

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 нефте-
газопроводов, баз и хранилищ*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2024

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Болобов Виктор Иванович

Официальные оппоненты:

Медведева Оксана Николаевна

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», кафедра «Теплогазоснабжение и нефтегазовое дело» Института урбанистики, архитектуры и строительства, профессор;

Зайцев Андрей Викторович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы», доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», г. Самара.

Защита диссертации состоится **11 сентября 2024 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.11 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 11 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ФЕТИСОВ
Вадим Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 аккумулялирующую 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 аккумулялирующую 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. Ameer* 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.

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 диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, 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 (далее – Перечень ВАК), в 3 изданиях, входящих в междуна-

родную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 3 патента на изобретения.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, обозначены цель и задачи исследования, раскрыты идея, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, изложены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе оценена роль СПГ в мировом топливном балансе, проанализированы его свойства, способы получения, хранения и транспортировки. Выявлена проблема утилизации отпарных паров из хранилищ СПГ. Рассмотрен принцип работы эжекторных устройств и область их применения.

Во второй главе отмечается, что при наличии общего описания физических процессов, происходящих в эжекторном устройстве, существует ряд недостаточно исследованных зависимостей и условий для их применения, без уточнения которых невозможна разработка конструкции эжектора для утилизации отпарного газа. В первую очередь это касается зависимости расхода пассивного газа от давления активной среды и возможности аккумуляции эжекторного газа в емкость повышенного давления.

В третьей главе представлены результаты исследований, проведенных на экспериментальной установке, моделирующей процесс утилизации отпарного газа из резервуара СПГ с помощью газового эжектора. Результаты экспериментальных исследований обрабатывались методами математической статистики.

В четвертой главе предлагается технологическая схема утилизации отпарного газа из резервуара СПГ с использованием газового эжектора с аккумулярованием эжекторной среды в емкость для последующего использования. Представлен алгоритм расчета рабочих и конструктивных параметров необходимого эжектора, который иллюстрируется примером.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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.

На рисунке 1 (вкладка) представлена экспериментальная установка, спроектированная с использованием классических формул расчета эжекторных устройств и сведений о существующих наиболее рациональных их конструкциях.

В ресивер 2 ($V=0,1 \text{ м}^3$) и баллон 9 ($V=0,04 \text{ м}^3$) (рисунок 1), как в источники активного и пассивного газа, соответственно, с использованием компрессора 1 нагнетался воздух до рабочего давления ($P_p^0=P_\sigma^0=1 \text{ МПа}$), контролируемого ма-

нометрами 3, 10. Редуктора 5, 12 обеспечивали постоянное давление на линиях 7 и 15 в диапазоне 0,1-1 МПа (P_a^0, P_n^0) на входе в модельный эжектор 16 (рисунок 2). Давление активного газа P_a , а также давление и расход пассивного P_n, G_n на линиях 7, 15 регистрировались датчиками давления 6, 14 и расходомером 13 с последующей обработкой данных программируемым логическим контроллером 23 и персональным компьютером 24. Установка обеспечивала эжекцию и сброс потока из эжектора в атмосферу с фиксацией давлений P_p, P_b в емкостях в каждый момент времени t их опорожнения, а при подключении емкости 19 ($V=0,04 \text{ м}^3$) позволяла аккумулировать в ней поток с регистрацией давления $P_{ем}$ манометром 20. Краны шаровые 4, 8, 11, 21, 22 обеспечивали отсечение линий при наполнении или опорожнении емкостей, настройке редукторов или для изменения схемы подключения.

