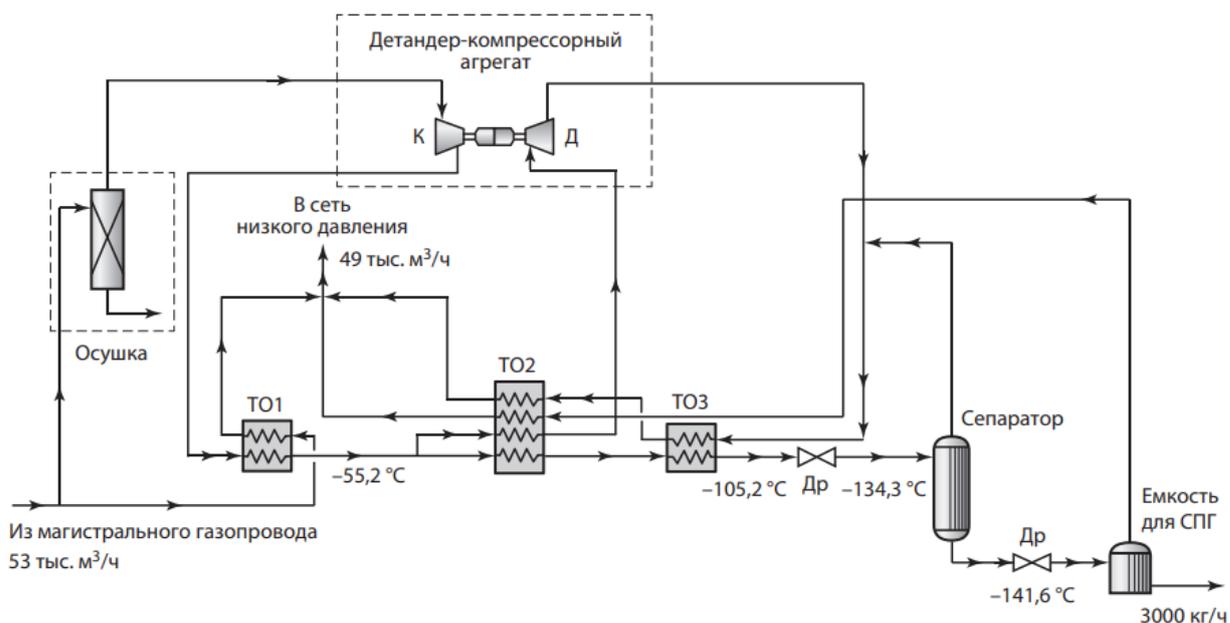


Рисунок 1.7 – Технологическая схема установки сжижения на ГРС-4 в г. Екатеринбурге 1: ТО1-ТО3 – теплообменники; Др – дроссель; К – компрессор; Д – детандер [21]

Однако, несмотря на многообразие принципиальных схем сжижения, все из них предусматривают предварительную глубокую очистку и осушку сырьевого газа [36]. Каскадный цикл включает ряд теплообменных аппаратов, позволяющих охладить природный газ, а также хладагент до нужной температуры. Сжатие и последующее охлаждение холодильного агента перед подачей в теплообменный аппарат осуществляется с помощью компрессорных установок и аппаратов воздушного охлаждения (АВО). В качестве смешанного хладагента может выступать смесь метана, азота, пропана, этана, бутана и пентана [26], а также отпарной газ СПГ.

Факельная система на заводе СПГ обеспечивает промышленную безопасность при периодических и аварийных сбросах горючего газа из технологических установок и трубопроводов. Удаление газа осуществляется через вертикальную трубу с последующим его сжиганием на горелке, которая поддерживает горение на постоянной основе [2].

1.2.3 Хранение СПГ

Не менее технологически сложными этапами в жизненном цикле СПГ являются его хранение. Резервуарный парк является неотъемлемой частью любого комплекса СПГ и обеспечивает возможность бесперебойной работы завода сжижения природного газа в условиях периодического потребления СПГ.

Наибольшее распространение получили вертикальные цилиндрические резервуары с изотермическим типом хранения. «Вертикальные цилиндрические изотермические резервуары классифицируют по следующим признакам:

- конструктивному исполнению стенок резервуара (одностенные, двустенные, с внутренней мембранной);
- конструктивному исполнению внутренней крыши (самонесущая и подвесная);
- типу изоляции (экранная, пористая, засыпная, жесткая);
- применяемому материалу (металлические, железобетонные, комбинированные).» [21]

Железобетонный резервуар с замкнутой наружной оболочкой также нашла широкое применение (рисунок 1.8). Такой резервуар отличается двойной стенкой, где внутренний - изготовлен из стали с содержанием никеля 9%, а внешний – из предварительно напряженного бетона. «Сосуд имеет обкладку от утечек на внутренней поверхности, бетонную крышу и днище. В зарубежной практике наибольшее распространение получили конструкции, собираемые и свариваемые из отдельных элементов на днище резервуара с последующим пневмо-подъемом в проектное положение.» [21]

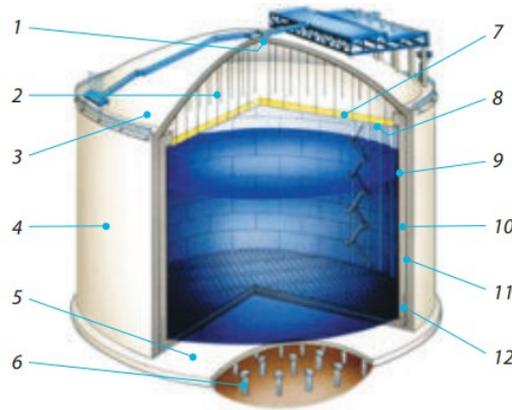


Рисунок 1.8 – Железобетонный изотермический резервуар с замкнутой наружной оболочкой:

1 – подкладка крыши; 2 – подвеска; 3 – железобетонная крыша; 4 – боковая стенка из портландцемента; 5 – железобетонная стена основания; 6 – железобетонные сваи; 7 – изоляция крыши; 8 – подвесная платформа; 9 – внутренний корпус; 10 – теплоизоляция стенки резервуара; 11 – подкладка; 12 – вторичная перегородка

«В конструкции с самонесущей внутренней крышей избыточное давление газа воспринимается внутренним резервуаром. В межстенное пространство подается инертный газ, например, азот, который сушит теплоизоляцию в процессе эксплуатации.» [21]. «В мировой практике широко распространена также конструкция подвесной плоской крыши. Принципиальное отличие такой конструкции от конструкции с самонесущей внутренней крышей заключается в том, что пары продукта свободно проникают в межстенное пространство через зазор между крышей и стенкой или через специальные отверстия в подвесной крыше.»[21]. Ряд компаний переходят на двустенные конструкции резервуаров, что окупается в ходе их эксплуатации. «Разновидностью наземных изотермических резервуаров являются металлические вертикальные цилиндрические резервуары, заглубленные в грунт, обычно на высоту корпуса (это делается по соображениям безопасности, для того, чтобы максимальный уровень разлива продукта не превышал уровня поверхности земли).

Схема заглубленного изотермического резервуара приведена на рисунке 1.9. Различают два типа конструкции заглубленных изотермических резервуаров:

- тип с подвесной платформой;
- тип резервуара с крышей, имеющей внутреннюю изоляцию.» [21]

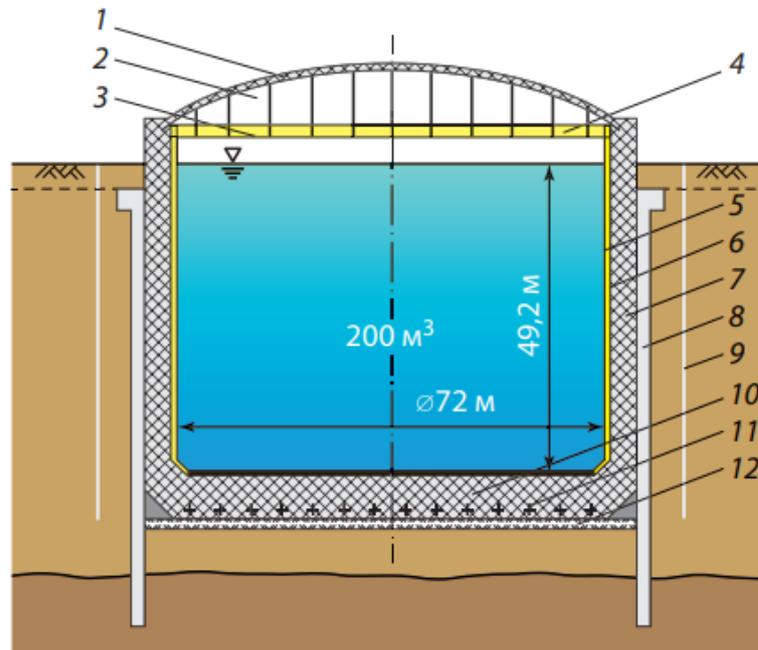


Рисунок 1.9 – Схема конструкции заглубленного изотермического резервуара:
 1 — железобетонная крыша; 2 — стальная крыша; 3 — подвесная платформа; 4 — теплоизоляция из стекловаты; 5 — не содержащая фреона твердая полиуретановая изоляция; 6 — мембрана из нержавеющей стали, содержащей 18 % Cr и 8 % Ni; 7 — железобетонная стенка; 8 — железобетонная шпунтовая стенка; 9 — боковой подогреватель; 10 — железобетонное дно; 11 — подогреватель основания; 12 — основание из гравия

«Заглубленные резервуары принципиально не отличаются от наземных резервуаров открытой установки, но, из-за необходимости проведения сложных и трудоемких земляных работ, устройства специальных фундаментов с дренажем и гидроизоляцией более дороги, хотя, вместе с тем, более надежны, особенно в районах с повышенной сейсмичностью. Заглубленные резервуары

не нуждаются в обваловании, и обязательное пространство между резервуарами и объектами, обеспечивающее безопасность объектов, относительно небольшое, что позволяет сократить выделяемые под их размещение площади. По зарубежному опыту на долю изотермических хранилищ приходится до 50% суммарных капиталовложений в комплексы СПГ, что объясняется повышенными требованиями к надежности конструкций хранилищ и технологии их эксплуатации.

Современные принципы проектирования и безопасности эксплуатации хранилищ требуют гарантированного обеспечения целостности первичной емкости в любых условиях эксплуатации хранилищ. Вторичная емкость или ограждение должны гарантировать предотвращение разлива СПГ на большой площади и полный сбор жидкости в случае повреждений первичной емкости от случайных внешних воздействий, включая стихийные бедствия. Особое внимание обращается также на надежность системы измерения и сигнализации предельных положений уровня жидкости в хранилище.» [21]

Поддержание заданных значений давления в паровом и межстенном пространстве резервуара является принципиально важно. Для сохранения надежности и целостности резервуаров СПГ нормативными документами предусматривается: обеспечение сброса паров СПГ из резервуара; проведение операций по его продувке, захолаживанию и заполнению; предотвращение явления ролловера (температурное расслоение СПГ, которое может сопровождаться резким перемещением жидкости в резервуаре) и контроль за давлением; порядок входа в резервуар для осмотров и ремонта; порядок проведения ремонтных работ и т.д.

В России действуют следующие стандарты по объектам СПГ:

- ГОСТ Р 55892 — 2013. Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа. Общие технические требования;
- ГОСТ Р 56352 — 2015. Производство, хранение и перекачка сжиженного природного газа. Общие требования безопасности.

- ГОСТ Р 57431 — 2017. Газ природный сжиженный. Общие характеристики.

Несмотря на существующие усовершенствованные конструкции резервуаров с теплоизоляцией [49], при длительном хранении СПГ в резервуаре хранилища из-за теплопритока извне происходит испарение. В первую очередь испаряется азот, так как является самым низкокипящим компонентом, после чего – метан. Таким образом, в резервуаре происходит обогащение сжиженного природного газа тяжелыми углеводородами и различными примесями. В литературе паровая фаза, образующаяся в резервуаре, получила название «отпарной газ» или «BOG – boil-off gas» [11, 77]. В основном, отпарной газ содержит около 20% азота, 80% метана и некоторого количества этана. Содержание азота в испарившемся газе может превышать в 20 раз его количество в жидкой фазе – СПГ.

В случае хранения в резервуаре однородного по плотности СПГ расслоение (стратификация) не наблюдается. В этом случае окружающая среда оказывает тепловое воздействие на пристеночные слои СПГ, вызывая таким образом естественную циркуляцию продукта в резервуаре. При этом прогретая часть сжиженного газа выносится вдоль боковых стенок резервуара к поверхностному разделу фаз, где избыточная теплота приводит к испарению части прогретой жидкости. Охлажденный продукт опускается на дно резервуара (рисунок 1.10) [4].



Рисунок 1.10 – Пример парообразования при хранении однородного СПГ в резервуаре [4]

Для каждого резервуара определяется уровень суточных испарений, который представляет собой отношение испарившегося объема СПГ за сутки и максимального объема СПГ. Авторы [82] путем математического моделирования пришли к выводу, что превышение температуры окружающей среды на 1 °С вызывает изменение расхода отпарных газов приблизительно на 0,2 %. Авторы [51] предлагают конструкцию резервуара с теплоизоляцией, при которой скорость кипения топлива составляет 0,25 %/сут. Данный показатель может варьироваться в зависимости от теплопередачи стенки резервуара и типа изоляции. В среднем, уровень составляет 0,05-4% [2].

1.2.4 Транспортировка СПГ

Транспортировка СПГ может осуществляться сухопутным и морским способом. Для малотоннажных перевозок наиболее применимый вид транспорта - автомобильные цистерны, являющиеся более мобильными в связи с развитой сетью автодорог на территории России и возможностью транспортировки топлива в отдаленные регионы страны (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Криоцистерна СПГ

Объем цистерны автотранспортировщика может достигать 50 м³, оптимальное давление перевозки 0,7-0,8 МПа. На эффективность автомобильной транспортировки оказывает влияние ряд факторов: объем производства СПГ, дальность транспортировки, рельеф местности, количество

расположения потребителей, качество дорожных покрытий и т.д. Корпус цистерны для автомобильного транспорта также как и емкость для хранения СПГ должен отвечать определенным требованиям – материал корпуса инертен к компонентам СПГ и выполнен из коррозионно-стойкой хромоникелевой аустенитной стали; цистерна имеет эффективную теплоизоляцию; внутри изоляции поддерживается вакуум, наличие арматурно-приборного отделения управления с блоком криогенной арматуры и центробежного транспортного насоса для заполнения и опорожнения.

Наиболее преимущественным и экономически эффективным способом является транспорт в танкерах-газовозах морским путем, что позволяет обеспечить большим объемом топлива отдаленные регионы России и зарубежные страны. Конструкция таких танкеров как правило имеет двойной корпус и теплоизолированные танки, которые транспортируют СПГ в изотермическом состоянии (т.е. при температуре $\sim -162^{\circ}\text{C}$ и давлении, близком к атмосферному). Известны 2 типа танкеров – сферического (рисунок 1.12а) или призматического мембранного (рисунок 1.12б). Резервуары на танкерах обычно выполняются из инвара (36%-ая никелевая сталь) или композитного материала с пенополиуретановой теплоизоляцией.

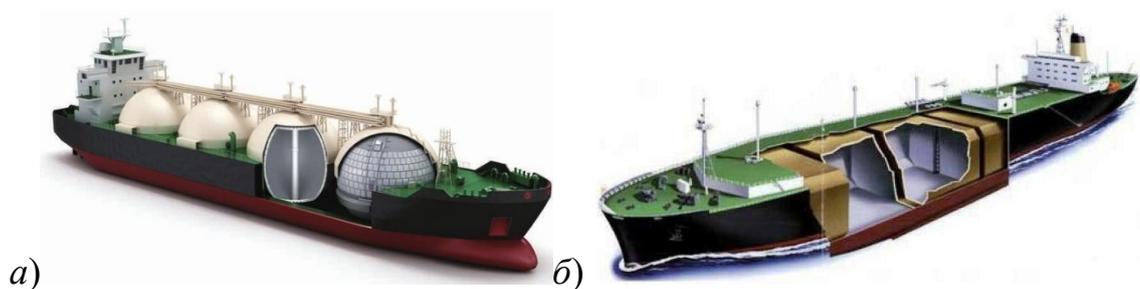


Рисунок 1.12 – Типы танкеров-газовозов:

(а) сферический; (б) мембранный

Выбор конструкции танкера обусловлен основным требованием – его изоляция предотвращает повышение температуры и, как следствие, испарение СПГ. Несмотря на то, что ряд танкеров оборудован системой повторного сжижения паровой фазы, один рейс судна характеризуется потерями в 3 – 8%

объема танка в зависимости от расстояния транспортировки и типа теплоизоляционного материала.

Грузовые танкеры оборудуются соответствующей арматурой для обеспечения контроля безопасной транспортировки СПГ, а также обеспечения сливо-наливных операций. При сливе топлива остается некоторый объем топлива, которое обеспечивает поддержание рабочей температуры при порожнем рейсе и предотвращает термоудары при очередном заполнении [41].

Существуют пилотные проекты и по транспорту СПГ железнодорожными цистернами, что особенно является перспективным для Российской Федерации вследствие развитости сети железных дорог. например, компания Уралкриомаш разработала модификацию вагон-цистерны для перевозки природного газа в жидком состоянии (рисунок 1.13) [19]. Железнодорожный вагон оборудован насосом для осуществления операций по сливу и наливу топлива, что, по мнению производителя, сокращает простой и увеличивает оборачиваемость СПГ. Основная задача – доставка топлива на дальние расстояния и газификация отдаленных объектов. Вместимость разработанного вагона составляет порядка 23,5 т СПГ с временем бездренажной транспортировки до 42 суток. Однако на сегодняшний день этот вид транспорта еще не получил широкого распространения.



Рисунок 1.13 – Внешний вид вагон-цистерны для транспортировки СПГ [19]

1.2.5 СПГ как газомоторное топливо

Широкое применение СПГ в качестве газомоторного топлива получил на карьерной технике из-за необходимости больших объемов потребления, сосредоточенных в одном месте [23]. В этой связи, такие компании как БелАЗ, АК «АЛРОСА», «Русская медная компания» переоборудовали самосвалы с дизельного топлива на СПГ.

Развитие системы криогенных автогазонаполнительных станций (криоАЗС) привело к увеличению спроса со стороны частного автомобильного транспорта. Благодаря построенным магистральным транспортным коридорам, позволяющим обеспечить заправку криогенным топливом по трассам Санкт-Петербург — Магнитогорск и Владивосток — Свободный (Амурская область), переоборудование автомобилей на двигатели, работающие за счет СПГ, только растет. Идет формирование третьего транспортного коридора от Санкт-Петербурга до Астрахани. Строительство газозаправочных объектов СПГ превышает план развития (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – План развития газозаправочных объектов СПГ в России:
график строительства криоАЗС

В рамках транспортной реформы в г. Санкт-Петербург были введены автобусы, работающие на СПГ. При переходе с дизельного топлива на природный газ в компримированном и сжиженном состоянии (КПГ и СПГ) производилась оценка экономической и технологической составляющей (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Сравнительный анализ стоимости 1 км пробега на разных видах топлива на примере автобуса ЛИАЗ-5292

На примере ЛИАЗ 5292	ДТ	СПГ	КПГ
	л	кг	м ³
Расход топлива на 100 км	41,33	41,02	60,92
Цена топлива, руб	55,1	35	22,1
Расход топлива, руб	2277,28	1435,7	1346,332
Экономия СПГ по сравнению с ДТ при цене 35 руб/кг		36,96%	40,88
Экономия СПГ по сравнению с ДТ при цене 45 руб/кг		18,94%	40,88

До 2021 года предприятие рассматривало использование компримированного природного газа (КПГ). Опыт эксплуатации техники на КПГ открыл ряд факторов:

- малое количество заправочных станций на КПГ в Санкт-Петербурге, как следствие увеличение холостых пробегов;
- длительное время заправки автобуса (20-30 минут);
- вопросы по безопасности подвижного состава в случае разгерметизации оборудования в случае дорожно-транспортного происшествия или возгорания;
- высокая загруженность существующих заправочных станций (КПГ), коммерческими и гражданскими потребителями.

Причины выбора СПГ в качестве топлива:

- возможность быстрого развертывания криоАЗС на СПГ с использованием мобильных технологий;
- меньшая масса газобаллонного оборудования при сохранении запаса хода автобуса, как следствие уменьшение потребления топлива;
- сокращение холостых пробегов транспортных средств;
- более безопасная технология хранения топлива, давление хранения СПГ 16 бар, КПГ 200 бар;
- снижение затрат на переосвидетельствование баллонов;
- время заправки автобуса не отличается от заправки дизельным топливом (9 единиц в час) [31].

1.3 Проблема утилизации отпарных газов, образующихся при хранении СПГ, и существующие способы ее решения

Анализируя проблемы энергетического рынка [66, 70, 83] и стоящей на повестке дня современной «зеленой» энергетики [60, 68], можно заключить, что вопросы регенерации отработанных источников энергии являются одними из наиболее актуальных. Такая потребность в повторном использовании отпарного газа существует и при хранении СПГ, так как, на сегодняшний день, для поддержания постоянного давления в резервуаре, избыток паровой фазы подлежит утилизации [46, 76]. В соответствии с нормативными документами Российской Федерации [9, 10, 11, 46], включающими требования, предъявляемые к хранилищам СПГ, предусмотрены периодические или аварийные сбросы отпарного газа из хранилища в случае превышения давления топлива сверх установленного предела, осуществляемые с использованием предохранительного клапана (рисунок 1.15).



Рисунок 1.15 – Предохранительный клапан сброса давления (а) и его установка на крыше резервуара СПГ (б)

Предохранительный клапан устанавливается на крыше резервуара и обеспечивает безопасность эксплуатации криогенной системы хранения. Для сброса избытка отпарного газа чаще всего применяются пружинные предохранительные клапаны («клапаны аварийного сброса газа»; «сбросные»). Конструкция таких предохранительных клапанов имеет настраиваемые на определенное давление срабатывания специальные тарелки (рисунок 1.16). Пружина клапана настраивается на требуемое давление, при превышении которого в резервуаре, шток клапана открывает проходное сечение и избыток газа сбрасывается. Как только давление в резервуаре снижается до требуемых пределов, клапан перекрывается и остается в закрытом положении до следующего превышения давления.

При срабатывании предохранительного клапана излишний объем отпарного газа в настоящее время утилизируется двумя способами: направляется на факел системы и сжигается или сбрасывается в атмосферу на свечу рассеивания [46]. И тот и другой способы ведут к значительным потерям топлива, а также представляют экологический ущерб, так как природный газ, как и продукты его сгорания, способствуют развитию парникового эффекта [65, 66].