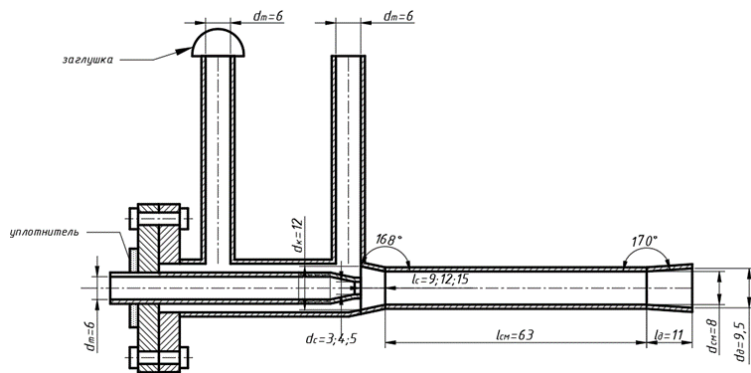


Рисунок 2 – Схема модельного эжектора, использованного в экспериментальной установке

Конструкция модельного эжектора позволяла изменять диаметр d_a отверстия на срезе сопла 4 (0,003 м, 0,004 м, 0,005 м), расстояние от среза сопла l_k до камеры смешения (0,006 м, 0,009 м, 0,012 м, 0,015 м), а также место подачи низконапорно-

го потока (в срез сопла или в межтрубное пространство до сопла).

После открытия кранов 4, 11, 22 (рисунок 1) активный поток, истекая из сопла 4 эжектора, увлекал пассивный поток, поступающий через патрубок 2 или 3, в камеру смешения 7 с последующим сбросом смеси в атмосферу или в емкость 19.

Целью экспериментов являлось установление зависимости расхода пассивного потока G_n от давления и расхода активного потока, а также влияния на величину G_n конструктивных элементов эжектора (значений d_a , l_k , места ввода) и давления в емкости 19.

Полученные зависимости G_n и G_a от времени t при различном начальном давлении на редукторе активного и постоянном давлении пассивного $P_n=0,1$ МПа газов представлены на рисунке 3 (вкладка). (Расход активного потока рассчитывался по величине давления P_a , исходя из показаний датчика 6 (рисунок 1), с использованием известной формулы (1) для истечения газа из емкости:

$$G = \mu F \beta \frac{P(t)}{\sqrt{RT}}, \quad (1)$$

где $P(t)$ – давление в емкости в i -ый момент времени; μ - коэффициент расхода сопла (в нашем случае зависит от величины сопротивления, создаваемого редуктором); F - площадь сопла; R - удельная газовая постоянная; T - температура газа;

$$\beta = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad k - \text{показатель адиабаты.}$$

На графиках можно выделить два участка, первый (I) - соответствует постоянному давлению на редукторе ($P_i = P_a^0$), что определяет постоянство G_a во времени. Второй (II) - давлению в ресивере ниже давления настройки редуктора, при

этом величина P_i уменьшается со временем t в соответствии с известным выражением (2):

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

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

Графики рисунка 4 (вкладка) иллюстрируют аналогичные зависимости для повышенного давления пассивного потока и другого диаметра сопла $d_{a2}=0,004$ м.

Видно, что в широких интервалах расхода (0,004-0,093 кг/с) и давлений (0,29-0,9 МПа) активного потока, величина расхода пассивного потока для одного и того же диаметра сопла остается практически постоянной: $G^{cp}_n=0,37 \cdot 10^{-3} \pm 0,02 \cdot 10^{-3}$ кг/с для $P_n=0,1$ МПа при $d_{c1}=0,003$ м и $G^{cp}_n=4,44 \cdot 10^{-3} \pm 0,2 \cdot 10^{-3}$ кг/с для $P_n=0,3$ МПа при $d_{c2}=0,004$ м.

Установление независимости расхода пассивного потока от давления и расхода активного находится в соответствии с законом внутреннего трения Ньютона, согласно которому сила трения между слоями газа пропорциональна его вязкости. Поскольку вязкость газов, близких к идеальному газу (при давлении до 10 МПа), практически, не зависит от их давления, сила трения между поверхностными слоями активного и пассивного потока, и как следствие расход увлекаемого газа, не изменяются с изменением давления активной среды.

Рисунки 5-6 (вкладка) представляют результаты опытов, посвященных определению наиболее рационального отношения расстояния от среза сопла до камеры смешения (длины l_k) к диаметру сопла d_a . Видно, что зависимость $G_n=f(l_k/d_a)$ имеет максимум при $l_k/d_a=4$, который соответствует максимальному значению длины свободной струи ($l^{max}=3 \div 4d$ по Г.Н.

Абрамовичу), как обеспечивающей наиболее эффективное увлечение молекул пассивной газовой среды нерасширяющимся потоком.

Как показали результаты экспериментов (рисунок 7), 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%.

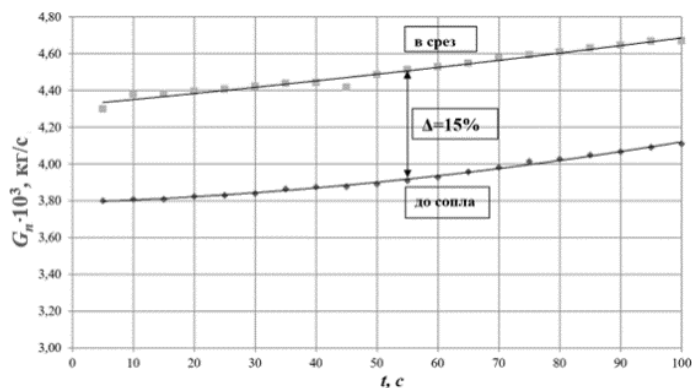


Рисунок 7 – Зависимость расхода пассивной среды от времени для разного положения патрубка ввода при $P_n=0,3$ МПа

Для подтверждения возможности аккумуляции газовой среды с помощью эжектора в замкнутый объем, в емкость 19 установки (рисунок 1) эжектировался пассивный газ при различном давлении активного газа перед соплом с замером расхода G_n и давления в емкости $P_{ем}$. Было установлено (рисунок 8), что в начальный момент времени, в течение которого сохранялся критический перепад ($P_a/P_n \geq P_{кр}$) и условие $P_{см} \geq P_{ем}$, расход G_n после выхода на стационарный режим достигал для всех величин P_a практически постоянного значения ($0,41 \cdot 10^{-3}$ кг/с), близкого к расходу G_n , установленному при истечении газа в атмосферу (рисунок 3; $0,37 \cdot 10^{-3}$ кг/с), что подтверждало вывод независимости G_n от давления активной среды. Как по-

казали эксперименты, необходимым условием эжектирования в емкость является недопустимость явления гидроудара и других сопротивлений в линии подачи во избежание эффекта запираания.

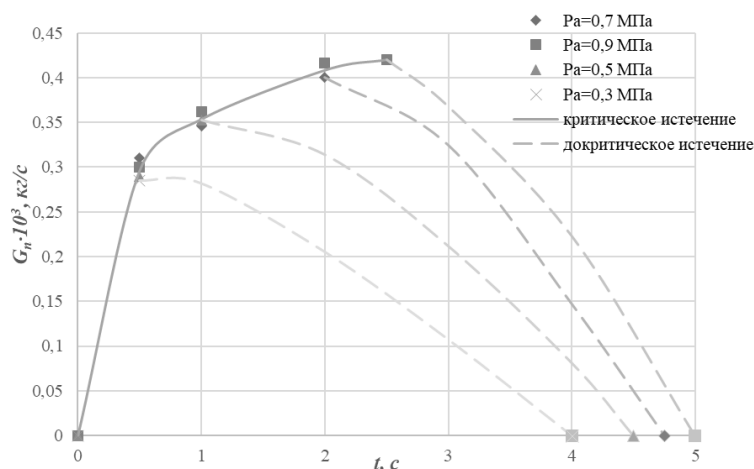


Рисунок 8 - Зависимость расхода пассивного газа от времени эжекции при аккумуляции в емкость

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.

Утилизацию отпарного газа (пассивной среды), периодически сбрасываемого из резервуара СПГ 2 (рисунок 9), предлагается осуществлять с использованием газового эжектора 10, в качестве активной среды которого выступает природный газ из трубопровода повышенного давления 6, с направлением полученной смеси в аккумулирующую емкость 13 (Патент № 2770964. Способ утилизации отпарного газа из

резервуара сжиженного природного газа (СПГ), Мартыненко Я.В., Болобов В.И.)