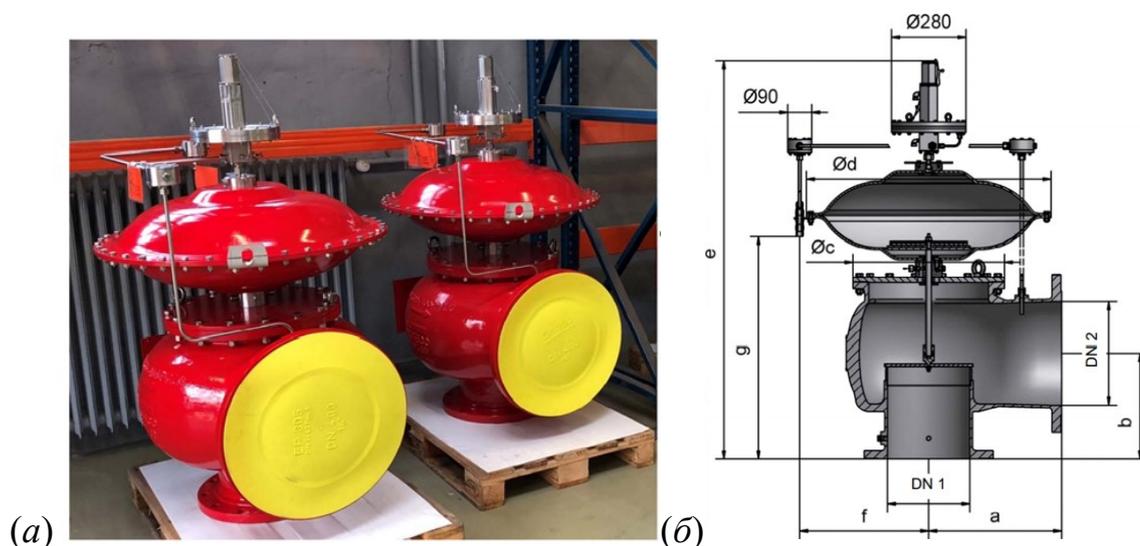


Рисунок 1.16 – Предохранительный клапан резервуара СПГ: внешний вид (а), схема (б)

Согласно долгосрочной программе развития производства СПГ в России [42], экологической повестке, а в частности сокращению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, уделяется особое внимание. Например, компания ООО «Криогаз-Высоцк» руководствуется снижением углеродного следа при выпуске продукции [32]. Активная политика декарбонизации ведется не только в Российской Федерации, но и во всем мировом энергетическом сообществе, однако количество кубических метров сжигаемого природного газа во всем мире, включая США, европейские страны, СНГ, Ближний восток и азиатско-тихоокеанский регион, за период с 2011 по 2021 г увеличилось в пределах от 0,6 до 8,3% [58].

В связи с актуальностью рассматриваемого вопроса, ученые активно разрабатывают способы регенерации отпарных газов при хранении и транспортировке СПГ с целью не только декарбонизации, но и рационального использования дорогостоящего ископаемого топлива. Такие предложения нашли отражения в работах авторов [41, 67, 78, 84, 86], а также в нормативной документации ряда стран [9, 10, 65].

Например, хотя на танкерах СПГ, как правило, применим способ сжигания отпарного газа, компания Wärtsilä [87] применяет для его утилизации технологию повторного сжижения за счет обратного азотного цикла Брайтона,

что позволяет использовать регенерированное топливо для судовых двигателей, а излишки возвращать в танкер.

В типовой технологической схеме приемного терминала СПГ, представленной авторами [76], рекомендуется использовать отпарной газ для вытеснения СПГ из танкеров при их разгрузке или компримирования до давления в трубопроводе потребителя. Однако, при отсутствии новых поставок СПГ или компрессора в системе рекомендуется утилизировать избыток паров сбросом на факел или в атмосферу.

Компания TheLindeGroup, являющаяся крупным производителем и поставщиком криогенного оборудования на энергетическом рынке, предлагает технологическую систему утилизации отпарного газа СПГ StarLiteLNG [84], путем его компримирования с последующим расширением на детандере, что обеспечивает его повторное использование. Такая система использует компрессор отпарного газа для повторного его сжижения, охладитель и конденсатор, пройдя которые, избыток топлива закачивается обратно в резервуар СПГ. Таким образом происходит регенерация топлива без выбросов на факел или свечу рассеивания. Однако применение такого компрессора влечет за собой капитальные и эксплуатационные затраты.

Технологическую обвязку с компрессором и теплообменником также предлагает автор Б.С. Рачевский [41]. «Принцип работы такой схемы заключается в том, что испаряющийся в результате притока тепла извне газ проходит теплообменник и поступает на всасывание компрессора, после чего подается в холодильник-конденсатор, где конденсируется при неизменном давлении, сконденсированная жидкость дополнительно переохлаждается встречным потоком газа в теплообменнике и затем дросселируется в вентиле до давления, соответствующего режиму хранения, поступая в резервуар СПГ (рисунок 1.17).[35]»

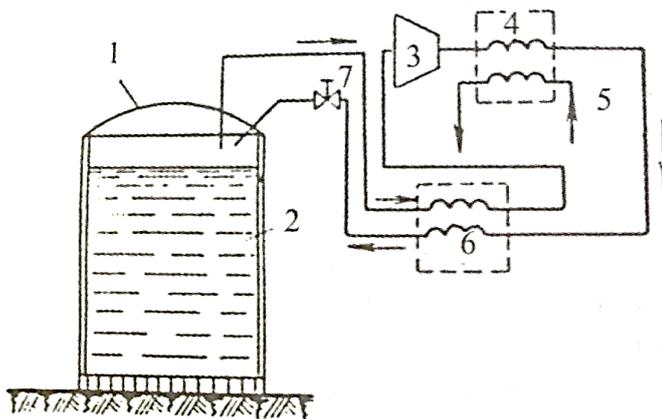


Рисунок 1.17 – Принципиальная схема поддержания низкотемпературного режима сжиженного газа в резервуаре: 1 – резервуар; 2 – сжиженный газ; 3 – компрессор; 4 – теплообменник-конденсатор; 5 – вода на охлаждение; 6 – теплообменник; 7 – дроссельный вентиль [41]

Способ поддержания переохлаждённого состояния сжиженного природного газа в резервуаре описан в патенте [33], который заключается в отведении части криогенной текучей среды, ее охлаждении жидким азотом и повторном введении обратно в зону жидкости резервуара для хранения, что исключает сброс газа из резервуара. Однако для реализации способа необходимо использование хладагента, подвергаемого захолаживанию на теплообменнике, а также применение насоса в случае необходимости циркуляции сжиженного природного газа из резервуара и обратно.

Авторы патента [35] предлагают способ хранения и отгрузки сжиженного природного газа, который применим для танкера-газовоза, который также требует обеспечение сброса отпарного газа. Способ включает закачивание СПГ после установки сжижения природного газа по криогенному трубопроводу сначала в наземный криогенный резервуар, а затем в танкер-газовоз, при этом отпарной газ, образующийся во время наполнения плавучего хранилища и перегрузки СПГ в танкер-газовоз, возвращают с помощью устройств приема отпарного газа по криогенному трубопроводу в компрессорную отпарного газа и далее в процесс сжижения природного газа. Недостатком данного способа является необходимость применения компрессорной отпарного газа для его

удаления и сжатия, что влечет за собой помимо капитальных, энергетических и эксплуатационных затрат выбросы при работе компрессоров из-за сгорания топлива.

В компании ООО «КриоГаз» [31] хранилища малотоннажного завода СПГ также оборудованы предохранительными клапанами и свечами рассеивания, однако их срабатывание происходит только в аварийных ситуациях. В соответствии с инструкцией по эксплуатации в рабочем режиме резервуаров, оборудованных обвязкой, отпарной газ распределяется по принципу сообщающихся сосудов или направляется на технологические нужды. Таким образом, в качестве целевого применения паровой фазы СПГ является:

- захлаживание потока природного газа в теплообменнике;
- регенерация цеолита в адсорбере;
- обратный возврат в сети газораспределения.

Стоит отметить, что применение отпарного газа в качестве адсорбента является экологически безопасным и простым в эксплуатации способом, однако, в данном случае, теряется энергия охлажденного отпарного газа из-за его преднамеренного нагрева. Обратный возврат в сети газораспределения также влечет потерю энергии охлажденного потока и необходимость в контроле процентного соотношения состава топлива.

Также известен способ для обработки отпарного газа на танкере СПГ с электрической гребной установкой и с функцией повторного сжижения [34], при котором отпарной природный газ, образующийся в грузовом танке танкера для перевозки сжиженного природного газа, сначала охлаждают, затем сжимают до давления, подходящего для применения в двухтопливном дизель-электрическом двигателе гребной установки, а избыточный отпарной природный газ, который не использовался, подвергают повторному сжижению с помощью теплообменного аппарата и подают в грузовой танк. Недостаток данного способа - дополнительные энергозатраты, необходимые на сжатие отпарного газа компрессором для подачи в теплообменный аппарат.

Способ хранения сжиженного природного газа в транспортной емкости [38] включает ее наполнение криожидкостью, хранение при избыточном давлении, отвод образующихся паров, их нагрев в теплообменнике и сброс в атмосферу. Безопасность хранения обеспечивается за счет сброса паров до минимального давления. Недостатком способа является необходимость нагрева паров в теплообменнике, что влечет за собой дополнительные энергозатраты и потери нагретого топлива, которое сбрасывается в атмосферу.

«С целью рекуперирования отпарного газа и предотвращения выбросов паров метана рынок криогенного оборудования предлагает компрессоры отпарного газа СПГ различных типов. Компания Пневмомаш производит и поставляет оборудование для компримирования природного газа, в том числе и для предотвращения выбросов паров метана и их повторного сжижения [12]. Для реализации такой технологии компания предлагает поршневой компрессор MIKUNI DN6-25BG2 для сжатия отпарного газа с производительностью от 0,1 м³/мин до 19 м³/мин; давление нагнетания 0,85 МПа; мощность 55 кВт (рисунок 1.18).» [56]



Рисунок 1.18 – Поршневой компрессор отпарного газа MIKUNI DN6-25BG2 [12]

По оценкам автора [87] в связи с сверхнизкой температурой всасывания отпарного газа, КПД компрессоров такого типа снижается на 37% по сравнению с аналогичными для природного газа с температурой 20°C. Потеря давления через всасывающий клапан при более низкой температуре всасывания больше, чем при температуре окружающей среды при постоянном объемном расходе.

«Вне зависимости от производителя, поршневой компрессор представляет собой машину для сжатия и подачи газа под давлением, что осуществляется за счет возвратно-поступательного движения поршня в цилиндре. Такое устройство требует дополнительных энергетических затрат для обеспечения работы электродвигателя, капиталовложений и эксплуатационных издержек. Кроме того, из-за наличия движущихся частей показатель надежности компрессора имеет более низкие значения по сравнению с устройствами, не осложненными механическим движением.» [56]

Таким образом, как показали результаты аналитического обзора, проблема утилизации отпарного газа СПГ стоит остро как с экономической, так и с экологической точек зрения и пути ее решения с использованием компрессора не всегда являются эффективными.

В то же время, существуют устройства, получившие название эжекторных, позволяющие увлекать пассивную газовую среду высокоскоростным потоком газа, которые, по мнению автора [37, 39, 54–56, 73, 74, 85], могут быть использованы в качестве эффективного средства для утилизации паров, образующихся при хранении СПГ. В качестве такой высокоскоростной среды может быть использован поток природного газа, поступающий в эжектор с ГРС или с магистрального газопровода.

1.4 Принцип работы эжекторных устройств, их конструкция и неисследованные вопросы

В основе работы эжектора лежит явление передачи кинетической энергии от одной среды (активной), движущейся с большей скоростью, к другой

(пассивной). При стационарном режиме работы устройства пассивный поток под действием разрежения, созданного активным потоком при истечении из сопла, увлекается в камеру смешения, где смешивается с активным потоком.

Вне зависимости от агрегатного состояния активной и пассивной сред (жидкость-газ, жидкость-жидкость, газ-газ) конструкция эжектора включает (рисунок 1.19):

- сопло потока активной среды с выходным сечением 1-1;
- сопло потока пассивной среды с выходным сечением 2-2;
- камеру смешения сечением 3-3;
- диффузор с выходным сечением 4-4.

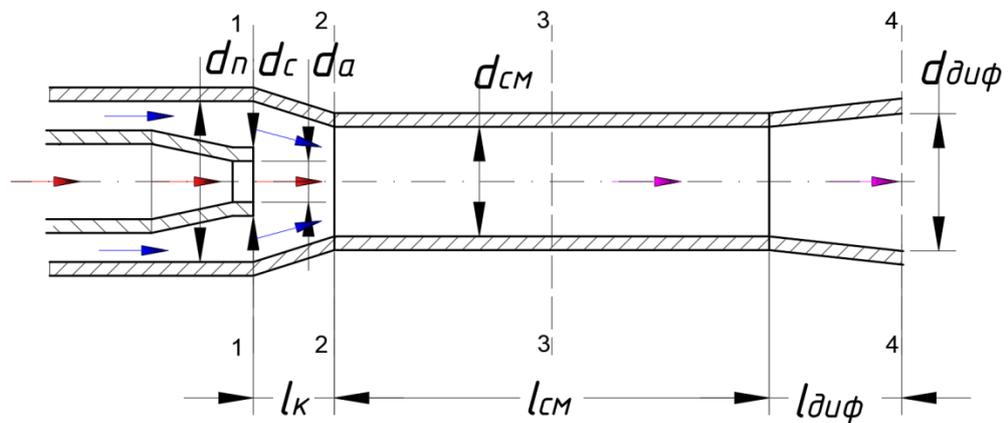


Рисунок 1.19 – Принципиальная схема эжектора:

d_a – диаметр отверстия на срезе сопла активного потока; d_c – диаметр сопла активного потока; d_n – диаметр сопла пассивного потока; $d_{см}$ – диаметр камеры смешения; $d_{диф}$ – диаметр диффузора; l_k – расстояние от среза сопла до камеры смешения; $l_{см}$ – длина камеры смешения; $l_{диф}$ – длина диффузора

Пассивный и активный потоки поступают в камеру смешения в виде двух отдельных потоков, которые могут отличаться по своим термодинамическим свойствам. В начальном участке камеры смешения наблюдается турбулентное движение потоков, далее они внедряются друг в друга и параметры газовой смеси плавно изменяются от значений в активном газе до значений в пассивном. При этом, в начальном участке камеры смешения частицы пассивного потока непрерывно захватываются активной струей за счет чего и

поддерживается разрежение на входе камеры смешения и обеспечивается увлечение пассивной струи газа.

Эжектор отличается простотой конструкции (рисунок 1.19), не имея сложных конструктивных элементов, за счет чего обладает высоким показателем надежности работы. Устройство может работать в широком диапазоне изменения параметров перекачиваемых сред, что позволяет легко регулировать процесс и переходить с одного режима работы на другой.

Благодаря указанным преимуществам эжекторные системы нашли широкое применение в газосборных сетях со скважинами высокого и низкого напора, в конденсационных системах паросиловых установок для увеличения мощности паровой машины или турбины, в системах с реактивным двигателем с целью его охлаждения и др. [1, 15], а также в работах авторов [61, 62, 71, 79].

Ниже приведены сведения о назначении основных элементов эжектора и влиянии их конструктивных особенностей и геометрических размеров на эффективность работы эжекторного устройства, выражаемой в виде коэффициента эжекции n (1.1):

$$n = G_n / G_a, \quad (1.1)$$

где G_n - массовый расход пассивной среды, G_a - массовый расход активной среды.

Сопло. Основным назначением сопел любой конструкции является подвод активного потока в камеру смешения с минимальными потерями. Исходя из необходимой скорости потока активной среды в эжекторе могут использоваться сопла различной конструкции, например, для достижения сверхзвукового потока - сопло Лавалья, для звукового потока - сужающееся сопло. Выбор конструкции сопла обусловлен существующим перепадом давлений смешиваемых сред (1.2):

$$P_0 = P_a / P_n, \quad (1.2)$$

где P_a - давление активного потока газа, P_n - давление пассивного потока газа.

При больших значениях $П_0$ - сопло Лавалья (сверхзвуковое), при малых – сужающееся сопло (звуковое). Наибольшее распространение в эжекторах получили звуковые сопла.

Известно [13, 59], что при истечении жидкости и газа из сужающегося сопла действительный расход газа отличается в меньшую сторону от теоретического, рассчитанного по формулам газодинамики. Разница в этих расходах выражается в виде коэффициента расхода μ (1.3):

$$\mu = G_d/G_m, \quad (1.3)$$

который представляет собой отношение действительного расхода G_d к теоретическому расходу газа G_m и учитывает потери энергии и сжатие струи в выходном сечении сопла. Однако, если для жидкости, истекающей через различные конфигурации сопел, этот коэффициент установлен, то для газовых сред, его значения или не приводятся или относятся, практически, только к соплу Лавалья. Фундаментальные исследования авторов [1, 16, 48], описывающие динамические свойства эжектирующих струй, также не включают диапазон потерь расхода при критическом истечении из сопла.

Что касается расчета μ , то информация по этому поводу оказалась весьма ограниченной. Так, по мнению [13, 18] коэффициент расхода сопла при истечении среды может быть представлен в виде произведения (1.4):

$$\mu = \varepsilon \cdot \varphi, \quad (1.4)$$

где $\varepsilon = F_{сжс}/F_a$ - коэффициент сжатия струи ($F_{сжс}$ - площадь сжатого сечения струи; F_a - площадь отверстия сопла); φ - коэффициент скорости, определяемый экспериментально-расчетным путем, как отношение экспериментально-установленной скорости потока в сечении сопла a_d к теоретической a_m (1.5):

$$\varphi = \frac{a_d}{a_m}, \quad (1.5)$$

или рассчитываемый, как $\varphi = 1/\sqrt{\alpha_k + \xi}$ (α_k - коэффициент Кориолиса, ξ - коэффициент местного сопротивления). При этом в [5] отмечается, что расчет каждого из множителей (1.4) представляет собой определенную сложность.

В работе [64] коэффициент расхода жидкости рассчитывается как отношение a_o/a_m , тем самым μ приравнивается к φ , а ε принимается равным единице, считая жидкость несжимаемой средой, что не эквивалентно для газовых сред.

В [18, 72] величина коэффициента расхода связывается с относительной длиной сопла l_c/d_a (l_c - длина сужающейся части сопла; d_a - диаметр выходного сечения сопла) с уточнением, что определение μ производится экспериментальным путем.

В статье [43] отмечается, что газодинамические потери в соплах различной конструкции *возрастают* с увеличением площади сечения сопла F_a , величины давления P и угла конусности γ т.е. $\mu \sim 1/F_a$; $\mu \sim 1/P$; $\mu \sim 1/\gamma$. В тоже время зависимость μ от длины цилиндрического участка сопла имеет другой характер - $\mu \sim l_c$.

По мнению [69], значения коэффициента расхода для газовых сред всегда меньше, чем для жидких, что связано с различием в вязкостях сред, и, как следствие, в режимах их течения.

О снижении коэффициента расхода с увеличением перепада давления до и после сопла упоминается в статье [81] с приведением экспериментальных данных, свидетельствующих, что при переходе отношений давлений с 1,1 МПа / 0,1 МПа к 0,4 МПа / 0,1 МПа значение коэффициента расхода увеличивается в 1,5-2 раза.

Определенную информацию о значениях μ для газовых сред, на примере отпарной фракции сжиженного природного газа, сбрасывающейся с критической скоростью через предохранительный клапан из резервуара хранения СПГ [14], удалось получить при анализе технических условий работы указанного клапана [8], из сопоставления приведенных значений эффективной

$F_{эф}$ и номинальной F_n площадей сечения в седле клапанов, как $\mu = F_{эф} / F_n$. Здесь ([8]) физический смысл коэффициента расхода для газа определяется, как отношение массового расхода газа через клапан к расходу газа через идеальное сопло с площадью отверстия, равной площади самого узкого сечения в седле клапана.

Рассчитанные значения μ в зависимости от давления среды до входа в клапан P^{ex} и номинального диаметра входного патрубка d приведены в таблице 1.2:

Таблица 1.2 – Коэффициент расхода для предохранительного клапана резервуара СПГ

P^{ex} , МПа	d , м	$F_{эф}$, м ²	μ
6	0,05	$0,12 \cdot 10^{-2}$	0,61
6	0,2	0,016	0,51
16	0,05	$0,46 \cdot 10^{-3}$	0,23
16	0,2	$0,64 \cdot 10^{-2}$	0,2

Из приведенных данных можно сделать вывод, что в зависимости от конструкции сужающегося устройства и условий истечения газа значение коэффициента μ может изменяться в весьма широких пределах и отсутствие достоверной информации по действительному расходу газа может привести к аварийной ситуации. В первую очередь, это касается объектов хранения сжатых газов и криогенных продуктов в резервуарах, к которым относится и СПГ.

Расстояние от среза сопла до камеры смешения (l_k) существенным образом влияет на эффективность эжектирования. Важной характеристикой эжектора является геометрический критерий l_k/d_a , где d_a – диаметр отверстия на срезе сопла (рисунок 1.18). Поиск такого критерия, обеспечивающего наибольшую эффективность работы устройства, явился актуальным для ряда ученых, исследовавших процессы, протекающие в жидкостно-газовых

эжекторах [15]. Сведений о значении оптимального удаления среза сопла от камеры смешения для газовых эжекторов в литературе не обнаружено.

Известно [1], что эффективная величина l_k для газовых эжекторов выбирается близкой к длине свободной, т. е. нерасширяющейся части струи. Эта длина, согласно [1], составляет $3 \div 5d_a$, после чего струя начинает расширяться и соприкасается со стенками камеры смешения. В первую очередь исчезает ядро активного потока, а на некотором расстоянии в сечении Г-Г (рисунок 1.20) область невозмущенных течений исчезает и пограничный слой струи заполняет все сечение камеры смешения. В дальнейшем по длине камеры продолжается процесс выравнивания параметров газа.

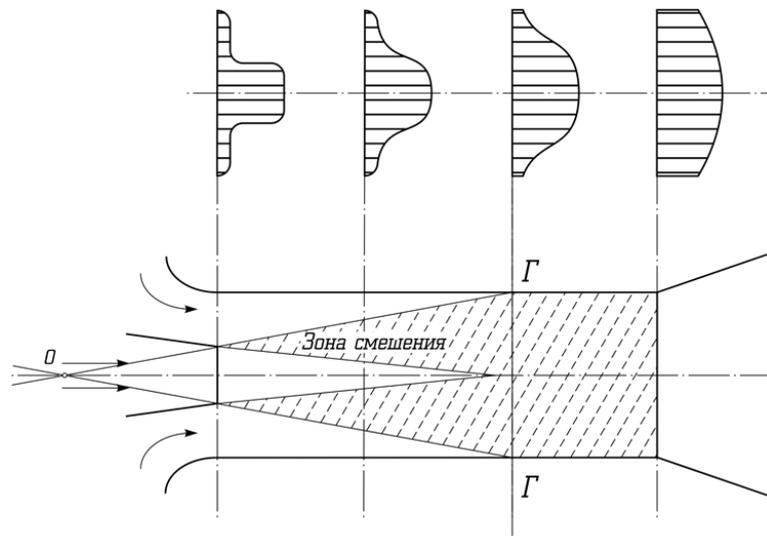


Рисунок 1.20 – Изменение поля скоростей по длине камеры смешения [1]

Расположение сопла эжектора на относительной близости к камере смешения, т.е. когда длина свободной струи больше l_k , приводит к пережатию эжектируемого потока на входе в камеру смешения и увеличению сопротивления этого участка. Следствием значительного удаления сопла от камеры смешения является расширение струи до входа в камеру смешения, что приводит к ударению ее о стенки входной части камеры, образуя обратные токи и завихрения, нарушая эжектирование [7]. Таким образом, оптимальное расстояние l_k должно быть равно длине свободной струи, чтобы активный поток смог эжектировать максимальное количество пассивного до входа в

камеру смешения. Однако длина свободной струи также требует уточнений, так как известен лишь диапазон ее изменения.