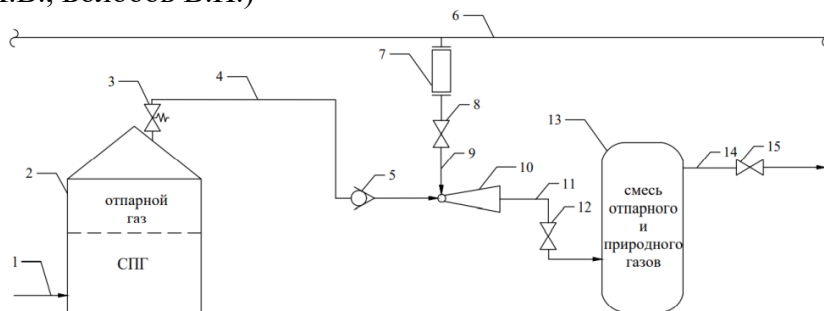


Рисунок 9 – Схема утилизации паров СПГ с использованием эжектора

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

Расчет конструктивных и рабочих параметров эжекторной установки, обеспечивающей аккумуляцию необходимого расхода отпарного газа в емкость с достижением заданного давления среды производится по следующему алгоритму, учитывающему установленную независимость параметров пассивной среды от активной, справедливой для состояния газа, близкого к идеальному (для природного газа при давлениях до 10 МПа), и позволяющему рассчитывать входные параметры активной среды, исходя из давления на выходе из эжектора.

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 . Задается ряд значений давлений P_a активной среды – природного газа после редуктора, установленного на трубопроводе.

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 (3), (4):

$$n\sqrt{\theta} = \frac{1}{\Pi_0} \frac{\frac{1}{q(\lambda'_a)} - \frac{1}{q(\lambda_a)}}{\frac{1}{q(\lambda_n)} - \frac{1}{q(\lambda'_n)}}, \quad (3)$$

$$n\sqrt{\theta} = \frac{z(\lambda'_a) - z(\lambda_a)}{z(\lambda_n) - 2}, \quad (4)$$

где $q(\lambda)$, $z(\lambda)$ – газодинамические функции, рассчитываются значения приведенной скорости пассивного потока λ_n на входе в камеру смешения эжектора для ряда коэффициентов эжекции n в диапазоне от 0,1 до 1.

4. С использованием уравнений (5), (6), (7), (8) для тех же значений n при $z(\lambda_{cm}) \geq 2$ устанавливаются геометрическое соотношение $\alpha = F_a/F_n$, приведенная скорость потоков λ_{cm} , давление P_{cm} и температура T_{cm} смеси на выходе из эжектора.

$$\alpha = \frac{q(\lambda_n)}{n \cdot q(\lambda_a) \cdot \Pi_0 \sqrt{\theta}}, \quad (5)$$

$$z(\lambda_{cm}) = \frac{z(\lambda_a) + n\sqrt{\theta} \cdot z(\lambda_n)}{\sqrt{(n+1)(n\sqrt{\theta} + 1)}}, \quad (6)$$

$$P_{cm} = P_a \frac{\sqrt{(n+1)(n\sqrt{\theta} + 1)}}{1 + 1/\alpha} \frac{q(\lambda_a)}{q(\lambda_{cm})}, \quad (7)$$

$$T_{cm} = \frac{(\frac{n \cdot T_n}{T_a} + 1) T_a}{n + 1} \quad (8)$$

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 $P_0 = f(\alpha)$, характеризующей условия заклинивания эжектора, проверяется его работоспособность при выбранных параметрах P_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.

Алгоритм иллюстрируется примером расчета, проведенного для периодического сброса отпарного газа ($G_n = 0,0014$ кг/с, $T_n = 112$ К, $P_n = 0,106$ МПа) 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. Как показали результаты расчета, указанный компрессор

может заменить эжекторное устройство с параметрами: $F_a = 0,73 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$; $F_n = 0,24 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $F_{см} = 0,31 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$; $l_{см} = 63 \text{ мм}$; $l_k = 22 \text{ мм}$ и емкость объемом $0,02 \text{ м}^3$, что обеспечивает:

- сокращение капитальных и эксплуатационных затрат до 30 раз по потребляемой мощности (75кВт/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;
- оптимизацию занимаемой оборудованием площади (2460x1680x1265 мм / 200x20x50 мм).