Основной геометрический параметр эжектора α – представляет собой отношение площадей выходных сечений сопел активного и пассивного потоков (1.6):

$$\alpha = \frac{F_a}{F_n} = \frac{F_a}{F_{см} - F_a} \quad (1.6)$$

где F_a – площадь отверстия на срезе сопла активного потока; F_n – площадь сопла пассивного потока, $F_{см}$ – площадь камеры смешения.

Как показывает анализ формул (1.1), (1.6) «...эжектор с более высоким значением α , позволяет создать более высокое давление смеси газов на выходе т.е. является *высоконапорным*, но не обеспечивает большие коэффициенты эжекции n . В тоже время, эжектор с малыми показателями α позволяет увлечь большее количество газа, но незначительно повышает давление смеси на выходе, являясь *низконапорным*» [1]. Поэтому выбор того или иного значения основного геометрического параметра α определяется назначением эжекторного устройства.

Согласно автору [1], при выборе необходимой величины α следует руководствоваться существованием зависимости (рисунок 1.21) между величиной α и предельным значением отношения полных давлений активного P_a и пассивного P_n потоков на срезе сопла эжектора, выше которого эффект эжекции прекращается ($n=0$) и наблюдается, так называемый, эффект «запирания».

Поскольку расходы активного и пассивного потоков пропорциональны их полным давлениям, коэффициент эжекции газового эжектора n также не может быть больше какой-то определенной величины (согласно графику рисунка 1.21 $n^{max} \sim 0,2$). Это подтверждается известными экспериментальными данными [28].

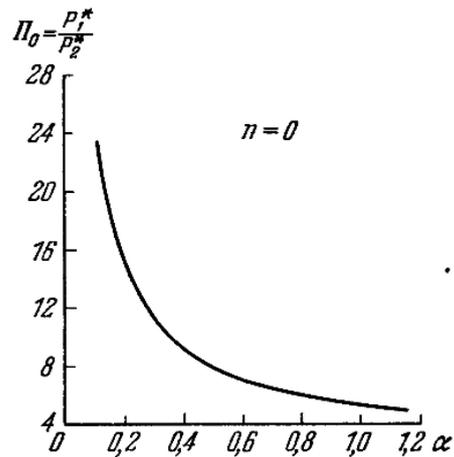


Рисунок 1.21 – Зависимость отношения полных давлений газов, при котором происходит запираание эжектора [1]

Камера смешения. Основное назначение заключается в обеспечении выравнивания поля скоростей двух потоков с наименьшими потерями на трение. С этой целью форма камеры может быть как цилиндрической постоянного диаметра, так и переменного сечения, а ее оптимальная длина выбирается путем обеспечения наименьших гидравлических потерь, наилучшего смешения потоков и наиболее выгодных габаритных размеров всего эжектора (в т.ч. металлозатрат). Сокращение длины камеры смешения может быть обеспечено увеличением расстояния от среза сопла до камеры смешения, однако, вопрос поиска наилучшей конфигурации для газового эжектора остается открытым. Для жидкостно-газового эжектора конструкцию входного участка камеры смешения рекомендовано [7] проектировать таким образом, чтобы его профиль соответствовал линиям тока эжектируемого газа с целью предотвращения кавитации и повышения КПД устройства. В связи с этим, авторы рекомендуют выполнять вход в камеру смешения в виде конфузора с большим радиусом скругления. Автор [48] отмечает, что для достижения меньших потерь при входе в камеру смешения эжектируемой струи профиль конфузора следует выполнять по лемнискате.

Диффузор. На основании уравнения Бернулли и уравнения неразрывности при увеличении диаметра сечения потока часть кинетической энергии преобразуется в потенциальную, при этом манометрическое давление

повышается, поэтому основным назначением диффузора является преобразование динамического напора потока в статическое давление. Эжектор может осуществлять работу и без диффузора в случае, если повышение статического давления на выходе не требуется. Минимизация потерь при проектировании диффузора является основной задачей, что может быть обеспечено за счет оптимальной его длины, угла конусности, гладкости труб, а также условий входного потока. Авторы [1, 48] рекомендуют выбирать угол распора в диапазоне $\beta=4\div 8^\circ$ для равномерного заполнения потоком участка эжектора. Превышение угла раскрытия приводит к вихреобразованию и неравномерному распределению скоростей в выходном сечении эжектора.

Место ввода низконапорного потока в эжектор и его направление относительно среза сопла активного потока оказывают влияние на степень эжектирования. Авторы [7], проводя испытания водоструйных эжекторов, отмечают, что ввод пассивного потока следует осуществлять вблизи к срезу сопла, с целью предотвращения гидравлических сопротивлений при всасывании, приводя следующие конструктивные варианты: (рисунок 1.22): параллельный (а), плавный (б) и угловой 90° (в). Отмечается, что более плавный подвод сокращает потери энергии незначительно, но усложняет технологию изготовления такой конструкции, поэтому для водоструйных эжекторов рекомендуется параллельный или угловой вариант. Однако для газового эжектора оптимальная конструкция подвода пассивного потока найдена не была.

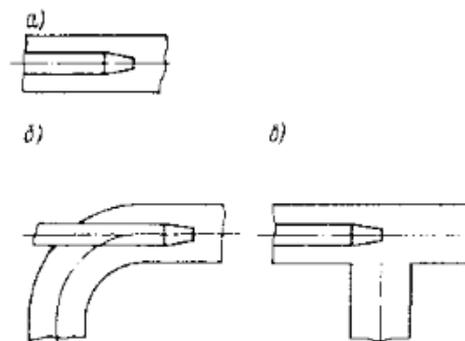


Рисунок 1.22 – Конструктивные варианты подвода пассивного потока в эжектор: (а) – параллельный, (б) – плавный, (в) - перпендикулярный [7]

Давление в емкости на выходе из эжектора. Классические модели расчета газового эжектора [1] основаны на работе устройства при постоянном статическом давлении на выходе из диффузора, т.е. истечение смеси происходит в атмосферу или в резервуар с постоянным давлением газа. Существующие эжекторные устройства, как правило, жидкостно-газовые, работают при сбросе продуктов эжекции также в емкость постоянного давления.

Например, разработана технология улавливания паров нефти из резервуаров типа РВС с применением жидкостно-газового эжектора [25], который отбирает паровоздушную смесь из нефтяного резервуара в сепаратор с ее разделением и возвратом компонентов в систему.

На нефтяном месторождении Урало-Поволжья нашла применение жидкостно-газовая эжекторная система по увлечению попутного нефтяного газа в сепаратор, который соединен с линией обратного потока, направляющей воду на компрессор для нагнетания высокого давления и использующуюся в качестве эжектирующего потока. Давление в сепараторе поддерживается на постоянном уровне [17].

Сведений о существовании газовых эжекторных систем, предполагающих нагнетание смеси эжектирующего и эжектируемого потоков в аккумулирующую емкость замкнутого объема с возможностью повышения в ней давления в литературе не обнаружено.

1.5 Существующий алгоритм расчета газового эжектора и его анализ

Разработке методов расчета рабочих характеристик эжектора и поиску наиболее эффективных его конструкций посвящены научные исследования таких ученых как К.Г. Донец [16], Г.Н. Абрамович [1], А.П. Ерохин [64], Е.Я. Соколов [45], А.Н. Дроздов [17], Е.А. Любин [25, 73], Н.В. Морозова [28], *Aidoun Z* [51, 52], *Ameur K* [52, 53] и др. В то же время сведений о применении эжектора для транспортировки отпарного газа из резервуара СПГ, как и

методов расчета его рабочих характеристик и геометрических размеров для этого случая, в литературе не обнаружено.

Согласно схеме расчета, предложенной Г.Н. Абрамовичем [1], которая является общепризнанной, расчет эжектора сводится к определению параметров газа на выходе из эжектора при заданных характеристиках входных потоков.

Согласно ей течение газа в любом участке смесительной камеры описывается тремя уравнениями сохранения массы (1.7), количества движения (1.8), энергии (1.9):

$$G_{см} = G_a + G_n ; \quad (1.7)$$

$$(G_a + G_n)a_{см} = G_a a_a + G_n a_n ; \quad (1.8)$$

$$G_{см} \left(c_{pсм} T_{см} + \frac{a_{см}^2}{2} \right) = G_a \left(c_{pa} T_a + \frac{a_a^2}{2} \right) + G_n \left(c_{pn} T_n + \frac{a_n^2}{2} \right) + Q, \quad (1.9)$$

где параметры в сечении 1-1 (рисунок 1.23) активного газа имеют подстрочный индекс a , пассивного газа – n , в сечении 3-3 смеси активного и пассивного газов – подстрочный индекс $см$ (рисунок 1.18, 1.19); G – секундный массовый расход, кг/с, a – скорость потока, м/с, c_p – теплоемкость потока, кДж/кг·°С, T – температура потока, К, Q – общее количество тепла, подводимое за 1 с к газу в смесительной камере путем теплопередачи через стенки камеры или выделяющееся вследствие химических реакций в потоке, кДж.

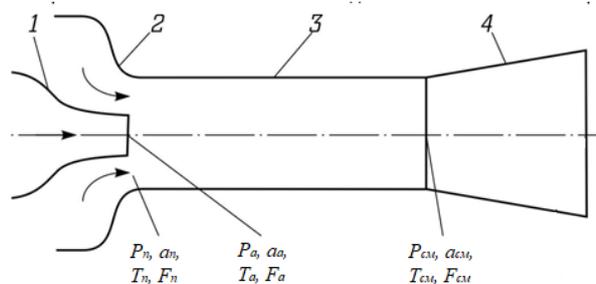


Рисунок 1.23 – Расчетная схема эжектора со звуковым соплом:

1 - сопло активного газа, 2 - сопло пассивного газа, 3 - камера смешения, 4 - диффузор

1. Из закона сохранения массы расход смеси газов на выходе из камеры смешения: $G_{см} = G_a + G_n$; $n = G_n / G_a$; $G_{см} / G_a = n + 1$.

2. Из закона сохранения энергии температура торможения и критическая скорость (1.10), (1.11):

$$\frac{T_{см}^*}{T_a^*} = \frac{n\theta + 1}{n + 1}; \quad (1.10)$$

$$\frac{a_{см}^*}{a_a^*} = \sqrt{\frac{n\theta + 1}{n + 1}}, \quad (1.11)$$

где $\theta = \frac{T_n^*}{T_a^*}$. Справедливо для расчета процесса эжекции, не сопровождающегося процессом горения или иными реакциями.

3. Из уравнения количества движения основное уравнение эжекции (1.12):

$$\sqrt{(n + 1)(1 + n\theta)} \cdot z(\lambda_{см}) = z(\lambda_a) + n\sqrt{\theta} \cdot z(\lambda_n), \quad (1.12)$$

где $\lambda_{см}$ – приведенная скорость смеси, $z(\lambda_{см}) = \lambda_{см} + \frac{1}{\lambda_{см}}$ – газодинамическая функция.

4. Из закона сохранения массы, учитывая найденную приведенную скорость смеси, полное давление смеси (1.13):

$$P_{см}^* = \frac{\sqrt{(n + 1)(1 + n\theta)}}{1 + 1/\alpha} \cdot \frac{q(\lambda_a)}{q(\lambda_{см})} \cdot P_a^*, \quad (1.13)$$

где $q(\lambda)$ – газодинамическая функция.

5. Связь коэффициента эжекции n с основным геометрическим параметром α и параметрами газов на входе в камеру (1.14):

$$n = \frac{1}{P_a^* / P_n^* \cdot \alpha \sqrt{\theta}} \cdot \frac{q(\lambda_n)}{q(\lambda_a)}. \quad (1.14)$$

Сведений о влиянии давления и расхода активной среды на коэффициент эжекции при указанной схеме расчета в трудах [1], как и других авторов, не обнаружено.

Можно отметить, что в своих трудах Г.Н. Абрамович в качестве характеристики эффективности работы эжектора использует параметр коэффициента эжекции n , не рассматривая такой параметр как коэффициент полезного действия эжектора η . В тоже время другие авторы, например, [28] выражают эффективность работы эжектора через коэффициент полезного действия, который представляет собой отношение полезно использованной мощности к затраченной (1.15):

$$\eta = \frac{G_n P_n (P_{см} - P_n)}{G_a P_{см} (P_a - P_{см})}. \quad (1.15)$$

Как следует из изложенного выше, существующий алгоритм расчета эжектора сводится к определению параметров газа на выходе из эжектора при известных характеристиках входных потоков. В тоже время, при разработке эжектора для утилизации паров СПГ требуется решение обратной задачи - по известному расходу пассивной среды и давлению смеси газов в емкости определить необходимые параметры активного потока, чему и посвящена следующая глава.

1.6 Выводы по главе 1

1. Несмотря на многообразие существующих технологических схем и способов утилизации отпарного газа все они имеют ряд недостатков и нерешенных проблем:

- сжигание отпарного газа приводит к выделению продуктов сгорания в атмосферу, что противоречит соглашению в рамках Рамочной конвенции ООН об изменении климата, регулиющему меры по снижению содержания углекислого газа в атмосфере с 2020 года;

- сжигание или сброс отпарного газа на свечу рассеивания приводит к потере энергоресурса. При этом повышение температуры окружающей среды на 1 °С вызывает изменение расхода отпарных газов из хранилищ СПГ приблизительно на 0,2 %, и, как следствие, значительные потери топлива;

- применение компрессора для повышения давления отпарного газа с целью его дальнейшего использования сопровождается значительными энергетическими потерями и капитальными затратами, а также снижает надежность всей системы.

2. Сведений о существовании газовых эжекторных систем, предназначенных для утилизации отпарных паров из резервуара СПГ и нагнетании их в аккумулирующую емкость замкнутого объема, в литературе не обнаружено.

3. Существующие алгоритмы расчета газового эжектора сводятся к определению параметров газа на выходе из эжектора при известных характеристиках входных потоков. В тоже время при разработке эжектора для утилизации паров СПГ требуется решение обратной задачи - по известному расходу пассивной среды и необходимом давлении смеси газов в емкости определить необходимые параметры активного потока.

4. Ряд геометрических параметров газового эжектора определен лишь в диапазоне значений, что затрудняет его конструирование.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ, МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ПРОЦЕСС ЭЖЕКТИРОВАНИЯ ОТПАРНОГО ГАЗА ВЫСОКОНАПОРНЫМ ПОТОКОМ

2.1 Условия проведения эксперимента, необходимые для моделирования процесса эжекции отпарного газа

В связи с выявлением ряда неисследованных вопросов в области процесса эжектирования в газовом эжекторе и расчётах его конструктивных особенностей представлялось необходимым разработать установку, обеспечивающую проведение экспериментов в условиях, моделирующих процесс эжектирования отпарного газа газовым потоком высокого давления.

Для чего в установке *требовалось обеспечить*:

- источники высокого и низкого давления, имитирующие активный и пассивный потоки соответственно с обеспечением критического перепада их давлений;
- непрерывный подвод активного и пассивного потоков к эжекторному устройству;
- возможность изменения расхода и давления пассивной и активной сред;
- поддержание давления активного и пассивного потоков на постоянном уровне;
- возможность истечения смеси эжектируемого и эжектирующего газов из эжектора в атмосферу и в емкость замкнутого объема;
- непрерывное измерение давления и расхода активной и пассивной сред;
- конструирование модельного эжектора в виде разъемной конструкции, позволяющей изменять геометрические характеристики ее составных элементов.

Основные вопросы, которые представлялось необходимым решить на создаваемой экспериментальной установке:

- влияние расхода и давления активной среды на расход пассивной;
- определение условий запираания эжектора и граничных значений основного геометрического параметра α ;
- установление оптимального соотношения l_k/d_a ;
- определение места ввода пассивного потока, обеспечивающего наиболее эффективную эжекцию;
- определение коэффициента расхода сопла и редуктора;
- подтверждение возможности и условий аккумуляции смеси активного и пассивного потоков газа, истекающих из эжектора в емкость замкнутого объема.

В качестве активной и пассивной сред был выбран воздух как доступная и безопасная газовая среда с показателем адиабаты ($k=1,4$) близким к величине аналогичного параметра для отпарных паров и природного газа ($k=1,32$).

При выборе необходимых параметров пассивной среды исходили из имеющего место на практике расхода $G_n=0,001-0,006$ кг/с и давления $P_n=0,1$ МПа (изотермическое хранение СПГ) и $0,3$ МПа (хранение при повышенном давлении) отпарных газов в хранилище СПГ объемом $V=50$ м³, как наиболее широко используемого.

За максимальное давление активной среды $P_a=0,9$ МПа принималось давление, при котором перепад $P_a/P_n < 12$ не приводит к эффекту запираания [1]. Поскольку одной из задач эксперимента являлось определение зависимости коэффициента эжекции η от давления и расхода активной среды, эти параметры варьировались в широком интервале значений, что достигалось изменением величины P_a и диаметра отверстия сопла d_a от 3 до 5 мм. Изменение диаметра d_a в случае использования различных съемных сопел при неизменных габаритах корпуса эжектора (диаметра d_n) позволяло изменять основной геометрический параметр α (1) в интервале значений $0,09 \div 0,4$, а также расход активного потока G_a в интервале $0,0076 \div 0,038$ кг/с, рассчитанный исходя из критического истечения газа как $G_a = a_a^* F_a \rho_a^*$.

Варьирование l_k в диапазоне значений 9-15 мм позволяло оценить влияние параметра l_k/d_a на коэффициент эжекции. Допускалось, что процесс истечения адиабатный, а начальная температура активной и пассивной сред одинакова и равна $T=293$ К.

Правильность выбора необходимых геометрических параметров эжектора подтверждалась сравнением его основной характеристики - зависимости коэффициента эжекции n от относительного безразмерного перепада давлений P_{cm}/P_n , с представленными в литературе (рисунок 2.1). В таблице 2.1 приведены значения P_{cm}/P_n для рассчитанного экспериментального эжектора при различных диаметрах сопла активного газа d_a , обеспечивающих различные значения коэффициента α .

Таблица 2.1 - Термодинамические и геометрические характеристики эжектора при различных диаметрах сужающегося сопла

Диаметр сопла			$d_a=3$ мм $\alpha=0,16$		$d_a=4$ мм $\alpha=0,33$		$d_a=5$ мм $\alpha=0,64$	
			P_{cm}/P_n	n	P_{cm}/P_n	n	P_{cm}/P_n	n
P_a	P_n	P_0	P_{cm}/P_n	n	P_{cm}/P_n	n	P_{cm}/P_n	n
МПа	МПа		МПа		МПа		МПа	
0,9	0,3	3	1	0,41	1,27	0,2	1,67	0,1
0,7		2,33	0,9	0,52	1,1	0,25	1,3	0,13
0,5		1,67	0,8	0,73	0,9	0,36	1,07	0,18

Видно (рисунок 2.1 а), как и в случае [1] (рисунок 2.1 б), коэффициент эжекции возрастает при понижении давления активного потока и достигает максимальных значений при использовании сопла с диаметром отверстия $d_a=3$ мм, а установленная зависимость $P_{cm}/P_n=f(n)$ для экспериментального эжектора симбатна представленной в классической работе [1].

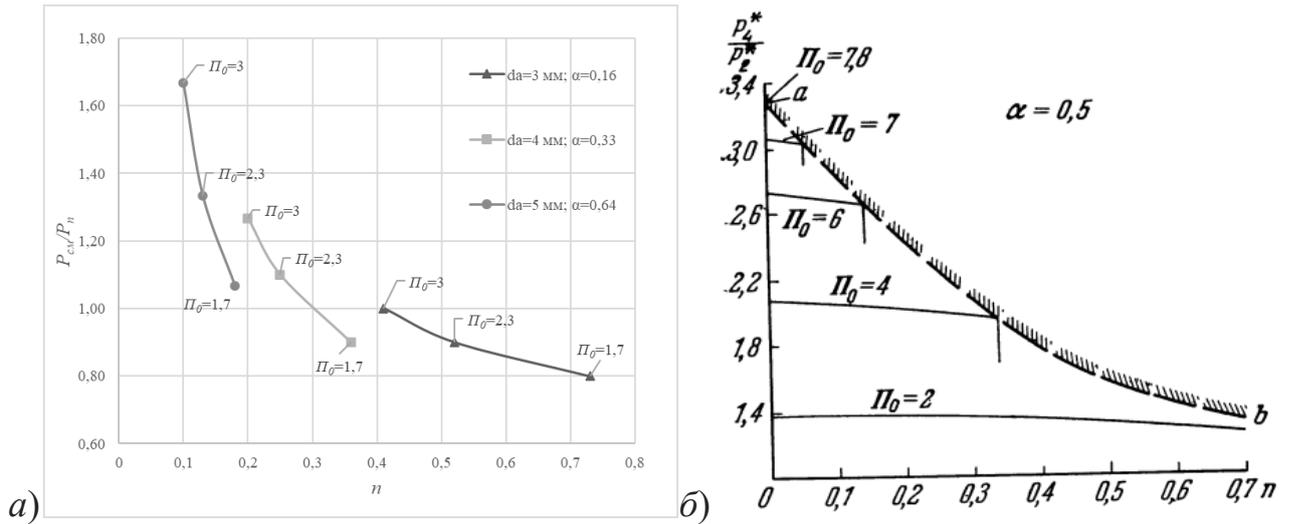


Рисунок 2.1 – Основная характеристика эжектора, рассчитанного для проведения экспериментов (а) и представленного в литературе [1](б)

Расчет конструктивных параметров эжектора (рисунок 1.18) производился, исходя из выбранного диаметров сопла $d_a = 3$ мм, как наиболее эффективного, и значений G_n , n , G_a с учетом известных соотношений [3, 48]:

1. Диаметр камеры смешения (2.1):

$$d_{cm} = 1,55d_a(1+n), \quad (2.1)$$

2. Площадь диффузора (2.2), диаметр диффузора (2.3):

$$F_{диф} = \frac{G_a(1+n)}{\rho_a a_{cm}}, \quad (2.2)$$

$$d_{диф} = \sqrt{\frac{4F_{диф}}{\pi}}, \quad (2.3)$$

3. Расстояния от среза сопла до камеры смешения при $n \geq 0,5$ (2.4), при $n < 0,5$ (2.5):

$$l_{\kappa} = \frac{0,37+n}{4,4a} d_a, \quad (2.4)$$

$$l_c = (\sqrt{0,083 + 0,76n} - 0,29) \frac{d_a}{2a}, \quad (2.5)$$

где $a=0,07 \div 0,09$;

4. Длина камеры смешения (2.6):

$$l_{см} = 6 \div 10 d_{см}; \quad (2.6)$$

5. Длина диффузора (2.7):

$$l_{диф} = (6 \div 7)(d_{диф} - d_{см}); \quad (2.7)$$

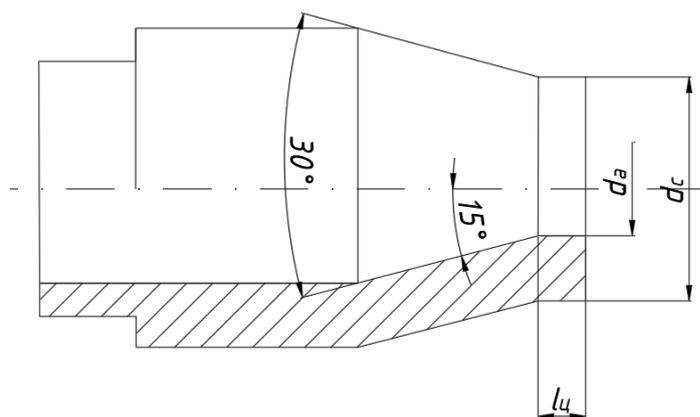
6. Угол сужения конфузора: $\alpha=10 \div 12^\circ$; угол распора диффузора: $\beta=5 \div 7^\circ$;

7. Форма сопла: звуковое сопло с конусообразным профилем, угол сужения – $\gamma=15^\circ$, цилиндрический участок на срезе длиной $l_{ц} = 0,25 \div 0,5 d_a$ (рисунок 2.2).

Результаты расчета представлены в таблице 2.2. Эскиз сопла модельного эжектора и сам эжектор представлены на рисунках 2.2, 2.3.

Таблица 2.2 – Результаты расчета геометрических параметров эжектора для экспериментального стенда

Расчетный параметр	Результат расчета
Площадь сопла F_c	$7,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$
Диаметр сопла d_a	3 мм
Диаметр смесительной камеры $d_{см}$	8 мм
Длина смесительной камеры $l_{см}$	63 мм
Диаметр диффузора $d_{диф}$	9,5 мм
Длина диффузора $l_{диф}$	11 мм
Угол сужения конфузора α	168°
Угол распора диффузора β	170°



d_a , мм	d_c , мм	l_u , мм
3	7	1,5
4	8	2
5	9	2,5

Рисунок 2.2 – Сопло модельного эжектора

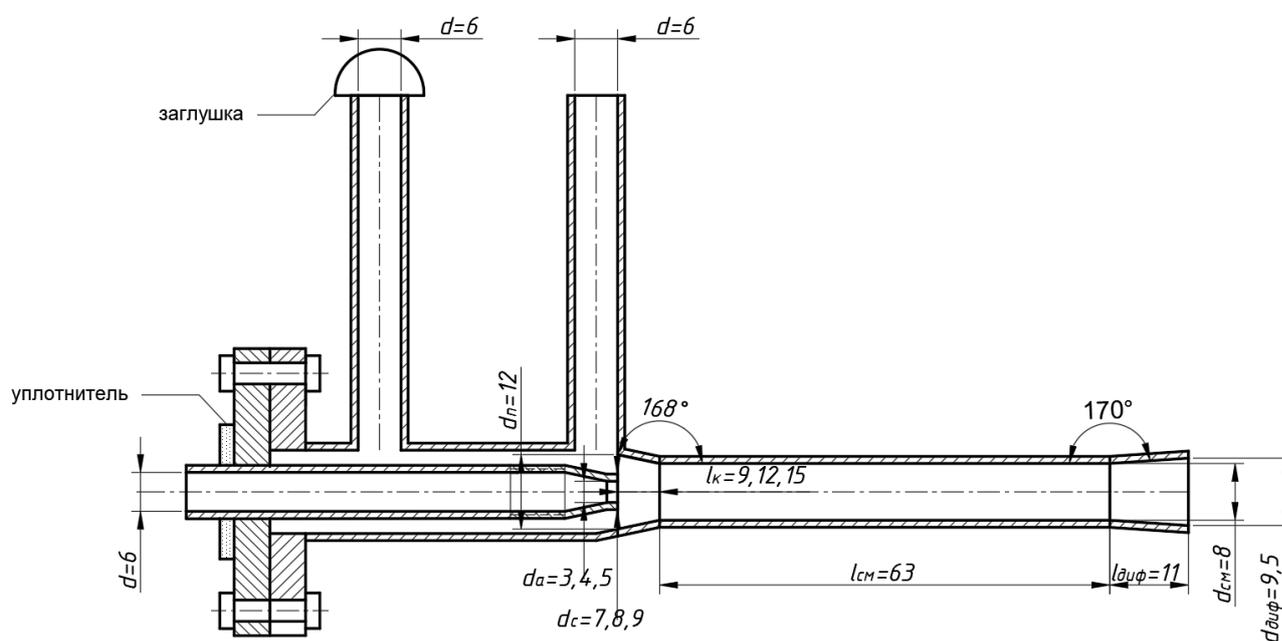


Рисунок 2.3 – Схема модельного эжектора

Разработанный эжектор обеспечивал:

- герметичность системы, что достигалось использованием уплотнительных фторопластовых элементов;
- возможность изменения расстояния от среза сопла до камеры смешения $l_k=9;12;15$ мм за счет уплотнителя, фиксирующего высоконапорный патрубков или резьбы на нем;
- 3 вида сужающихся сопел с переменным критическим диаметром $d_a=3;4;5$ мм, которые фиксируются на высоконапорном патрубке с помощью резьбы (выбранный диапазон обусловлен наиболее эффективными параметрами

на выходе из эжектора и предупреждением наступления эффекта запираания, согласно рисунку 1.21);

- изменение точки подачи низконапорного потока со среза сопла на межтрубное пространство путем установки заглушки (рисунок 2.3).

2.2 Схема экспериментальной установки, ее аппаратурное оформление и последовательность операций

Допущения, принятые при разработке экспериментальной установки (рисунок 2.4), имитирующей утилизацию паров СПГ эжекторным устройством:

- функции источника отпарного газа выполняет баллон 9 с сжатым воздухом;
- функции источника активной среды - ресивер 2 с сжатым воздухом;
- функции емкости для аккумуляции смеси активного и пассивного газов – баллон 19;
- функции предохранительного клапана на резервуаре СПГ - редуктор 12, позволяющий поддерживать постоянное давление пассивной среды на входе в эжектор;
- функции устройства, позволяющего поддерживать постоянное давление активной среды на входе в эжектор - редуктор 5.

Аппаратурное оформление экспериментальной установки (рисунок 2.4):

- поршневой компрессор 1 REMEZA СБ4/С-100.LB30 (давление 1,05 МПа; ресивер 2 объемом 0,1 м³; манометр 3 класса точности 1 с погрешностью 0,016 МПа);
- баллоны 9,19 объемом 0,4 м³;
- краны шаровые 4, 8, 11, 21, 22 с номинальным диаметром проходного сечения 6 мм, соответствующим диаметру подводящей трубки к соплу;
- редукторы 5, 12 с номинальным диаметром проходного отверстия 6 мм, снабженный манометром класса точности 1 с погрешностью 0,01 МПа;

- электронные датчики давления 6, 14, 18 с точностью $\pm 1\%$ FS, передающий данные на персональный компьютер с частотой в 1 секунду;
- манометры 10, 20 класса точности 2,5 с погрешностью 0,06 МПа;
- датчик расхода 13 Festo SFAB-50U-WQ6-2SV-M12 с точностью $\pm (3\% \text{ o.m.v.} + 0,3\% \text{ FS})$.

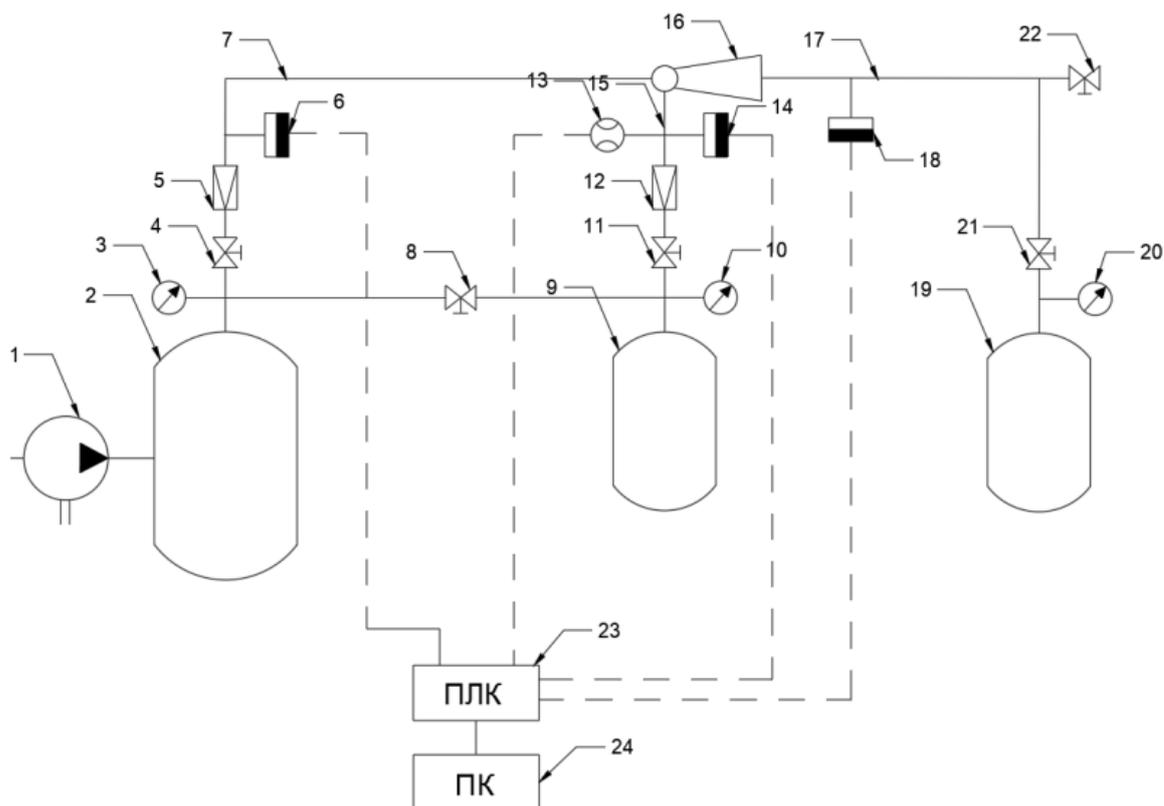


Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки:

1 – компрессор; 2 – ресивер; 3, 10, 20; 4, 8, 11, 21, 22 – кран шаровый; 5, 12 – редуктор; 6, 14, 18 – датчик давления; 7, 15 – линии подвода сжатого воздуха; 8 – баллон для сжатого воздуха; 9, 19 – баллон; 13 – датчик расхода; 16 – эжектор; 17 – линия отвода сжатого воздуха из эжектора; 12 – программируемый логический контроллер; 13 – персональный компьютер

Последовательность операций при проведении экспериментов:

1. Шаровые краны на линиях подачи сжатого воздуха 4, 11 закрыты, шаровый кран 8 на линии, соединяющей ресивер и баллон 9, открыт. Компрессор 1 нагнетает воздух в баллон 9 с избыточным давлением 1 МПа

(максимально возможное давление компрессора), что регистрируется манометром 10. После чего шаровый кран 8 закрывается.

2. Компрессор 1 нагнетает и поддерживает давление в ресивере 2 - 1 МПа, что регистрируется манометром 3.

3. После открытия шаровых кранов 4, 11 устанавливается необходимое давление в линиях 7 и 15 редукторами 5, 12, что фиксируется датчиками давления 6, 14, передающими показания на персональный компьютер 24 с помощью программируемого логического контроллера 23.

4. Открывается шаровый кран 22 или 21 (в зависимости от выбранной схемы), пассивный поток по линии 15 увлекается активным, прошедшим через сопло газового эжектора 16. Производится измерение расхода пассивного газа датчиком расхода 13. Давление на выходе из эжектора регистрируется датчиком давления 18, а при подключении аккумулирующей емкости регистрируется давление в ней манометром 20.

5. Редукторы 5, 12 регулируют постоянную подачу соответствующего давления в эжектор. Операция повторяется до момента понижения давления на выходе из ресивера 2 или баллона 9 ниже устанавливаемого предела.

Для определения коэффициента расхода экспериментально-расчетным путем для критического истечения газового потока из сужающегося сопла различного внутреннего диаметра экспериментальная установка (рисунок 2.4) модернизировалась путем отсоединения баллонов 9 и 12, при этом из ресивера 2 постоянного объема через сужающиеся сопла диаметрами $d_a=3; 4; 5$ мм в окружающую среду истекал газовый поток. Давление на редукторе 5 настраивалось в диапазоне $P_a^0=0,5\div 0,9$ МПа. В каждый момент времени истечения t^i манометром 3 фиксировалось давление в емкости $P_{ем}^i$, а датчиком давления 6 давление на входе в сопло P_a^i . Задачей эксперимента являлось построение временной зависимости фактического массового расхода при истечении воздуха из емкости и сравнение с массовым расходом, рассчитанным при коэффициенте расхода $\mu=1$.

Поскольку в условиях реальных производств не всегда удается обеспечить необходимую чистоту внутренней поверхности такого конструктивно сложного изделия как эжектор, эксперименты проводились при использовании сопел как после, так и до механической обработки с целью оценки влияния наличия механических дефектов на величину расхода.

Внешний вид изготовленных сопел с приваренной подводящей трубкой представлен на рисунке 2.5 (а). Рисунки 2.4 (б), 2.4 (в) иллюстрируют внутреннюю поверхность сопел до и после механической обработки. Из рисунка 2.4 (б) видно, что из-за сварки на внутренней поверхности сопла имеют место механические дефекты в виде наплывов металла.

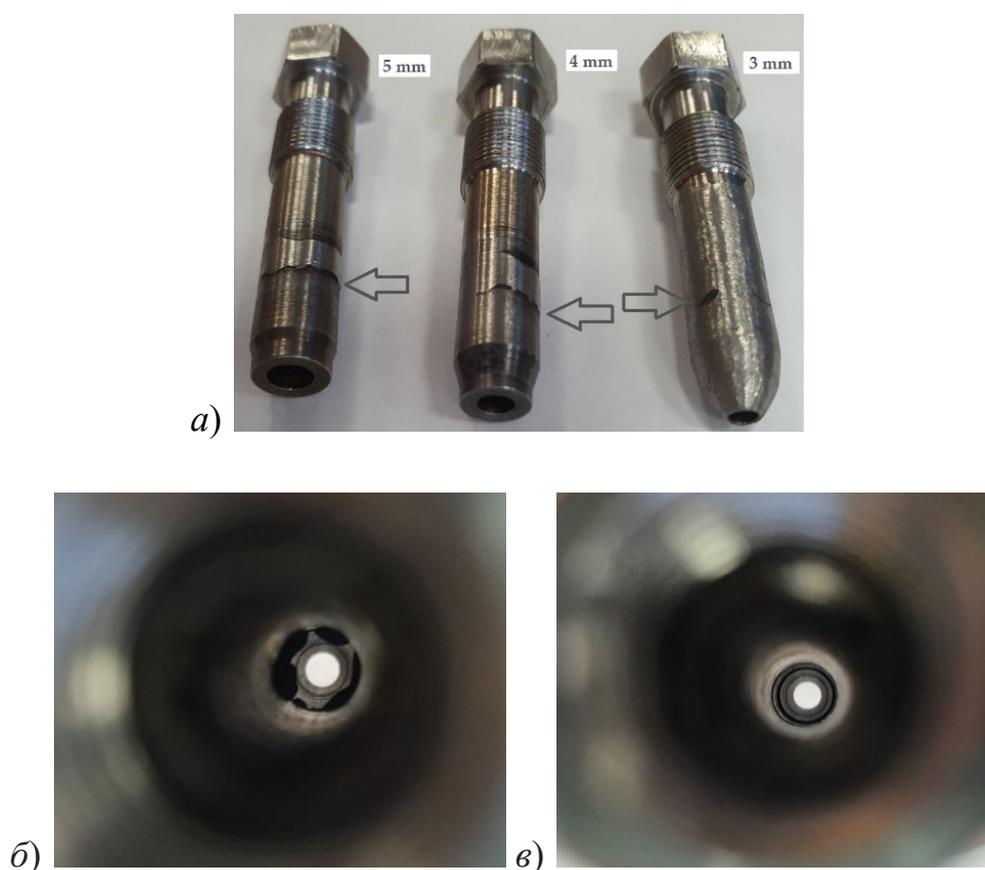


Рисунок 2.5 – Внешний вид (а) сопла с приваренной подводящей трубкой (стрелка – место сварки), вид внутренней поверхности сопла до (б) и после (в) механической обработки

2.3 Выводы по главе 2

Для решения ряда неисследованных вопросов в области применения газовых эжекторов, методах расчета их термодинамических и конструктивных параметров, разработана схема экспериментальной установки, моделирующей процесс увлечения пассивной газовой среды активной и позволяющей оценить влияние на эффективность эжектирования следующих факторов:

- давления и расхода активной и пассивной сред;
- расстояния от среза сопла до камеры смешения l_k ;
- места ввода пассивной среды в эжектор;
- основного геометрического параметра α ;
- коэффициента расхода сопла и редуктора;
- наличия на выходе эжектора аккумулялирующей емкости замкнутого объема.

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Исследование влияния давления и расхода активной среды на эффект эжекции

Ввиду того, что эффективность эжекторного устройства выражается в коэффициенте эжекции n , влияние давления и расхода активной среды исследовали именно для этого параметра.

При установлении коэффициента эжекции расход пассивного потока устанавливался экспериментально (по расходомеру 13 рисунка 2.4), расход активного G_a , вследствие отсутствия аналогичного оборудования на линии активного газа, - расчетным методом.

Использовалось известное соотношение (3.1) [47], справедливое для критического режима истечения сжатого газа, т.е. при соблюдении условия

$$P_a / P_n > \beta^*, \beta^* = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}:$$

$$G = \mu F \beta \frac{P(t)}{\sqrt{RT}}, \quad (3.1)$$

где $P(t)$ – давление перед соплом в i -ый момент времени; μ - коэффициент расхода сопла (в нашем случае зависит от величины сопротивления, создаваемого редуктором); F - площадь отверстия сопла; R - удельная газовая постоянная; T - температура газа перед соплом; $\beta = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$, k - показатель адиабаты.

Давление перед соплом устанавливалось двумя методами:

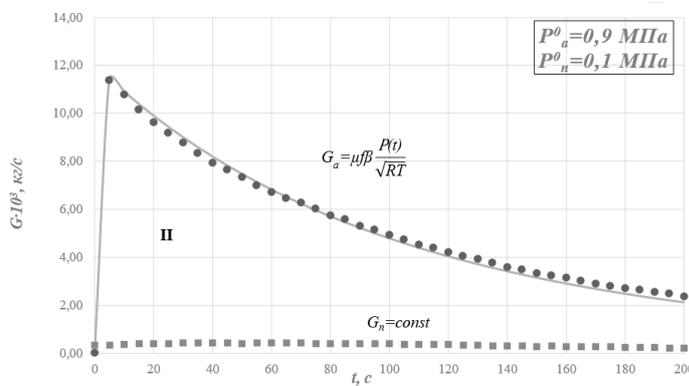
- 1 – экспериментально, как показания датчика давления 2 (рисунок 2.4) перед соплом;
- 2 – расчетным путем, исходя из начального давления в емкости P^0 из [47] (3.2):

$$P(t) = \frac{P^0}{(B_0 t + 1)^{\frac{2k}{k-1}}}, \quad (3.2)$$

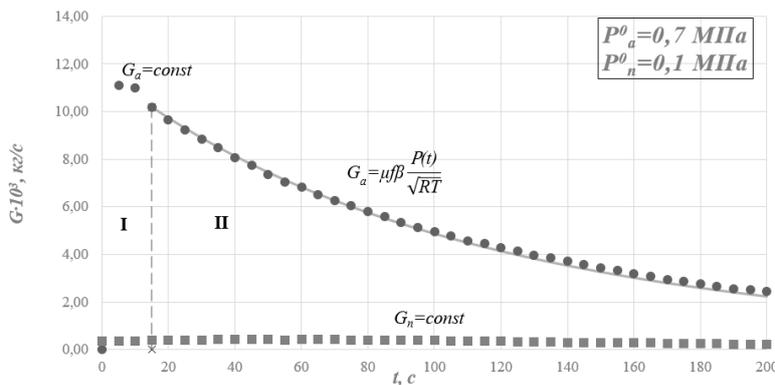
где $B_0 = \frac{\mu F \sqrt{kRT^0}}{V} \frac{k-1}{2} \sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$, T^0 – температура газа в емкости в начальный момент времени, V – объем емкости, м³.

Результаты расчетов G_a (3.1), проведенные с использованием экспериментально установленной зависимости $P^i=f(t)$ в предположении, что активная среда поступает к соплу из емкости через редуктор при постоянной температуре ($T^0 = const = 293$ К) при давлении пассивной среды $P_n=0,1$ МПа, 0,3 МПа и диаметрах отверстий сопла 3 и 4 мм представлены ниже (точки на рисунках 3.1, 3.2). Линии на рисунках – вид функции, рассчитанный в соответствии с (3.2). Там же приведены аналогичные временные зависимости для G_n .