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 $l_w/d_a \sim 4$ 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Болобов, В.И. Экспериментальная установка для оценки возможности использования газового эжектора для утилизации отпарных газов / В.И. Болобов, **Я.В. Мартыненко** // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20. – № 5. – С. 140-148. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-5-140-148. ВАК № 1679 ред. 01.02.2022.

2. Воронов, В.А. Сравнительный анализ однофазного и двухфазного режимов транспортировки природного газа по трубопроводным системам / В.А. Воронов, **Я.В. Мартыненко**, М.Н. Назарова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – Т. 4. – № 4(58). – С. 28-34. ВАК-МБД № 657 ред. 19.06.2017.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. 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. – Vol. 8. – № 6 – P. 169. DOI: 10.3390/fluids8060169

4. Bolobov, V. Improvement of the Liquefied Natural Gas Vapor Utilization System Using a Gas Ejector / V. Bolobov, **Y.V. Martynenko**, V. Voronov, I. Latipov, G. Popov // *Inventions*. – 2022. Vol. 7. - №1 – P. 14. DOI: 10.3390/inventions7010014.

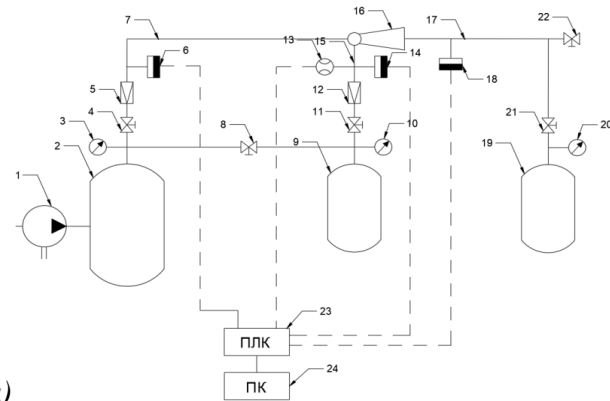
5. **Martynenko, Y.V.** Use of liquid-gas ejector in liquefied natural gas (LNG) sampling system / Y.V. Martynenko, V.I. Bolobov, V.A. Voronov // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – Vol. 266. – P. 10. DOI: 10.1051/e3sconf/202126601006

Патенты:

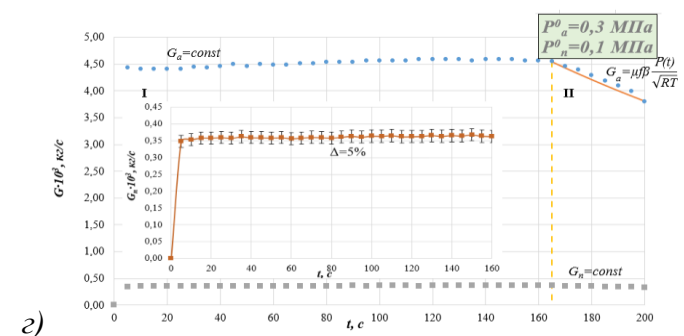
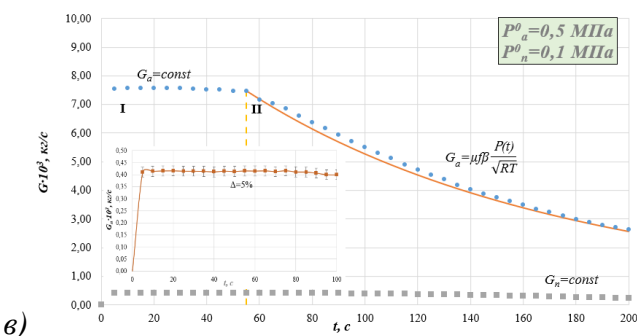
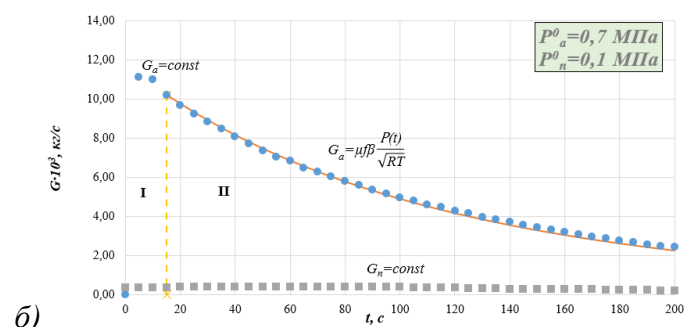
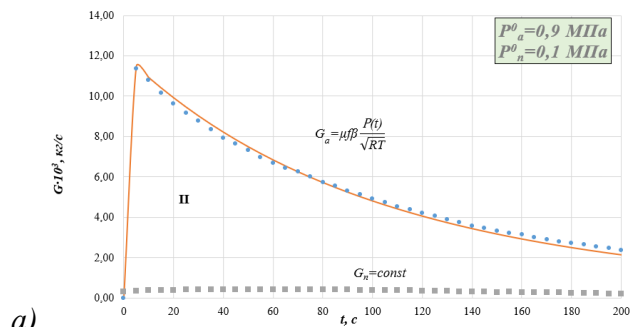
6. Патент № 2770964 Российская Федерация, МПК F17C 13/00 (2022.02), F25J 1/00 (2022.02). Способ утилизации отпарного газа из резервуара сжиженного природного газа (СПГ): № 2021118599: заявл. 25.06.2021: опубл. 25.04.2022 / **Мартыненко Я.В.**, Болобов В.И.; заявитель СПГУ. – 6 с.: ил.