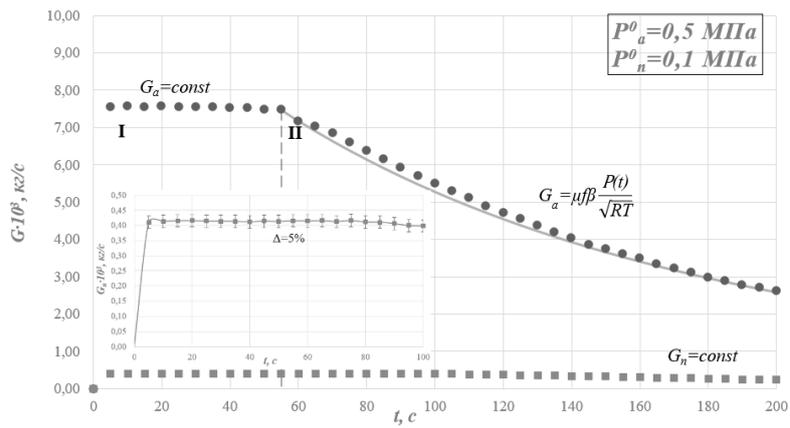
а)



б)



в)



г)

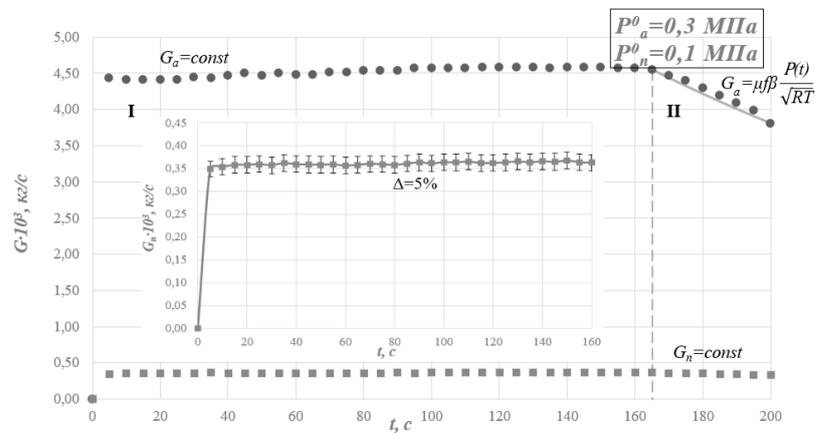
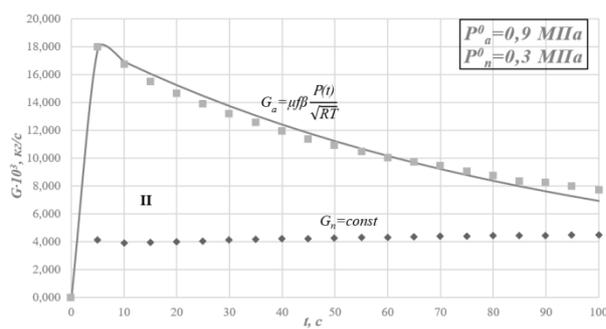
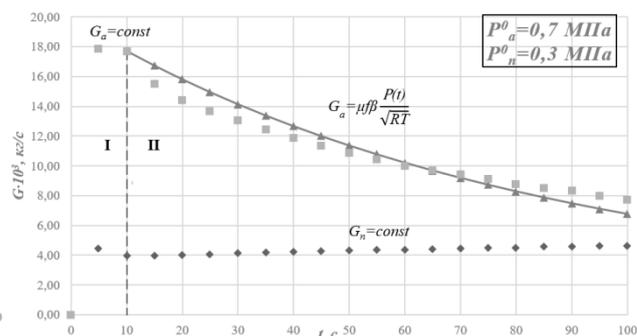


Рисунок 3.1 - Временные зависимости массовых расходов активного G_a и пассивного G_n потоков эжектора при $P_n=0,1 \text{ МПа}$ для различных режимов настройки редуктора: $P_a^0=0,9 \text{ МПа}$ (а), $0,7 \text{ МПа}$ (б), $0,5 \text{ МПа}$ (в) и $0,3 \text{ МПа}$ (г) ($d_{a1}=0,003 \text{ м}$)

а)



б)



в)

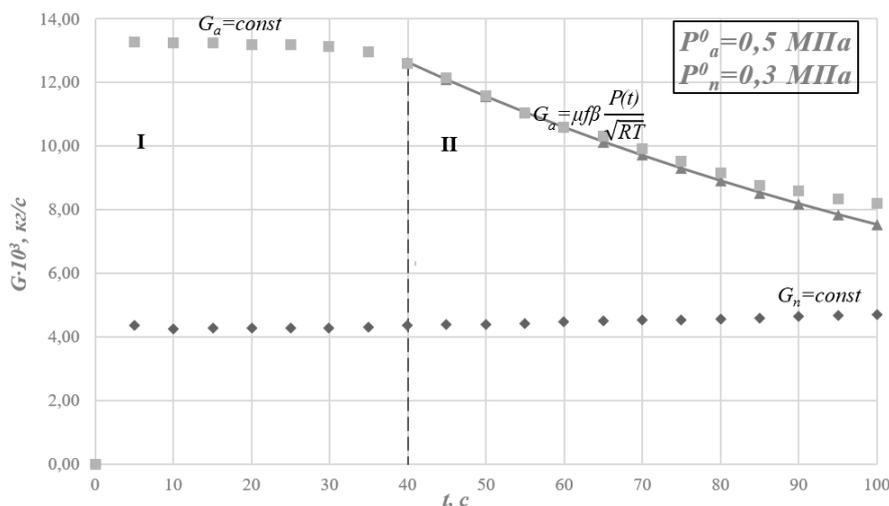


Рисунок 3.2 - Временные зависимости массовых расходов активного G_a и пассивного G_n потоков эжектора при $P_n=0,3$ МПа и начальном $P_a^0=0,9$ МПа (а), 0,7 МПа (б), 0,5 МПа (в) ($d_{a2}=0,004$ м)

На графиках (рисунок 3.1, 3.2) можно выделить два участка, первый (I) - соответствует постоянному давлению после редуктора ($P_i = P_a^0$), что определяет постоянство G_a во времени. Второй (II) - давлению в емкости ниже давления настройки редуктора, когда величина P_i уменьшается со временем t . Как видно из рисунков 3.1, 3.2, расчетная (3.1, 3.2) зависимость $P_i=f(t)$ для этого участка практически совпадает с установленной экспериментально, что подтверждает правомочность используемых формул (3.1, 3.2) для расчета расхода активной газовой среды в эжекторе.

Как видно из результатов эксперимента (рисунок 3.1, 3.2), в широких интервалах давлений (0,3-0,9 МПа) и расходов (0,004-0,018 кг/с) активного

потока, величина расхода пассивного потока для одного и того же давления P_n и диаметра сопла остается практически постоянной:

- $G_n^{cp} = 0,37 \cdot 10^{-3} \pm 5\%$ кг/с для $P_n = 0,1$ МПа при $d_{c1} = 0,003$ м;
- $G_n^{cp} = 4,44 \cdot 10^{-3} \pm 4,5\%$ кг/с для $P_n = 0,3$ МПа при $d_{c2} = 0,004$ м.

При объяснении установленной закономерности руководствовались следующим.

Как следует, исходя из кинетической теории газов, идеальный газ характеризуется независимостью вязкости от его плотности, т.е. давления, которая определяется величиной средней скорости молекул и длиной их свободного пробега. При сравнительно небольших давлениях (до 10-15 МПа) указанная независимость является справедливой и для реальных газов. И только при больших давлениях, когда среднее расстояние между молекулами уменьшается до радиуса межмолекулярного взаимодействия, вязкость газа приобретает зависимость от давления [20].

А поскольку, в соответствии с законом внутреннего трения Ньютона, сила трения между слоями газа пропорциональна его вязкости, которая при сравнительно небольших давлениях существенным образом не зависит от их значения, сила трения между поверхностными слоями активного и пассивного потока, и, как следствие, расход увлекаемого газа, практически не изменяются с изменением давления активной среды.

В этой связи, можно заключить, что полученный вывод о независимости расхода пассивного потока от давления и расхода активного является справедливым для всех давлений активной среды (до 10 МПа), которые могут быть реально использованы для эжекции отпарного газа из хранилищ СПГ.

Как можно заключить из расхода G_n и G_a графиков (рисунок 3.1, 3.2), установленные экспериментально-расчетным путем значения коэффициента эжекции n лабораторной установки имеют значения порядка нескольких десятых единиц, что близко к прогнозируемым значениям (таблица 2.1).

3.2 Зависимость коэффициента эжекции от геометрических параметров эжектора

3.2.1 Коэффициент расхода эжекторной установки

Как показал вышеприведенный анализ, геометрия сопла и параметры потока на входе в него, а также наличие дополнительных гидравлических сопротивлений перед соплом в виде редуктора, оказывают значительное влияние на пропускную способность сопла, что выражается в коэффициенте расхода, как отношение действительного расхода G_d к теоретическому расходу газа G_m . Для определения диапазона потерь расхода газа при критическом истечении из сужающегося сопла эжекторной установки экспериментально-расчетным путем с применением экспериментальной установки (схема на рисунке 2.4 без баллона 9 и 12), определен коэффициент расхода для этой установки, с использованием сопел после механической обработки их внутренней поверхности.

Предпосылки, принимаемые при расчетах:

- процесс опорожнения ресивера 2 (рисунок 2.4) близок к адиабатическому или изотермическому процессам;
- истечение газа через сопло эжектора 16 протекает без теплообмена с окружающей средой;
- теплофизические свойства анализируемого газа близки к свойствам идеального газа.

Методика расчета:

- для адиабатического процесса

Из соотношения $P_{em}^i / P_{em}^0 = (m^i / m^0)^k$, связывающего давление и массу газа в емкости в каждый i -й и начальный момент времени, следует, что (3.3):

$$m^i = e^{\frac{\ln \frac{P_{em}^i}{P_{em}^0} + k \cdot \ln m^0}{k}} . \quad (3.3)$$

При этом $m^0 = P_{em}^0 V \rho_{cm}$, где ρ_{cm} - плотность воздуха при стандартных условиях ($T_{cm} = 293$ К; $P_{cm} = 0,1$ МПа).

При этом среднее значение массового расхода газа из ресивера для каждого рассматриваемого интервала времени в эксперименте (3.4):

$$G_{эксн} = \frac{m^i - m^{i+1}}{t^{i+1} - t^i}. \quad (3.4)$$

• для изотермического опорожнения ресивера для расчета расхода справедлива формула 3.5:

$$G_{эксн} = \frac{V(P^i - P^{i+1})}{t^{i+1} - t^i} \rho_{cm}. \quad (3.5)$$

Установленные значения $G_{эксн}$ сопоставлялись с величинами массового расхода, рассчитанными по формуле (3.1) для критического истечения воздушного потока в адиабатических условиях ($k=1,41$, $R=287,1$ Дж/кг·К) через сопло при входном давлении равном $P^{i\text{ex}}$ при условии идеального истечения газа без сопротивлений и потерь энергии потока по длине сопла ($\mu=1$). При этом температура газа T^i в выражении (3.1) определялась из соотношения (3.6) [75]:

$$T^i = T^0 \left(\frac{P^{i\text{ex}}}{P^{0\text{ex}}} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (3.6)$$

Можно отметить, что в связи с соблюдением условий для критического перепада давлений до и после сопла в эксперименте ($P_{атм}/P^{ex} < 0.528$ - необходимое соотношение давлений для критического препада) формулу (3.1) считали справедливой для всего анализируемого временного интервала истечения.

Результаты расчета (3.4) средних значений массового расхода газа $G_{эксн}$ при опорожнении емкости для каждого анализируемого интервала времени для

различных давлений на редукторе P^{0ex} и диаметрах сопел d_a для адиабатических условий опорожнения ресивера в виде диаграмм представлены в приложении В, рисунок В.1 (диаграммы для изотермических условий имели подобный вид и, по этой причине, не приводятся). Там же приведены временные зависимости массового расхода газа $G_{ид}$, рассчитанные (3.1) для идеальных условий истечения газа из сопла (при $\mu=1$).

Как видно из рисунка В.1, для всех значений P^{0ex} и d_a кривые расхода газа при его истечении из сопла в идеальных условиях лежат выше установленных по реальному изменению массы газа в ресивере, что позволило рассчитать действительный коэффициент расхода установки. Среднее арифметическое из всех значений отношения $G_{эксн}/G_{ид}=\mu$ для всего анализируемого в экспериментах интервала времени для двух вариантов теплообмена газа в ресивере с окружающей средой (адиабатических и изотермических условий) иллюстрирует рисунок 3.3.

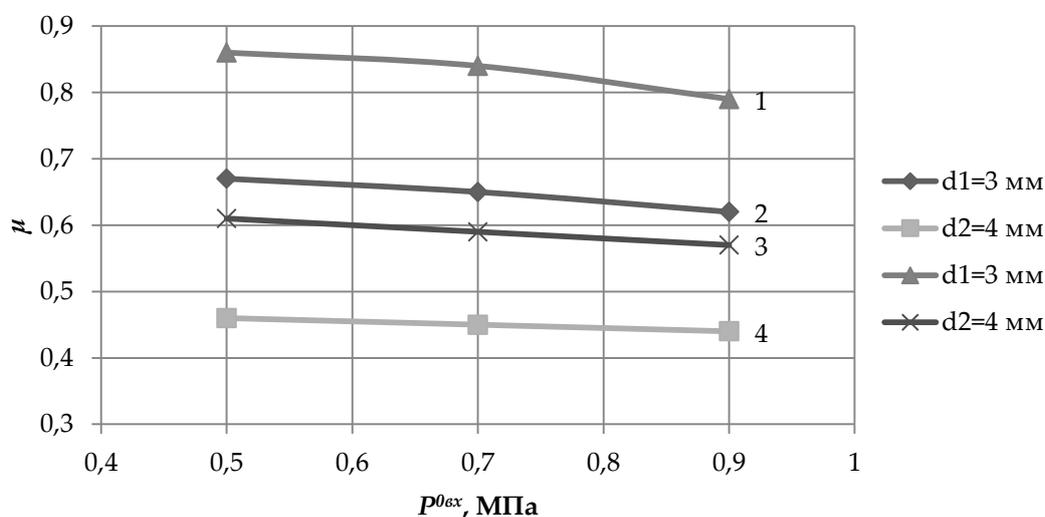


Рисунок 3.3 – Значения коэффициента расхода сужающегося сопла в зависимости от входного давления перед соплом, рассчитанные для изотермических (кривые 1, 3) и адиабатических (кривые 2,4) условий опорожнения ресивера

Было установлено (рисунок 3.3), что для условий эксперимента значения коэффициента расхода μ находятся в интервале значений 0,86 – 0,44 и

снижаются с повышением давления газа перед соплом и увеличением его диаметра. Можно отметить, что такая же тенденция снижения μ наблюдается при истечении газа через предохранительный клапан (таблица 1.3), а также в результатах экспериментов авторов [43, 80, 81].

Указанное уменьшение значений μ (увеличение потерь в сопле) с увеличением P и d может быть объяснено тем, что при истечении газа через сужающееся сопло в пристеночных областях возникают зоны разряжения, размер которых возрастает с увеличением разницы давлений до и после сопла [44], а также, возможно, с увеличением диаметра сопла. Их появление сужает эффективную площадь истечения газа, что выражается в снижении коэффициента расхода.

Как видно из рисунка 3.3, выражение $\mu = f(P)$ для всех анализируемых диаметров сопел вне зависимости от принятых допущений – адиабатическое опорожнение ресивера или изотермическое – удовлетворительно аппроксимируется линейным выражением 3.7:

$$\mu = \mu^0 - K_1 P, \quad (3.7)$$

при усредненном для двух рассматриваемых режимов теплообмена значении коэффициента K_1 равном $0,113 \text{ МПа}^{-1}$ и μ^0 , уменьшающимся с увеличением диаметра сопла.

При линейной интерполяции зависимости $\mu^0 = f(d)$ это выражение имеет вид 3.8:

$$\mu^0 = \mu_*^0 - K_2 d, \quad (3.8)$$

при усредненных для двух режимов теплообмена значениях μ_*^0 , K_2 равных $1,62$ и 263 м^{-1} соответственно.

Подстановка выражения (3.7) в (3.8) позволила получить уравнение (3.9), позволяющее рассчитывать коэффициент расхода установки в зависимости от давления газовой среды p перед сужающимся соплом и диаметра d сопла

$$\mu^0 = 1,62 - 263P - 0,113d, \quad (3.9)$$

где P в МПа, а d в м.

Можно отметить, что получение в данной работе достаточно низких значений коэффициента расхода (0,86 – 0,44) свидетельствует о больших энергетических потерях в установке, что связано с наличием редуктора перед соплом. Это справедливо и для промышленной эжекторной установки, так как на линии высокого давления необходима установка регулирующего устройства - редуктора для поддержания необходимого давления на входе в эжектор.

Как показали аналогичные эксперименты, проведенные на соплах с необработанной внутренней поверхностью, их высокая степень шероховатости и наличия наплывов, указанные дефекты поверхности не оказывают заметного уменьшения коэффициента расхода сопел, что свидетельствует о незначительном влиянии состояния внутренней поверхности сопла на энергетические потери потока в сопле.

Таким образом, найденное уравнение (3.9) позволяет установить реальный коэффициент расхода для истечения газовых сред разного давления через сужающиеся сопла разного диаметра на эжекторной установке с регулирующим устройством, необходимый для расчета расхода активного потока газа в эжекторе и, как следствие, коэффициента эжекции устройства.

3.2.2 Расстояние от среза сопла до камеры смешения

Ввиду влияния расстояния от среза сопла до камеры смешения l_k на способность эжектирования пассивного потока (т.е. на коэффициент эжекции) представлялся необходимым поиск оптимального его значения. Опыты, проведенные на модельном эжекторе в виде разъемной конструкции (рисунок 2.3), позволили измерить величину расхода пассивного потока расходомером 13 (рисунок 2.4) при соплах различного диаметра d_a , устанавливаемых на различном расстоянии l_k . Рациональное отношение расстояния от среза сопла до камеры смешения к диаметру сопла (l_k/d_a) определяется максимально

возможным расходом пассивного потока G_n . Результаты опытов представлены на рисунках 3.4-3.5.

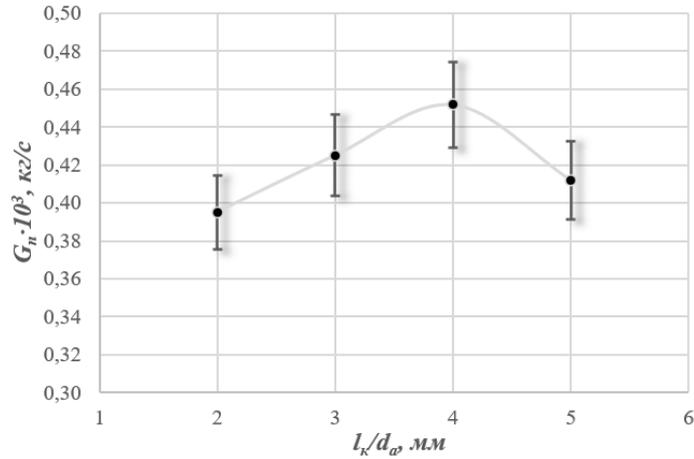


Рисунок 3.4 – Зависимость расхода пассивного потока G_n от расстояния от среза сопла до камеры смешения l_k к диаметру сопла d_a

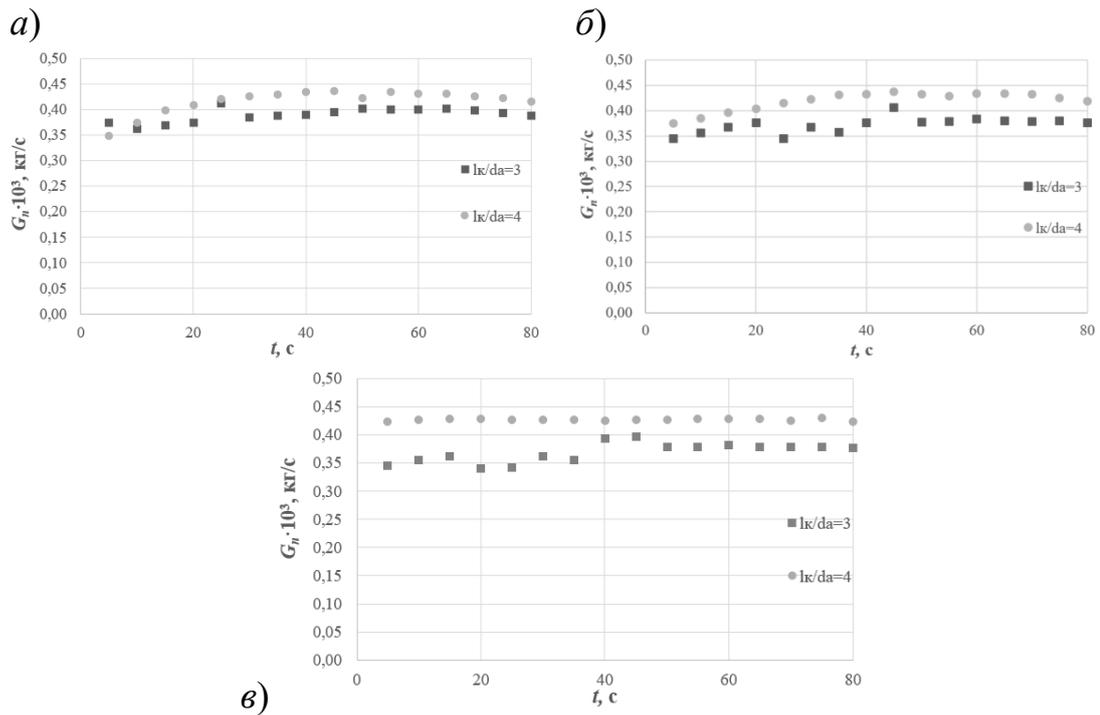


Рисунок 3.5 – Временные зависимости расхода пассивного потока при $l_{к1}=0,009$ м и $l_{к2}=0,012$ м для сопла $d_{a1}=0,003$ м при начальном давлении активного $P_a^0 = 0,9$ МПа (а), 0,7 МПа (б), 0,5 МПа (в)

Видно, что зависимость $G_n=f(l_k/d_a)$ имеет максимум при значениях $l_k/d_a=4$, соответствующих максимальному значению длины свободной струи

($l^{max}=3\div 4 d$ по Г.Н. Абрамовичу), которые являются более предпочтительными. Можно сделать вывод о применении полученного оптимального соотношения при проведении расчетов геометрических параметров эжектора для получения наибольшего эффекта эжекции.

3.2.3 Основной геометрический параметр эжектора α

В зависимости от назначения эжектора (высоконапорный или низконапорный) при выборе его размеров следует руководствоваться оптимальным значением основного геометрического параметра α . Конструкция модельного эжектора (рисунок 2.3) позволила варьировать параметром α за счет замены сопел с различным диаметром при постоянстве размеров корпуса эжектора. Оценка влияния α на эффект эжекции производилась путем измерения величины расхода пассивного потока расходомером 13 (рисунок 2.4), расход активного потока измерялся косвенным методом (аналогично методу, приведенного в разделе 3.1), что позволило получить коэффициент эжекции. Измерения производились при давлении пассивного потока $P_n=0,3$ МПа и давлении активного $P_a=0,5\div 0,9$ МПа. Полученные результаты представлены в таблице 3.1:

Таблица 3.1 Зависимость коэффициента эжекции от основного геометрического параметра эжектора

Диаметр сопла		$d_a=3$ мм $\alpha=0,16$	$d_a=4$ мм $\alpha=0,33$	$d_a=5$ мм $\alpha=0,64$
Давление на входе		n		
P_a , МПа	P_n , МПа			
0,9	0,3	0,42	0,2	<i>затирание</i>
0,7		0,53	0,22	
0,5		0,74	0,3	

Видно, что эжектор с меньшими значениями α позволяет увлечь большее количество газа при прочих равных параметрах потока, что выражается в коэффициенте эжекции. Стоит отметить, что эжектор с $\alpha=0,64$ не обеспечивал

эжектирование потока пассивной среды, что выражалось в фиксации обратного хода потока через патрубок для подачи пассивной среды, а расходомер демонстрировал отрицательные значения. Полученные результаты соотносятся с представленной ранее зависимостью (рисунок 1.21). Стоит заключить о необходимости учета основного геометрического параметра эжектора α при его расчете и выборе режима работы, как оказывающего значительное влияние на эффективность процесса эжекции.

3.2.4 Место ввода низконапорного потока и его направления относительно среза сопла

Так как оптимальная конфигурация ввода пассивного потока в газовый эжектор не была найдена, проводился ряд опытов, заключающихся в измерении расхода пассивной среды при подсоединении баллона 9 (рисунок 2.4), имитирующего пассивный поток, к патрубку эжектора расположенного в срезе сопла и до него. Как показали результаты экспериментов (рисунок 3.6), использование эжектора с вводом пассивной среды через патрубок, расположенный перпендикулярно срезу сопла, является более предпочтительным по сравнению с вводом потока до сопла - расход G_n увеличивается на 15%.

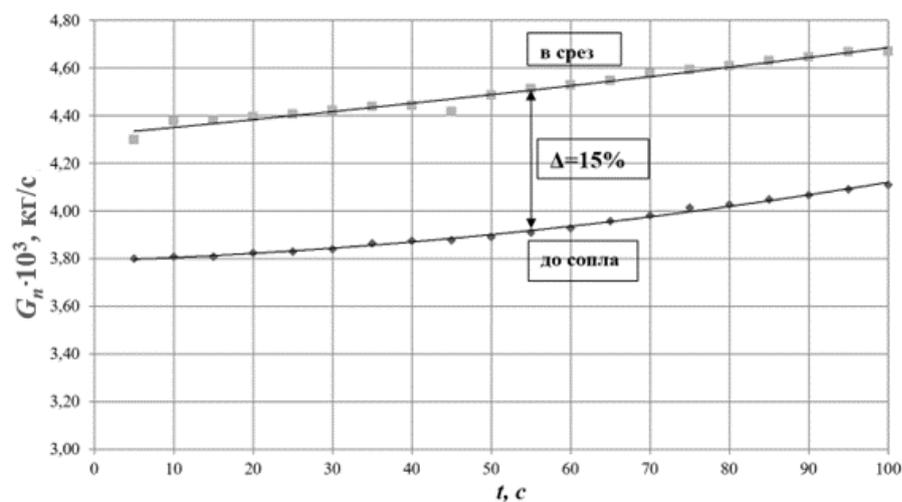


Рисунок 3.6 – Зависимость расхода пассивной среды от времени для разного положения патрубка ввода при $P_n = 0,3$ МПа

3.3 Исследование возможности аккумуляции смеси газов на выходе из эжектора

Для подтверждения возможности аккумуляции газовой среды с помощью эжектора в замкнутый объем, в емкость 19 установки (рисунок 2.4) эжектировался пассивный газ при различном давлении активного газа перед соплом с замером расхода G_n и давления в емкости $P_{ем}$. Было установлено (рисунок 3.7), что в начальный момент времени, в течение которого сохранялся критический перепад ($P_d/P_n \geq P^*$) и условие $P_{см} \geq P_{ем}$, расход G_n после выхода на стационарный режим достигал для всех величин P_a^0 практически постоянного значения ($0,41 \cdot 10^{-3}$ кг/с), близкого к расходу G_n , установленному при истечении газа в атмосферу (рисунок 3.1; $0,37 \cdot 10^{-3}$ кг/с), что подтверждало вывод независимости G_n от давления активной среды. Как показали эксперименты, необходимым условием эжектирования в емкость является недопустимость явления гидроудара и других сопротивлений в линии подачи во избежание эффекта запираания.

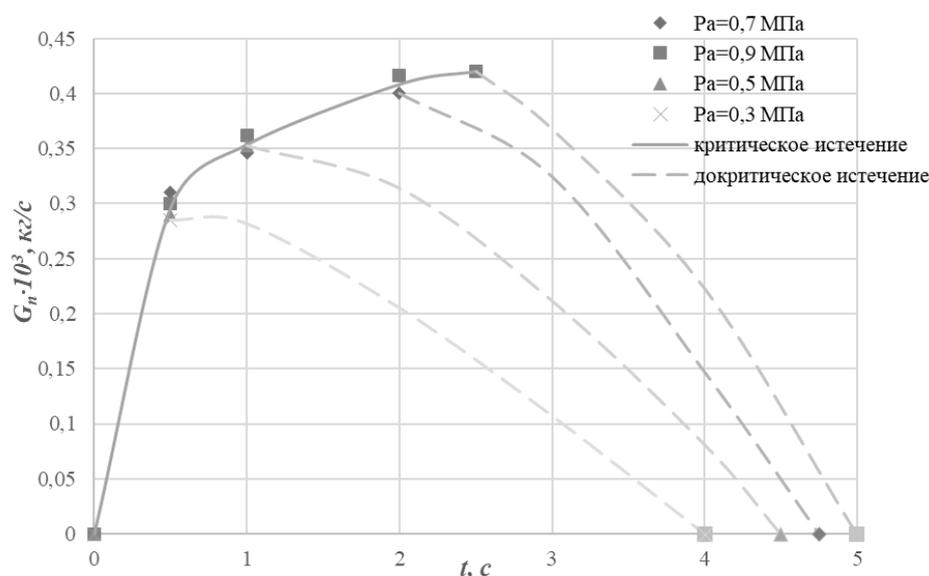


Рисунок 3.7 - Зависимость расхода пассивного газа от времени эжекции при аккумуляции в емкость

3.4 Выводы по главе 3

При проведении лабораторных исследований на разработанной экспериментальной установке установлено:

1. При обеспечении критического перепада в эжекторе и постоянстве его геометрических параметров расход пассивной среды заметным образом не зависит от расхода и давления активной среды, что определяет пропорциональность коэффициента эжекции отношению давлений P_n/P_a пассивной и активной среды.

2. Коэффициент эжекции достигает максимальной величины при:

- сопле, обеспечивающем наибольший коэффициент расхода, который для газовых эжекторных устройств с сужающимся соплом диаметра d и наличием на линии активного потока редуктора определяется из уравнения

$$\mu^0 = 1,62 - 263P - 0,113d;$$

- отношении $l_k/d_a \sim 4$;
- минимальном основном геометрическом параметре α ;
- вводе потока пассивной среды в срез сопла.
- Существует возможность осуществлять процесс эжектирование газа в замкнутый объем, для чего необходимо:

- наличие критического перепада в эжекторе $P_a/P_n \geq P^*$;
- превышение давлением смеси на выходе из эжектора давления в аккумулирующей емкости $P_{см} \geq P_{ем}$;
- исключение явления гидроудара и других сопротивлений в линии подачи газа в емкость во избежание эффекта запираания.

ГЛАВА 4 АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАБОЧИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ЭЖЕКТОРА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ОТПАРНОГО ГАЗА ИЗ ЕМКОСТИ ХРАНЕНИЯ СПГ В ЗАМКНУТЫЙ ОБЪЕМ.

4.1 Разработка технологической схемы для утилизации отпарного газа из резервуара СПГ с использованием газового эжектора

Результаты аналитического обзора и экспериментального исследования позволили разработать технологическую схему для утилизации избытка отпарного газа из резервуара СПГ 2 с помощью газового эжектора 10 (рисунок 4.1). В качестве активной среды газового эжектора выступает природный газ, поступающий с ГРС или с магистрального газопровода, с направлением полученной смеси в аккумулирующую емкость 13 [40]

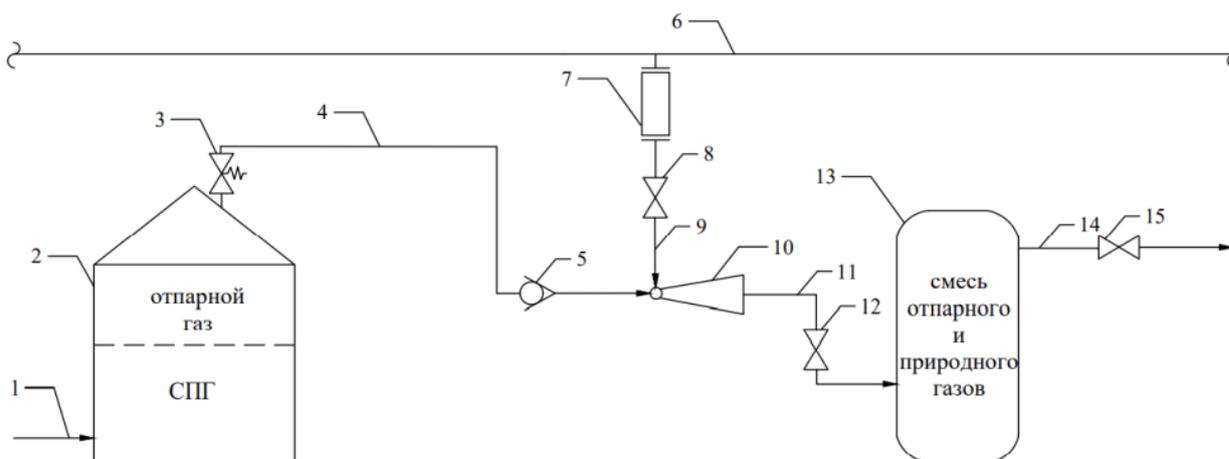


Рисунок 4.1 – Схема утилизации паров СПГ с использованием эжектора:
 1 – линия заполнения резервуара; 2 – резервуар СПГ; 3 – предохранительный клапан; 4 – линия отвода паров в эжектор; 5 – обратный клапан; 6 – линия высокого давления; 7 – редуктор; 8, 12, 15 - задвижка; 9 – линия подвода высокого давления к эжектору; 11 – линия отвода смеси активного и пассивного потоков; 13 - аккумулирующая емкость; 14 – линия отвода смеси на технологические нужды или повторное сжижение

Идея технического решения заключается в следующем: в качестве пассивного (эжектируемого) газа выступает отпарной газ, сбрасываемый из

резервуара СПГ, а активного (эжектирующего) – газ, поступающий из источника высокого давления. Высоконапорный поток может быть подведен из любой технологической линии, имеющей высокое давление природного газа, достаточное для работы эжектора. Так как экспериментальные исследования показали, что величина давления активной среды не оказывает влияния на эжектирующую способность эжектора, то достаточно, чтобы перепад давлений отпарного газа и активного потока соответствовал критическому. Важно, чтобы эжектирующий поток был схож с отпарным газом по компонентному составу для возможности повторного использования их смеси.

Предлагаемое решение исключает потери топлива на факеле или свече рассеивания, повышает экологическую безопасность, а также позволяет избежать применения компрессора отпарных газов, сжимая поток за счет уже имеющейся энергии магистрального потока газа и эжекторного устройства.

Последовательность выполнения операций при осуществлении технического решения.

По линии 1 (рисунок 4.1) резервуар 2 заполняется СПГ, давление которого контролируется и в случае превышения сверх нормативного на задвижку 8 посылается сигнал на ее открытие. В результате природный газ из трубопровода 6 высокого давления, редуцируясь до рабочего на регуляторе 7, заполняет камеру газового эжектора 10 и через открытую задвижку 12 поступает в емкость 13. Далее срабатывает предохранительный клапан 3, через который производится сброс избытка отпарного газа, увлекаемый рабочим телом газового эжектора 10 в камеру смешения за счет созданной в ней области разрежения. При этом обратный клапан 5 предотвращает поступление потока с более высоким давлением обратно в резервуар. Пройдя газовый эжектор, смесь отпарного и природного газов направляется в емкость 13, откуда по линии отвода 14 при открытии задвижки 15 используется для технологических нужд резервуарного парка или для питания компрессора 2-ой ступени для последующего сжижения, тем самым эжекторная система заменяет компрессор 1-ой ступени.

Ниже представлен алгоритм технологических операций, позволяющий осуществлять утилизации отпарного газа на разработанной технологической схеме (рисунок 4.2).

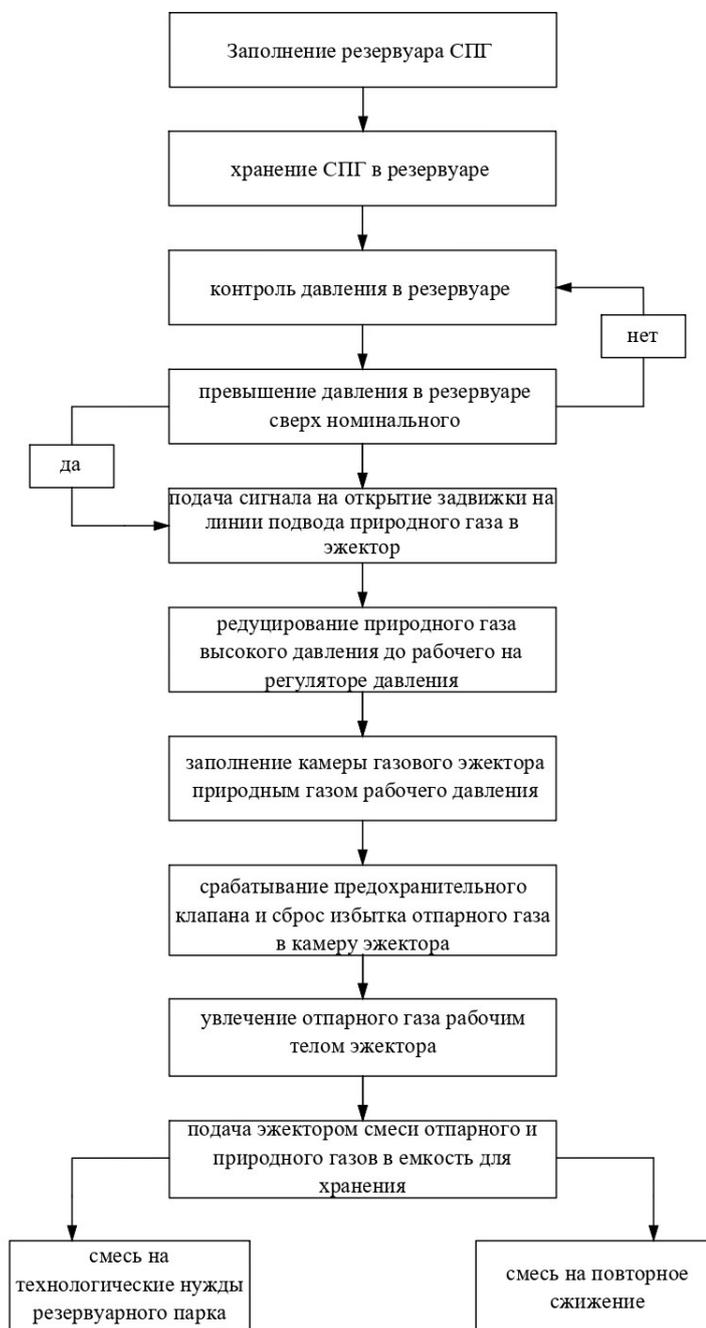


Рисунок 4.2 – Алгоритм утилизации отпарного газа из резервуара СПГ с помощью газового эжектора [40]

4.2 Алгоритм расчета необходимой эжекторной установки

Расчет конструкционных и рабочих параметров эжекторной установки, обеспечивающей аккумуляцию отпарного газа необходимого расхода в емкость с достижением заданного давления среды производится по следующему алгоритму, разработанному по аналогии с классической схемой расчета Г.Н. Абрамовича:

1. Исходя из технологии хранения СПГ, а также расхода G_n и компонентного состава сбрасываемого отпарного газа, устанавливаются рабочие параметры пассивной среды на выходе из резервуара: температура T_n , давление P_n , молекулярная масса M_n , показатель адиабаты k_n , плотность ρ_n . Аналогичные значения параметров определяются для активной среды – природного газа в трубопроводе ($T_a, P_a, M_a, k_a, \rho_a$).

2. Определяются безразмерные параметры: $\Pi_0 = P_a/P_n, \theta = T_a/T_n$.

3. Используя графический метод и уравнения эжекции для критического истечения активного потока ($\lambda_a=1$) с учетом независимости расхода пассивной среды от расхода активной решается система уравнений (4.1), (4.2):

$$n\sqrt{\theta} = \frac{1}{\Pi_0} \frac{\frac{1}{q(\lambda'_a)} - \frac{1}{q(\lambda_a)}}{\frac{1}{q(\lambda_n)} - \frac{1}{q(\lambda'_n)}}; \quad (4.1)$$

$$n\sqrt{\theta} = \frac{z(\lambda'_a) - z(\lambda_a)}{z(\lambda_n) - 2}, \quad (4.2)$$

где $q(\lambda), z(\lambda)$ – газодинамические функции, рассчитываются значения приведенной скорости пассивного потока λ_n на входе в камеру смешения эжектора для разных коэффициентов эжекции n .

4. С использованием уравнений (4.3) - (4.6) для различных значений n при $z(\lambda_{см}) \geq 2$ устанавливаются геометрическое соотношение $\alpha = F_a/F_n$, приведенная скорость потоков $\lambda_{см}$, давление $P_{см}$ и температура $T_{см}$ смеси на выходе из эжектора.

$$\alpha = \frac{q(\lambda_n)}{n \cdot q(\lambda_a) \cdot \Pi_0 \sqrt{\theta}}; \quad (4.3)$$

$$z(\lambda_{cm}) = \frac{z(\lambda_a) + n\sqrt{\theta} \cdot z(\lambda_n)}{\sqrt{(n+1)(n\sqrt{\theta} + 1)}}; \quad (4.4)$$

$$P_{cm} = P_a \frac{\sqrt{(n+1)(n\sqrt{\theta} + 1)}}{1 + 1/\alpha} \frac{q(\lambda_a)}{q(\lambda_{cm})}; \quad (4.5)$$

$$T_{cm} = \frac{\left(\frac{n \cdot T_n}{T_a} + 1\right) T_a}{n + 1}. \quad (4.6)$$

5. Исходя из заданного давления в аккумулярующей емкости P_{em} выбирается необходимый коэффициент эжекции и требуемый расход активной среды $G_a = G_n/n$.

6. С использованием уравнения неразрывности, и параметров активной и пассивной струи на входе в эжектор рассчитываются соответствующие их значения в сечении среза сопла, по которым устанавливаются необходимые площади отверстия сопла F_a и прохождения пассивного потока F_n с уточнением α .

7. Исходя из вида приведенной в литературе зависимости $\Pi_0 = f(\alpha)$, характеризующей условия запираания эжектора, проверяется его работоспособность при выбранных параметрах Π_0 , α .

8. С учетом вывода автора о наиболее рациональном отношении $l_k/d_a \sim 4$ устанавливаются геометрические параметры эжектора: площадь сечения смесительной камеры $F_{cm} = (F_a/\alpha) + F_a$, ее длина $l_{cm} = 8 \div 10 F_{cm}$, расстояние от среза сопла до камеры смешения.

9. Исходя из времени истечения пассивного газа из хранилища и значений G_n и G_a , рассчитывается суммарная масса смеси активной и пассивной сред, по которой, с учетом необходимого давления P_Σ и T_Σ , определяется объем аккумулярующей емкости.

4.3 Пример расчета эжекторной установки

4.3.1 Определение массы паров, подлежащих аккумулярованию при хранении СПГ в резервуаре

Для обоснования актуальности и применимости разработанной эжекторной системы для сброса паров СПГ следует произвести количественный расчет технологических потерь топлива, которые происходят из-за его испарения в процессе хранения. В качестве исходных данных для расчета рассмотрен случай повышения температуры в резервуаре со 120 К до 140 К из-за теплопритока извне.

Выбран криогенный резервуар для хранения сжиженного природного газа горизонтальный типа РКЦГ объемом $V_p=45 \text{ м}^3$ с рабочим давлением не более 0,8 МПа и расходом отпарного газа $G_n=0,196 \text{ кг/с}$. Резервуар оборудован предохранительной арматурой, служащей для предотвращения возникновения избыточного давления. Для поддержания криогенной температуры используется экранно-вакуумная изоляция. Характеристики резервуара представлены в таблице 4.1:

Таблица 4.1 – Характеристики криогенного резервуара СПГ [48]

Модель	Объем, м ³	Максимальное рабочее давление, МПа	Расчет ное давлен ие, МПа	Рабочая температ ура	Основн ой материа л	Пустой вес, кг
РКЦГ- 55	45	0,8	1	-161 до +50°С	12Х18Н 10Т	17910

Исходные данные:

- уровень заполнения криогенного резервуара жидкостью – 80%;

- $V_{ж} = 0,8 \cdot V_p = 36 \text{ м}^3$; $V_{г} = 0,2 \cdot V_p = 9 \text{ м}^3$ - объем жидкой и паровой фазы в резервуаре соответственно;
- $T^0 = 120 \text{ К}$; $T^i = 140 \text{ К}$ - температура в резервуаре до момента интенсивного парообразования и в момент сброса соответственно;
- $P_{н.н.}^0 = 0,192 \text{ МПа}$, $P_{н.н.}^i = 0,64 \text{ МПа}$ - давление насыщенных паров, соответствующих температурам T^0 , T^i (по диаграмме состояния) [39];
- $\rho^i = 390,4 \text{ кг/м}^3$ - плотность СПГ при T^i и $P_{н.н.}^i$;
- $M = 17,48 \text{ г/моль}$ - молярная масса СПГ марки Б.
- удельная теплота парообразования: $r = 574 \text{ кДж/кг}$;
- удельная теплоемкость СПГ: $c = 5,477 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$.

Принятые допущения:

- сброс отпарного газа из резервуара осуществляется при достижении максимально допустимого давления насыщенных паров $P_{н.н.}^i$ и продолжается до достижения $P_{н.н.}^0$.
- из-за ограниченного объема резервуара, при испарении СПГ объем, занятый газовой фазой, изменяется незначительно, вследствие чего принят постоянным.
- *Рассчитываемые параметры:*
- молярный объем газа до (V_m^0) и после (V_m^i) испарения, исходя из закона Менделеева-Клайперона (4.7):

$$V_m = \frac{22,4 \cdot P_{атм} \cdot T}{T_{атм}}; \quad (4.7)$$

- масса насыщенных паров в резервуаре (4.8):

$$m_{н.н.} = \frac{V_{н.н.}}{V_m} \cdot M; \quad (4.8)$$

- масса испарившегося газа, которая подлежит сбросу (4.9):

$$\Delta m = m_{н.п.}^i - m_{н.п.}^0 ; \quad (4.9)$$

- количество теплоты, затрачиваемой на испарение в резервуаре при повышении температуры (4.10):

$$Q_{исп} = r \Delta m ; \quad (4.10)$$

- количество теплоты, затрачиваемой на охлаждение СПГ в резервуаре при повышении температуры (4.11):

$$Q_{охл} = c m_{ж} \Delta T , \text{ где } m_{ж} = \rho^i V_{ж} \quad (4.11)$$

- изменение температуры в резервуаре после процессов испарения и охлаждения (4.12):

$$\Delta T = - \frac{Q_{исп}}{c m_{ж}} . \quad (4.12)$$

Результаты расчета:

- $V_m^0 = 5,2 \text{ м}^3 / \text{кмоль}, V_m^i = 1,82 \text{ м}^3 / \text{кмоль} ;$
- $m_{н.п.}^0 = 30,3 \text{ кг}, m_{н.п.}^i = 86,4 \text{ кг};$
- $\Delta m = 56,1 \text{ кг};$
- $Q_{исп} = 32201,4 \text{ кДж}$
- $m_{ж} = 14054,4 \text{ кг}$
- $\Delta T = -0,42 \text{ К} .$

Как показывают результаты расчета, масса отпарного газа, подлежащая сбросу, составляет 56,1 кг.