7. Патент № 2716442 Российская Федерация, МПК G01N 1/14 (2006.01), G01N 1/24 (2006.01). Способ отбора проб сжиженного природного газа (СПГ): № 2019135749: заявл. 06.11.2019: опубл. 11.03.2020 / Воронов В.А., **Мартыненко Я.В.**; заявитель СПГУ. – 9 с.: ил.

8. 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: заявл. 19.04.2018: опубл. 15.01.2019 / Воронов В.А., **Мартыненко Я.В.**; заявитель СПГУ. – 8 с.: ил.



а) б)
Рисунок 1 – Схема (а) и вид (б) экспериментальной эжекторной установки



а) б) в) г)
Рисунок 3 – Экспериментальные и расчетные зависимости массовых расходов активного G_a и пассивного G_n потоков эжектора при $P_n=0,1$ МПа и начальном $P_a^0=0,9$ МПа (а), $0,7$ МПа (б), $0,5$ МПа (в) и $0,3$ МПа (г) ($d_{cl}=0,003$ м)

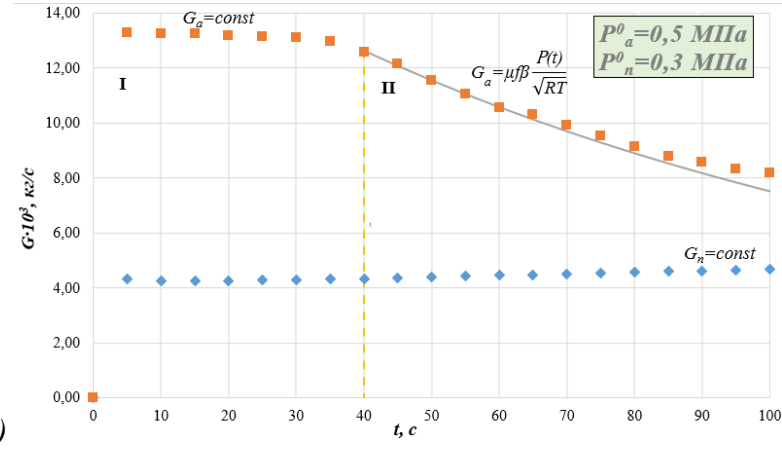
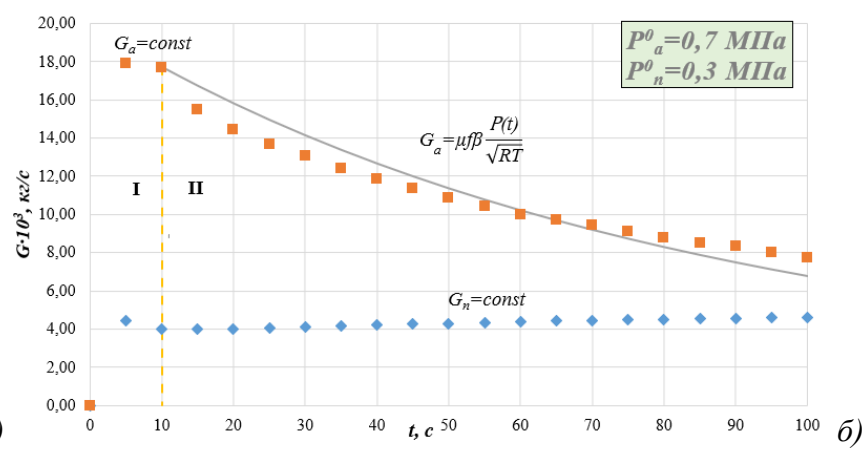