4.3.2 Расчет эжектора

Хранение под давлением

Алгоритм иллюстрируется примером расчета, проведенного для сброса отпарного газа ($G_n=0,196$ кг/с, $T_n=140$ К, $P_n=0,64$ МПа, $M_n=17,48$ г/моль, $k=1,41$, $\rho_n=9,43$ кг/м³) из резервуара хранения СПГ типа РКЦГ объемом $V=45$ м³ при продолжительности сброса 267 с (с учетом массы отпарного газа, подлежащей сбросу, рассчитанной в разделе 4.3.1). По существующей схеме отпарной газ утилизируется с использованием компрессора с давлением на выходе $P_k=1,8$ МПа. Задачей расчета является замена компрессора эжекторным устройством, обеспечивающим достижение на выходе из эжектора того же давления $P_{см}=P_k=1,8$ МПа.

1. В качестве активной среды выбран природный газ из имеющегося на предприятии трубопровода высокого давления с параметрами: $T_a=275$ К, $P_a=3,55$ МПа, $M_a=17,48$ г/моль, $k=1,41$, $\rho_a=27$ кг/м³.

2. Значения безразмерных параметров: $\Pi_0=5,55$; $\theta=1,63$.

3. Для коэффициентов эжекции n , принятых в широком возможном диапазоне их значений ($n_1=0,1$; $n_2=0,5$; $n_3=0,8$) получаемые значения давления смеси и приведенные скорости пассивного потока и смеси оказываются равными: $P_{см1}=1,8$ МПа, $P_{см2}=1,1$ МПа, $P_{см3}=1,0$ МПа; $\lambda_{n1}=0,45$; $\lambda_{см1}=0,69$; $\lambda_{n2}=0,41$; $\lambda_{см2}=0,49$; $\lambda_{n3}=0,41$; $\lambda_{см3}=0,44$.

4. С учетом необходимой величины $P_{ем}$ значение коэффициента эжекции и расхода активной среды равны: $n_1=0,1$; $G_a=1,96$ кг/с.

5. Проверка полученных соотношений $\Pi_0=f(\alpha)$ показывает, что для $\Pi_0=5,55$ - $\alpha=0,49 < \alpha^{kp}$ ($\alpha^{kp} \sim 1$), что удовлетворяет условиям работоспособности эжектора.

6. Получаемые геометрические параметры эжектора вида рисунка 4.3: $F_a=0,3 \cdot 10^{-3}$ м², $d_a=19,7$ мм; $F_n=0,6 \cdot 10^{-3}$ м², $d_n=51,7$ мм (с учетом толщины стенки сопла $\delta=2$ мм); $F_{см}=0,9 \cdot 10^{-3}$ м², $d_{см}=34$ мм; $l_{см}=340$ мм; $l_c=79$ мм.

7. Суммарная масса активной и пассивной сред оказывается равной $G_{см}=2,16$ кг/с, температура смеси $T_{см}=262,73$ К, откуда необходимый объем

емкости, заполняемой за 267 с до давления 1,8 МПа равен 41,4 м³. Установка аккумулирующей емкости такого большого объема не представляется целесообразной исходя из технико-экономических расчетов. В таком случае, следует проектировать эжекторную систему с вводом полученной смеси газов в линию компримирования природного газа после 1 ступени компрессора, что справедливо и для систем хранения с постоянным отбором отпарного газа.

Изотермическое хранение

Алгоритм иллюстрируется примером расчета, проведенного для сброса отпарного газа ($G_n=0,0014$ кг/с, $T_n=112$ К, $P_n=0,106$ МПа, $M_n=17,48$ г/моль, $k=1,41$, $\rho_n=1,87$ кг/м³) из резервуара изотермического хранения СПГ объемом $V=45$ м³ при продолжительности сброса 10 с. По существующей схеме отпарной газ утилизируется с использованием компрессора с давлением на выходе $P_k=0,7$ МПа. Задачей расчета является замена компрессора эжекторным устройством и емкостью, обеспечивающих достижение в емкости того же давления $P_{см}=P_k=0,7$ МПа.

1. В качестве активной среды выбран природный газ из имеющегося на предприятии трубопровода высокого давления с параметрами: $T_a=293$ К, $P_a=1,2$ МПа, $M_a=17,48$ г/моль, $k=1,41$, $\rho_a=7,89$ кг/м³.

2. Значения безразмерных параметров: $\Pi_0=11,32$, $\theta=0,38$.

3. Для коэффициентов эжекции n , принятых в широком возможном диапазоне их значений ($n_1=0,1$; $n_2=0,5$; $n_3=0,8$) получаемые значения давления смеси и приведенные скорости пассивного потока и смеси оказываются равными: $P_{см1}=0,71$ МПа, $P_{см2}=0,29$ МПа, $P_{см3}=0,22$ МПа; $\lambda_{n1}=0,46$; $\lambda_{см1}=1$; $\lambda_{n2}=0,425$; $\lambda_{см2}=0,97$; $\lambda_{n3}=0,425$; $\lambda_{см3}=0,9$.

4. С учетом необходимой величины $P_{ем}$ значение коэффициента эжекции и расхода активной среды равны: $n_1=0,1$; $G_a=0,014$ кг/с.

5. Проверка полученных соотношений $\Pi_0=f(\alpha)$ показывает, что для $\Pi_0=11,32$ $\alpha=0,3 < \alpha^{сп}$ ($\alpha^{сп}\sim 0,35$), что удовлетворяет условиям работоспособности эжектора.

6. Получаемые геометрические параметры эжектора вида рисунка 4.3: $F_a=0,73 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, $d_a=3 \text{ мм}$; $F_n=0,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $d_n=12,5 \text{ мм}$ (с учетом толщины стенки сопла $\delta=2 \text{ мм}$); $F_{см}=0,31 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, $d_{см}=6,3 \text{ мм}$; $l_{см}=63 \text{ мм}$; $l_k=12 \text{ мм}$.

Как показывает сравнение установленных рабочих параметров натурального эжектора с параметрами модельного эжектора, при одном и том же значении диаметра сопла $d_a=3 \text{ мм}$ наблюдается существенная разница в величинах расхода G_n пассивной среды ($G_n=1,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ / $0,37 \cdot 10^{-3}$, т.е. в 3,8 раз), что объясняется различием в термодинамических свойствах воздуха (модельный эжектор) и природного газа (натурный).

7. Суммарная масса активной и пассивной сред оказывается равной $G_{см}=0,015 \text{ кг/с}$, температура смеси $T_{см}=276 \text{ К}$, откуда необходимый объем емкости, заполняемой за 10 с до давления 0,7 МПа равен $0,02 \text{ м}^3$, а с учетом возможного нагрева газа до комнатной температуры $0,031 \text{ м}^3$.

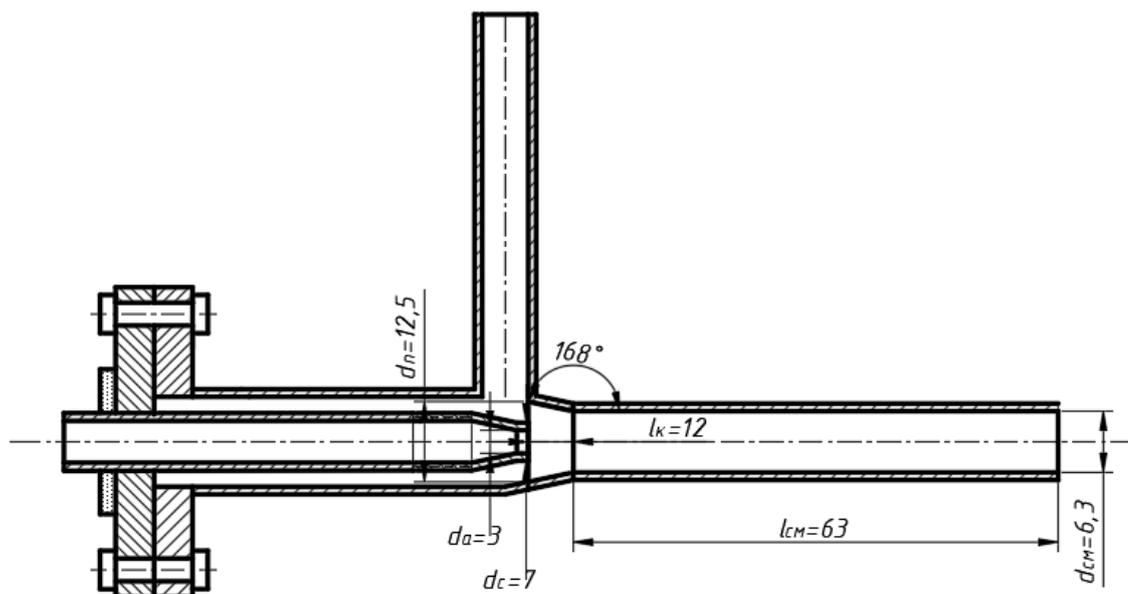


Рисунок 4.3 – Геометрические параметры эжектора при расходе пассивной среды $G_n=0,0014 \text{ кг/с}$ и коэффициенте эжекции $n=0,1$

4.4 Сравнительный анализ утилизации паров предлагаемым и существующими способами

Замена дожимного компрессора эжекторной установкой предоставляет следующие преимущества:

- сокращение капитальных и эксплуатационных затрат до 38 раз по потребляемой мощности (75кВт/2 кВт);

Мощность, затрачиваемая на компримирование при работе эжектора равна $N = P_a G_{V_a}$, где G_V - объемный расход активной среды, м³/с [28]. Таким образом, мощность газового эжектора для увлечения отпарного газа при изотермическом типе хранения составляет ($P_a=1,2$ МПа; $G_V=0,002$ м³/с) составляет $N=2$ кВт.

- многократное снижение капиталовложений и металлоемкости применяемого оборудования (3640 кг/ 0,4 кг);
- упрощение монтажных и пусконаладочных работ;
- снижение операционных затрат на техническое обслуживание и ремонт оборудования;
- снижение рисков промышленной безопасности и наступления аварийных ситуаций;
- оптимизация занимаемой оборудованием площади (2460x1680x1265/ 200x20x50).

4.5 Выводы по главе 4

1. Разработана технологическая схема для утилизации отпарного газа из резервуара СПГ с использованием газового эжектора, в котором в качестве активной среды выступает природный газ высокого давления, подаваемый через редуктор из трубопровода.

2. Основываясь на результатах экспериментальных исследований, разработан алгоритм расчета рабочих и геометрических параметров эжектора для утилизации отпарного газа из резервуара сжиженного природного газа, отличающийся от описанных в литературе следующим:

- при известном расходе отпарного газа (пассивной среды) выбор коэффициента эжекции, обеспечивающего наиболее эффективную эжекцию, производится путем нескольких итераций расчета параметров давления и

температуры смеси на выходе из эжектора и последующем выборе наиболее рациональных;

- для обеспечения эжектирования отпарного газа достаточно наличие критического перепада давлений в эжекторе;
- объем аккумулирующей емкости на выходе из эжектора рассчитывается, исходя из времени периодического сброса отпарного газа с учетом ее возможного нагрева до температуры окружающей среды в случае отсутствия изоляции аналогичной криогенной емкости хранения.

3. Приведен пример расчета эжекторной установки, в том числе:

- массы паров, подлежащей сбросу;
- эжектора по разработанному алгоритму для двух способов хранения СПГ – под давлением без использования аккумулирующей емкости и изотермического, где аккумулирующая емкость заменяет первую ступень дожимного компрессора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной задачи инновационного способа аккумуляции отпарного газа из хранилищ сжиженного природного газа (СПГ) с использованием газового эжектора, что имеет существенное значение для развития нефтегазовой промышленности страны:

1) В результате анализа и обобщения результатов существующих теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что вопросы зависимости расхода эжектируемого газа от параметров эжектирующей среды, а также конструктивных размеров газового эжектора изучены недостаточно.

2) По результатам моделирования разработана конструкция эжекторной установки, имитирующей условия процесса эжекции отпарного газа высоконапорным газовым потоком.

3) При проведении лабораторных исследований на разработанной экспериментальной установке установлено, что при давлениях, когда газ находится в состоянии близком к идеальному, и обеспечении критического перепада, расход пассивной среды в эжекторе не зависит от расхода и давления активной среды и при $P_a, P_n = const$ максимален при отношении $l_n/d_a \sim 4$ и вводе потока пассивной среды в срез сопла, что справедливо и при эжектировании газа в замкнутый объем.

4) Разработан алгоритм расчета рабочих и геометрических параметров эжектора и технологическая схема утилизации отпарного газа из хранилищ СПГ с использованием эжекторного устройства.

Способ утилизации отпарного газа, предложенный в работе, является универсальным, и предполагает возможность применения в различных технологических схемах хранения СПГ. Так, например, в качестве активной среды эжектора может выступать сжатый поток природного газа, который дросселируется, проходя сопло эжектора, и сжижается в камере смешения, а отпарной газ выступает в качестве дополнительного охладителя, поэтому дальнейшие исследования двухфазного эжекторного устройства являются перспективными и могут быть продолжением развития темы диссертации.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ИНДЕКСОВ И СОКРАЩЕНИЙ

Обозначения

μ – коэффициент расхода;

B – геометрический коэффициент предохранительного клапана;

d – диаметр, м;

F – площадь, мм²;

G – массовый расход, кг/с;

G_V – объемный расход, м³/с;

k – показатель адиабаты;

l – длина, м;

m – масса, кг;

M – молекулярная масса, г/моль;

n – коэффициент эжекции;

N – мощность, кВт;

Q – количество тепла, кДж;

$q(\lambda), z(\lambda)$ – газодинамические функции;

R – удельная газовая постоянная, Дж/кг·К;

r – удельная теплота парообразования, кДж/кг;

t – время, с;

T – температура газа, К;

V – объем, м³;

V_m – молярный объем, м³

α – основной геометрический параметр эжектора;

α – угол сужения конфузора, °;

α_k – коэффициент Кориолиса;

β – угол распора диффузора, °;

γ – угол сужения сопла, °;

δ – толщина стенки, м;

ε – коэффициент сжатия струи;

η – коэффициент полезного действия эжектора;

λ – приведенная скорость;

ζ – коэффициент местного сопротивления;

ρ – плотность, кг/м³;

φ – коэффициент скорости;

a – скорость потока, м/с;

P_0, θ – безразмерные коэффициенты давления и температуры на входе в эжектор;

P – давление, МПа;

c – удельная теплоемкость, кДж/кг·К;

c_p – молярная теплоемкость, Дж/моль·К.

Индексы

подстрочные

a – активная среда;

$атм$ – атмосферное значение;

b – баллон;

$г$ – газ;

δ – действительное значение;

$диф$ – диффузор;

$ем$ – аккумулярующая емкость;

$ж$ – жидкость;

$ид$ – идеальные условия;

$исп$ – испарение;

$к$ – конфузор;

n – номинальное значение;

$н.п.$ – насыщенный пар;

$охл$ – охлаждение.

n – пассивная среда;

p – ресивер;

c – сопло;
сж – сжатое сечение струи;
см – смесь активного и пассивного газов;
ст – стандартные условия;
т – теоретическое значение;
ц – цилиндрическая часть;
эксп – экспериментальное значение;
эф – эффективное значение;
 Σ - суммарное значение.

надстрочные

вх – входное значение;
кр – критическое значение;
ср – среднее значение;
max – максимальное значение;
 * - критический параметр газа
0 – начальное значение, МПа;
i – *i*-ый момент времени.

Сокращения

АВО – аппарат воздушного охлаждения;
 АГНКС – автомобильная газонаполнительная компрессорная станция;
 ГРС – газораспределительная станция;
 КПГ – компримированный природный газ;
 ООН – организация объединенных наций;
 ПГ – природный газ;
 РКЦГ – резервуар криогенный цилиндрический горизонтальный;
 СНГ - Содружество Независимых Государств;
 СПГ- сжиженный природный газ;
 BOG – boil-off gas / отпарной газ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика часть. В 2 ч.: Учеб. руководство: Для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. / Г.Н. Абрамович. – М: Наука, 1991. - 600 с. ISBN 5-02-014015-5.
2. Аметистова, Л.Е. Экологические аспекты СПГ-проектов в арктических условиях: уч. пособие / Л.Е. Аметистова, А.Ю. Книжников. – М: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2016. – 47 с. УДК: 622.32.
3. Аронсон, К. Э. Парогазотурбинные установки: эжекторы конденсационных установок / К. Э. Аронсон, А. Ю. Рябчиков, Д. В. Березгин, Мурманский И.Б. – Москва: Юрайт, 2024. -129 с. ISBN 978-5-534-09826-6.
4. Бармин, И.В. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра / И.В. Бармин, И.Д. Кунис. - Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. - 256 с.: ил. ISBN 978-5-7038-3241-7.
5. Вильнер, Я. М. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. М. Вильнер, Я. Т. Ковалев, Б. Б. Некрасов. - Минск: Вышэйшая школа, 1976. - 416 с.
6. Воронов, В. А. Сравнительный анализ однофазного и двухфазного режимов транспортировки природного газа по трубопроводным системам / В.А. Воронов, **Я.В. Мартыненко** // МНИЖ. - 2017. - № 58 (4–4). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-odnofaznogo-i-dvuhfaznogo-rezhimov-transportirovki-prirodnogo-gaza-po-truboprovodnym-sistemam?ysclid=lvdrfef37y452432450> (дата обращения 24.04.2024).
7. Гамус, И. М. Техническое водоснабжение ГЭС регулируемые эжекторами / И. М. Гамус, Б. Г. Картелев, Л. И. Ясвонский. - Ленинград: Энергоатом, 1986. - 84 с.
8. ГОСТ Р 31294-2005. Клапаны предохранительные прямого действия. Общие технические условия: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии РФ:

введен впервые: дата введения 2008–10–01 / подготовлен закрытым акционерным обществом "Научно-производственная фирма "Центральное конструкторское бюро арматуростроения" (ЗАО "НПФ ЦКБА"), Техническим комитетом по стандартизации ТК 259 "Трубопроводная арматура и сильфоны". – Москва: Стандартиформ, 2018. –32 с.

9. ГОСТ Р 55892-2013. Объекты малотоннажного производства и потребления сжиженного природного газа: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 декабря 2013 г. № 2278-ст: введен впервые: дата введения 2014–06–01 / подготовлен Обществом с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ" (ООО "Газпром ВНИИГАЗ"). – Москва: Стандартиформ, 2014. – 43 с.

10. ГОСТ Р 56021— 2014. Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15.05. 2014 г. №432-ст: введен впервые: дата введения 2016–01–01 / подготовлен Обществом с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ" (ООО "Газпром ВНИИГАЗ"). – Москва: Стандартиформ, 2016. –15 с.

11. ГОСТ Р 56835-2005. Газ природный сжиженный. Газ отпарной производства газа природного сжиженного. Определение компонентного состава методом газовой хроматографии: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23.12. 2015 г. №2195-ст: введен впервые: дата введения 2017–01–01 / подготовлен Обществом с ограниченной ответственностью "Научно-

исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ" (ООО "Газпром ВНИИГАЗ"). – Москва: Стандартинформ, 2016. – 19 с.

12. Группа компаний «Пневмомаш»: официальный сайт. - URL: <https://www.pnevmomash.ru/> (дата обращения: 24.04.2024). Режим доступа: общедоступный. – Текст: электронный.

13. Дейч, М. Е. Техническая газодинамика. Изд. 2-е, переработ. / М.Е. Дейч. – М.-Л: Государственное энергетическое издательство, 1961. – 675 с.

14. Дидманидзе, О. Н. Математическая модель фазового перехода сжиженного метана в криогенном баке транспортного средства / О.Н. Дидманидзе, А.С. Афанасьев, Р. Т. Хакимов // Записки Горного института. - 2020. - Т. 243. – 337 с.

15. Долгов, Д. В. Влияние межсоплового расстояния на характеристику жидкостно-газового эжектора / Д.В. Долгов // Нефтегазовое дело. - 2008. - С. 1–9.

16. Донец, К.Г. Гидроприводные струйные компрессорные установки / Донец К.Г. – М: Недра, 1990. - 174 с.

17. Дроздов, А.Н. Нагнетание попутного нефтяного газа с применением насосно-эжекторных систем / А.Н. Дроздов // Химическая техника. - 2014. - № 10.

18. Зезин, В. Г. Газодинамика / В. Г. Зезин. - Челябинск: ЮУрГУ, 2010. - 132 с.

19. Игнатъева, А. Уралкриомаш разработал модификацию вагона-цистерны для транспортировки СПГ / А. Игнатъева // Neftegaz.RU. - 2021. – URL: Уралкриомаш разработал модификацию вагона-цистерны для транспортировки СПГ (neftegaz.ru) (дата обращения 24.04.2024).

20. Карманский, А.Т. Физика нефтяного и газового пласта: учебное пособие / А.Т. Карманский. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гос. горный ин-т им. Г. В. Плеханова, 2010. – 96 с.: ил. ISBN 978-5-94211-444-2.

21. Клименко, А. Экология, энергетика, энергосбережение / А. Клименко. – Москва: ПАО «Мосэнерго». 2023. - № 1. - С. 1–41. ISBN 978-5-383-01681-7
22. Климентьев, А. СПГ карта России 2021 / А. Климентьев – 2021. –64 с. - URL: [da153d043ef74dcda8d1cc34bf2c1345.pdf \(gazo.ru\)](https://gazo.ru/da153d043ef74dcda8d1cc34bf2c1345.pdf)
23. Климентьев, А. Справочные материалы. Карта российской СПГ отрасли 2023 / А. Климентьев - 2023. - С. 5–95. - URL: [spravochnyye-materialy-spg-karta-2023.pdf \(nasslng.ru\)](https://nasslng.ru/spravochnyye-materialy-spg-karta-2023.pdf)
24. Козьменко, С.Ю. Обоснование экономического преимущества морской транспортировки арктического природного газа в виде СПГ / С.Ю. Козьменко, В.А. Маслобоев, Д.А. Матвишин // Записки Горного института. - 2018. - Том 233. - С. 554.
25. Любин, Е. А. Обоснование технологии улавливания паров нефти из резервуаров типа РВС с использованием насосно-эжекторной установки: специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ»: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / Любин Евгений Анатольевич; Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова. - Санкт-Петербург, 2010. – 185 с.: ил.
26. Люгай, Д.В. Проблемные вопросы разработки и реализации проектов СПГ / Д.В. Люгай, А.З. Шайхутдинов, Ю.Г. Мутовин, Г.Э. Одишария // Вести газовой науки. - 2017. - №1 (29). - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemnyye-voprosy-razrabotki-i-realizatsii-proektov-spg> (дата обращения: 24.04.2024).
27. Мещерин, И.В. Анализ технологий получения сжиженного природного газа в условиях арктического климата / И.В. Мещерин, А.Н. Настин // Труды РГУ нефти и газа (НИУ) им. Губкина. - 2016. - № 3 (284). - С. 144–157.
28. Морозова, Н.В. Универсальные характеристики жидкостно-газовых эжекторов / Н.В. Морозова, А.А. Коршак // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. - 2013. - № 6. - С. 368–383.