Рисунок 4 - Временные зависимости массовых расходов активного G_a и пассивного G_n потоков эжектора при $P_n=0,3 \text{ МПа}$ и начальном $P_a^0=0,7 \text{ МПа}$ (а), $0,5 \text{ МПа}$ (б), ($d_{c2} = 0,004 \text{ м}$)

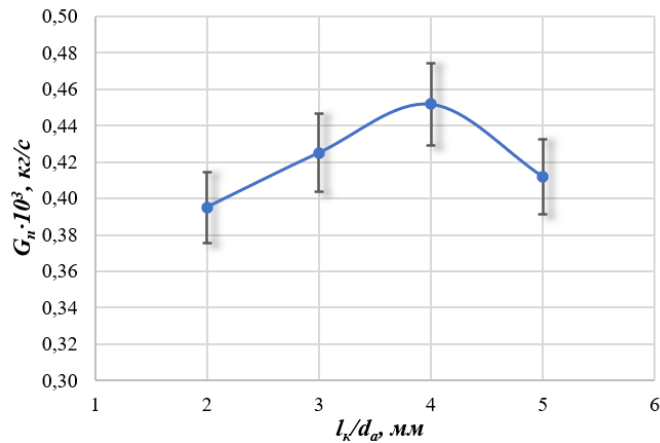


Рисунок 6 – Зависимость расхода пассивного потока G_n от расстояния от среза сопла до камеры смешения l_k к диаметру сопла d_a

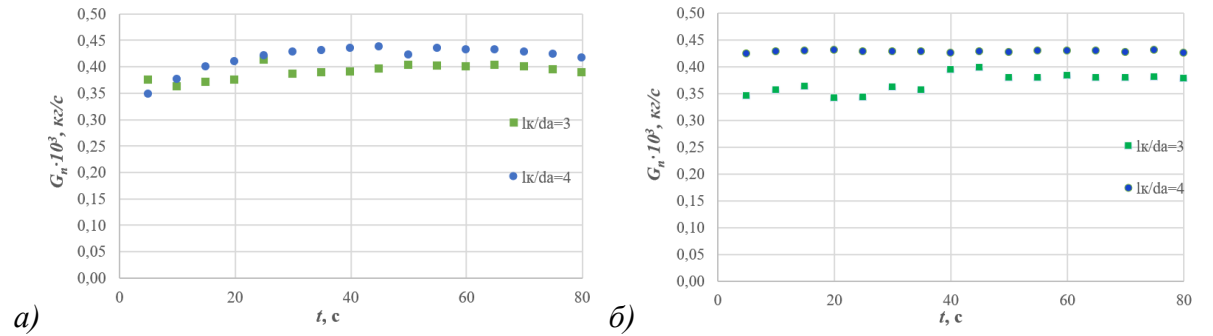


Рисунок 5 – Временные зависимости расхода пассивного потока при $l_{k1}=0,009 \text{ м}$ и $l_{k2}=0,012 \text{ м}$ для сопла $d_{a1}=0,003 \text{ м}$ при начальном давлении активного $P_a^0=0,9 \text{ МПа}$ (а), $0,5 \text{ МПа}$ (б)