29. Новак, А. Большинство стран уже оценили преимущества газа как одного из наиболее экологичных видов топлива/ А. Новак // Энергетическая политика. - 2020. - URL: <https://energybase.ru/news/articles/aleksandr-novak-bolsinstvo-stran-uzhe-ocenili-preimusestva-gaza-kak-odnogo-2020-02-10> (дата обращения: 24.04.2024).

30. ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург» Малотоннажный СПГ – ноу-хау уральских газовиков. 2018. – URL: [spg_buklet.pdf \(gazprom.ru\)](https://www.gazprom.ru/press-center/buklety/spg_buklet.pdf) (дата обращения 24.04.2024).

31. ООО «КриоГаз»: официальный сайт. - URL: <https://cryogas.ru/> (дата обращения: 24.04.2024). Режим доступа: общедоступный. – Текст: электронный.

32. ПАО Новатэк: проект «Криогаз-Высоцк»: официальный сайт. - URL: <https://www.novatek.ru/ru/business/criogas/?ysclid=lv4dwo9vsg89254454> (дата обращения: 18.04.2024). Режим доступа: общедоступный. – Текст: электронный.

33. Патент № 2002990 Российская Федерация, МПК F17C 3/00(2006.01), F17C 7/00(2006.01). Способ хранения сжиженного природного газа в транспортной емкости: № 04927275: заявлено 11.04.1991: опубликовано 15.11.1993 / Бебелин И.Н., Беляков С.В., Зашляпин Р.А., Карфидов Н.А., Петренко В.М., Сеницын Е.Я., Черемных О.Я., Шушков С.Л.; заявитель Уральский научно-производственный комплекс криогенного машиностроения. – 6 с.: ил.

34. Патент № 2014132348 Российская Федерация, МПК F25D 3/00 (2006.01). Способы хранения криогенных текучих сред в резервуарах для хранения: № 2014132348: заявлено 13.12.2012: опубликовано 27.02.2016 / ЛИ Рон; заявитель Линде Акциенгезелльшафт. – 2 с. : ил.

35. Патент № 2481234 Российская Федерация, МПК B63H 21/20(2006.01). Устройство и способ для обработки отпарного газа на танкере СПГ с электрической гребной установкой и с функцией повторного сжижения: № 2011139968/11: заявлено 03.02.2010: опубликовано 10.05.2013 / ЛИ Дза Ик,

КИМ Чеол Хо, ШИН Дзае Воонг, КИМ Хо Киеонг, ЧОИ Йоунг Дал; заявитель ЭсТиЭкс ОФФШОР ЭНД ШИПБИЛДИНГ КО., ЛТД.». – 19 с. : ил.

36. Патент № 2538192 Российская Федерация, МПК F25J 1/00(2006.01). Способ сжижения природного газа и установка для его осуществления: № 2013149401/06: заявлено 07.11.2013: опубликовано 10.01.2015 / Мамаев А.В., Сиротин С.А., Копша Д.П. и др.; заявитель Открытое акционерное общество "Газпром". – 10 с. : ил.

37. Патент № 2677022 Российская Федерация, МПК F17C 7/00 (2006.01), F25J 3/00 (2006.01). Способ сброса паров из резервуара сжиженного природного газа (СПГ): № 2018114589: заявлено 19.04.2018: опубликовано 15.01.2019 / Воронов В. А., **Мартыненко Я.В.**; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет. – 9 с.: ил.

38. Патент № 2680914 Российская Федерация, МПК F17C 3/00(2006.01), F17C 6/00(2006.01). Способ хранения и отгрузки сжиженного природного газа: № 2017140259: заявлено 20.11.2017: опубликовано 28.02.2019 / Мнушкин И.А., Никитин С.П.; заявитель Мнушкин Игорь Анатольевич. – 12 с. : ил.

39. Патент № 2716442 Российская Федерация, МПК G01N 1/14 (2006.01), G01N 1/24 (2006.01). Способ отбора проб сжиженного природного газа (СПГ): № 2019135749: заявлено 06.11.2019: опубликовано 11.03.2020 / Воронов В. А., **Мартыненко Я.В.**; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет. – 10 с.: ил.

40. Патент № 2770964 Российская Федерация, МПК F17C 13/00 (2006.01), F17C 1/00 (2006.01), F25J 3/00 (2006.01). Способ утилизации отпарного газа из резервуара сжиженного природного газа (СПГ): № 2021118599: заявлено 25.06.2021: опубликовано 25.04.2022 / **Мартыненко Я.В.**, Болобов В.И.; заявитель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» – 11 с.: ил.

41. Рачевский, Б. С. Сжиженные углеводородные газы / Б. С. Рачевский. - Москва: Нефть и Газ - 2009.- 640 с., ил.

42. Российская Федерация. Распоряжение Правительства Российской Федерации №. №640-р: Долгосрочная программа развития производства сжиженного природного газа в Российской Федерации: утверждена Правительством РФ 16 марта 2021 года]. – Москва: 2021. – 92 с.

43. Сабирзянов, А. Н. Многофакторность влияния степени утопленности сопла на коэффициент расхода / А.Н. Сабирзянов, А.Н. Кириллова // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. - 2018. - № 1 (24).

44. Сергель, О. С. Прикладная гидрогазодинамика / О. С. Сергель. - М: Машиностроение - 1981. - 1–374 с.

45. Соколов, Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер, под ред. Т. И. Мушинска. - Москва: Энергоатом - 1989. - 352 с.

46. СП 240.1311500.2015. Хранилища сжиженного природного газа. Требования пожарной безопасности: издание официальное: утвержден и введен в действие приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России) от 20 августа 2015 г. N 452: введен впервые: дата введения 2015–08–31 / подготовлен Федеральным государственным бюджетным учреждением "Всероссийский ордена "Знак Почета" научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России" (ФГБУ ВНИИПО МЧС России). – Москва: Стандартиформ, 2015. – 23 с.

47. Тарасов, В. В. Расчет времени истечения идеального газа из резервуара постоянного объема в среду с постоянным давлением при адиабатическом процессе / В.В. Тарасов // Вестник Тюменского государственного университета. - 2016. - № 2 (2). - С. 84–95.

48. Успенский, В. А. Струйные вакуумные насосы / В.А. Успенский, Ю.М. Кузнецов. - Москва: Машиностроение - 1973. - 145 с.

49. Хануков, Х.М. Инновационные решения систем хранения сжиженного природного газа / Х.М. Хануков, Н.В. Четвертухин, А.В. Алипов и др.// Вести газовой науки. 2020. - № 42 (1). - С. 7. - URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-resheniya-sistem-hraneniya-szhizhennogo-prirodnogo-gaza> (дата обращения: 24.04.2024).

50. Югорский Машиностроительный Завод Юграмаш: официальный сайт. - URL: <https://ugramash.ru/> (дата обращения: 24.04.2024). Режим доступа: общедоступный. – Текст: электронный.

51. Abd, A. Efficient Design of a Large Storage Tank for Liquefied Natural Gas / A. Abd, S. Naji, F. Lafta // Univ. Babylon Eng. Sci. – 2018. – №26. - P. 362–382. – URL:https://www.researchgate.net/publication/324039736_Efficient_Design_of_a_Large_Storage_Tank_for_Liquefied_Natural_Gas (accessed on 24.04.2024).

52. Aidoun, Z. Current Advances in Ejector Modeling, Experimentation and Applications for Refrigeration and Heat Pumps. Part 1: Single-Phase Ejectors / Z. Aidoun // Inventions. - 2019. - № 1 (4).

53. Ameer, K. Experimental Performance of a Two-Phase Ejector: Nozzle Geometry and Subcooling Effects / K. Ameer, Z. Aidoun, M. Falsafioon // Inventions. - 2020. - №5. - P. 23.

54. Bolobov, V. Experimental Determination of the Flow Coefficient for a Constrictor Nozzle with a Critical Outflow of Gas / V. Bolobov, **Y. Martynenko**, S. Yurtaev // Fluids. - 2023. - №8. - P. 169.

55. Bolobov, V. Experimental installation to assess the possibility of using a gas ejector for the disposal of boil-off gas of LNG / V. Bolobov, **Y. Martynenko** // Petroleum Engineering. - 2022. - №20. - P. 140–148.

56. Bolobov, V. Improvement of the Liquefied Natural Gas Vapor Utilization System Using a Gas Ejector / V. Bolobov, **Y. Martynenko**, V. Voronov, I. Latipov, G. Popov // Inventions. - 2022. - № 1 (7).

57. Bouabidi, Z. [and other]. Study on Boil-off Gas (BOG) Minimization and Recovery Strategies from Actual Baseload LNG Export Terminal: Towards Sustainable LNG Chains // Energies. - 2021. - № 12 (14).

58. BP Statistical Review of World Energy 2022, (71st edition). - 2022. - URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business->

sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf?ysclid=lve57pieke278118933 (accessed on: 24.04.2024).

59. Charalampous, G. How do liquid fuel physical properties affect liquid jet development in atomisers? / G. Charalampous, Y. Hardalupas // *Physics of Fluids*. 2016. - № 10 (28).

60. Cherepovitsyn, A.E. Innovative approach to the development of mineral raw materials of the arctic zone of the Russian Federation / A.E. Cherepovitsyn, S.A. Lipina, O.O. Evseeva // *Journal of Mining Institute*. - 2018. - № 0 SE-Geoconomics and Management (232). - P. 438.

61. Drozdov, A. N. Development of a pump-ejector system for SWAG injection into reservoir using associated petroleum gas from the annulus space of production wells / A. N. Drozdov, E. I. Gorelkina // *Journal of Mining Institute*. - 2022. - № 0 SE-Geotechnical Engineering and Engineering Geology (254). - P. 191–201.

62. Drozdov, A. N. Improving the Operation of Pump-ejector Systems at Varying Flow Rates of Associated Petroleum Gas / A.N. Drozdov, Ya.A. Gorbyleva // *Journal of Mining Institute*. - 2019. - № 0 SE-Oil and gas (238). - P. 415.

63. Dzyuba, A. P. Role of Russia in Development of the Global Liquefied Natural Gas Market / A. Dzyuba // *Bulletin of the Moscow University named S U Vitte Series 1 Economics and management*. - 2021. - № 1 (1). - P. 52–63.

64. Erokhin, A. P. Calculation of the optimal parameters of the ejector / A. P. Erokhin // *Journal of Mining Institute*. - 1973. - № 1 SE-Without section (65). - P. 32.

65. ISO/TS 18683:2021. Guidelines for safety and risk assessment of LNG fuel bunkering operations. BS: UK, 2015.

66. Katysheva, E. Prospects and environmental implications of the use of liquefied natural gas as bunker fuel in the arctic region of Russia International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM / E. Katysheva // 51 Alexander Malinov blvd, Sofia, 1712, Bulgaria: STEF92 Technology. - 2017. - P. 423–430.

67. Kim, D. [and other]. Process design and economic optimization of boil-off-gas re-liquefaction systems for LNG carriers / D. Kim // *Energy*. - 2019. - №173. - P. 1119–1129.
68. Leonard, M. [and other]. The geopolitics of the European Green Deal / M. Leonard // *International Organisations Research Journal*. - 2021. - № 2 (16). - P. 204–235.
69. Leung, J. C. A theory on the discharge coefficient for safety relief valve / J. C. Leung // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2004. № 4 (17). P. 301–313.
70. Litvinenko, V. The Role of Hydrocarbons in the Global Energy Agenda: The Focus on Liquefied Natural Gas / V. Litvinenko // *Resources*. - 2020. - № 5 (9).
71. Lyubin, E. A. Evaluation of a Technology for Capturing Petroleum Vapors from Rvs-Type Storage Tanks with the Use of a Pump-Ejector Plant / E. A. Lyubin // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2014. № 5 (50). P. 288–293.
72. Mansour, A. The effect of turbulence on the stability of liquid jets and the resulting droplet size distributions: third quarterly technical report July 1, 1993-September 30, 1993 / A. Mansour, N. Chigier. - Pittsburgh, PA, and Morgantown, WV: - 1993.
73. Martynenko, Y. V. A technological solutions set to ensure the safety of storage of liquefied natural gas / Y. Martynenko, V. A. Voronov // *Youth technical sessions proceedings*. - 2019. - P. 107–113.
74. **Martynenko, Y.**, Use of liquid-gas ejector in liquefied natural gas (LNG) sampling system / **Y. Martynenko**, V. Bolobov, V. A. Voronov // *E3S Web of Conferences*. - 2021. - №266. - P. 1006.
75. Miller, F. P. *Adiabatic Process* / F. P. Miller, A. F. Vandome, J. McBrewster. - Alphascript Publishing: - 2010.
76. Mokhatab, S. *Handbook of Liquefied Natural Gas* / S. Mokhatab, J. Mak, J. Valappil, D. – Wood: 2014.

77. Muwarure, P. Simulation of the recovery of boil-off gas at LNG storage section and exporting terminals / P. Muwarure, I. Otaraku, E. Iriakuma // *Global Journal of Engineering Science and Research Management*. - 2023. - №10.
78. Patent No. KR20160120195A. South Korea, G02B1/14. Treatment System of Gas and Vessel having same: 23.08.2016 / Lee J. – 15 p.
79. Rao, H. N. Minimizing power consumption related to BOG reliquefaction in an LNG regasification terminal / H. N. Rao, K. H. Wong, I. A. Karimi // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. - 2016. - № 27 (55). - P. 7431–7445.
80. Reader-Harris, M. Nozzle Discharge Coefficient Cham / M. Reader-Harris // *Springer International Publishing*. - 2015. - P. 281–304.
81. Rio-Cano, C. Discharge Coefficients of a Heavy Suspension Nozzle / C. Rio-Cano // *Applied Sciences*. - 2021. - № 6 (11).
82. Seredenko, E. S. Mathematical model of liquefied natural gas evaporation and analysis of original composition effect on evaporation speed / E. S. Seredenko, O. V. Pakhomov, A. Yu. Baranov // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. - 2020. - № 4 (20). - P. 603–610.
83. Tcvetkov, P. Small-scale LNG projects: Theoretical framework for interaction between stakeholders / P. Tcvetkov // *Energy Reports*. - 2021.
84. The Linde Group. StarLNG. Advanced Standardized Small- and Medium-Tonnage LNG Plants. 2017. - URL: [StarLNG_Russian_tcm480-458277.pdf](#) (accessed on 24.04.2024)
85. Voronov, V. A., Martynenko, Y. Engineering design of the ejector system for liquefied natural gas (LNG) vapor discharge 2019. / V. A. Voronov, Y. Martynenko // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*. – 2019. - P. 842–850.
86. Wärtsilä. BOG Reliquefaction Takes Another Step forward with the Compact Reliq from Wärtsilä. 2021. – URL: <https://www.wartsila.com/insights/article/bog-reliquefaction-takes-another-step-forward-with-the-compact-reliq-fromwartsila> (accessed on 24.04.2024)

87. Zhao, B. [and other]. Experimental study on performance of BOG compressor / B. Zhao // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2015. - № 90.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения результатов диссертационного исследования

Утверждаю

Генеральный директор
ООО «Газпром СПГ технологии»

И.Н. Кожевников

2023 г.



АКТ (СПРАВКА)

о внедрении (использовании) результатов
кандидатской диссертации

Мартыненко Яна Владимировна, 2.8.5. Строительство и эксплуатация
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

(фамилия, имя, отчество соискателя ученой степени)

по научной специальности (шифр, наименование специальности)

Комиссия (НТС, рабочая, специальная) в составе:

Председатель

Главный инженер Трофимов А.И.;

Члены комиссии:

Начальник УПТД Козин В.В.;

Начальник ТО УПТД Ракитский В.А.;

составили настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование применения и выбор параметров газового эжектора в системах хранения сжиженного природного газа (СПГ)», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, могут быть использованы в производственной деятельности компании ООО «Газпром СПГ технологии» при разработке технических решений по техническому перевооружению объекта КСПГ «Тобольск» в виде:

- технических предложений по разработке конструктивных схем для утилизации паров из криогенных емкостей хранения СПГ;
- результатов экспериментов, подтверждающих возможность использования газового эжектора для аккумуляции отпарного газа в емкость замкнутого объема или трубопровод обратного потока на ГРС «Тобольская»;
- методических рекомендаций по расчету термодинамических и геометрических параметров эжекторной установки для криогенных емкостей хранения.

Использование указанных результатов позволяет:

- сократить капитальные и эксплуатационные затраты при замене компрессоров (блока дожимных компрессоров) газовым эжектором порядка до 30 раз по потребляемой мощности (75кВт/2,5кВт), многократно снизить стоимость капиталовложений и металлоемкости применяемого оборудования, упростить монтажные и пусконаладочные работы;
- упростить реализацию автоматической системы управления КСПГ «Тобольск» ввиду исключения многочисленных предупредительных аварийных сигналов, а также сигналов регулирования и управления;
- снизить операционные затраты на техническое обслуживание и ремонт оборудования;
- снизить риски промышленной безопасности и наступления аварийных ситуаций;
- оптимизировать занимаемую оборудованием площадь КСПГ «Тобольск».

Председатель комиссии

Главный инженер



Трофимов А.И.

Члены комиссии:

Начальник УПТД



Козин В.В.

Начальник ТО УПТД



Ракитский В.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патенты на объекты интеллектуальной собственности

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2770964

**СПОСОБ УТИЛИЗАЦИИ ОТПАРНОГО ГАЗА ИЗ
РЕЗЕРВУАРА СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА
(СПГ)**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Мартыненко Яна Владимировна (RU), Болобов
Виктор Иванович (RU)*

Заявка № 2021118599

Приоритет изобретения 25 июня 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 25 апреля 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 25 июня 2041 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2716442

СПОСОБ ОТБОРА ПРОБ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО
ГАЗА (СПГ)

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Воронов Владимир Александрович (RU),
Мартыненко Яна Владимировна (RU)*

Заявка № 2019135749

Приоритет изобретения 06 ноября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 11 марта 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 06 ноября 2039 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2677022

**СПОСОБ СБРОСА ПАРОВ ИЗ РЕЗЕРВУАРА
СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА (СПГ)**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Воронов Владимир Александрович (RU),
Мартыненко Яна Владимировна (RU)*

Заявка № 2018114589

Приоритет изобретения 19 апреля 2018 г.

Дата государственной регистрации в

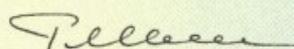
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 15 января 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 19 апреля 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Изrael

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Временные зависимости массового расхода газа при истечении через сопло

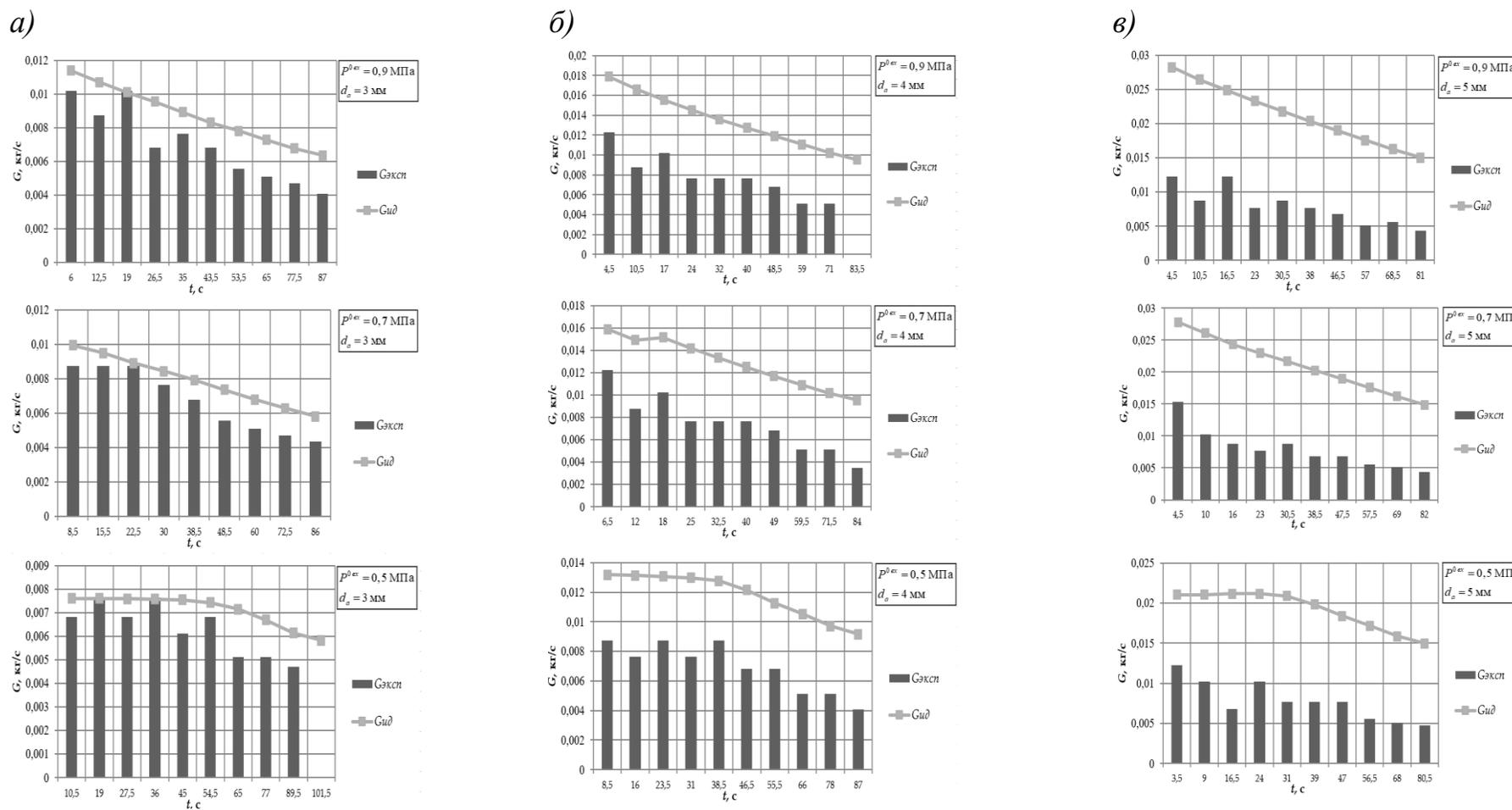


Рисунок В.1 – Временные зависимости расхода газа, рассчитанные по изменению массы газа в ресивере

(диаграммы) и истечению газа через сопло в идеальных условиях (кривые) при использовании сопел диаметром $d_a = 3$ мм

(а), 4 мм (б), 5 мм (в)