

На правах рукописи



Солдатов Евгений Сергеевич

**СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ
ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕЖИМАМИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
КРИОГЕННЫХ СОСУДОВ**

05.13.01. – Системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в АО «Научно-производственное предприятие «Топаз»»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Богомолов Алексей Валерьевич

Официальные оппоненты: **Ряжских Виктор Иванович**
доктор технических наук, профессор
заведующий кафедрой прикладной
математики и механики ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
технический университет»

Королев Николай Сергеевич
кандидат технических наук
директор по развитию направления
сжиженного природного газа ПАО
«Криогенмаш»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
технологический университет»**

Защита состоится 23 сентября 2020 г. в _____ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.271.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, Тула, пр. Ленина, 92 (аудитория 12-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92 и на сайте http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-05/Soldatov_ES/

Автореферат разослан 21 июля 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Соколова
Марина Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для ряда отраслей экономики страны критически важными являются вопросы хранения и транспортировки криогенных продуктов – технических газов (азот, кислород, аргон, водород и др.), получаемых с применением криогенных (протекающих при температурах ниже 120 К) процессов, используемых вне пределов установки, в которой они получены, и находящихся в процессе хранения и транспортировки при криогенных температурах (ГОСТ 21957–76). Одним из таких вопросов является газоснабжение отдаленных районов, в которые экономически нецелесообразно поставлять природный газ при помощи магистральных газопроводов. По оценкам экспертов до 50 % негазифицированных до настоящего времени населенных пунктов России в перспективе целесообразно обеспечивать топливом с помощью сжиженного природного газа (СПГ) (Т.В. Енжаева, 2018).

Для снижения риска возникновения взрывопожароопасной ситуации при работе систем хранения и транспортировки криогенных продуктов должны быть приняты меры по минимизации утечек продукта через газосброс и предохранительные клапаны, в том числе, за счет обеспечения информационной поддержкой персонала, ответственного за эксплуатацию криогенных сосудов, адекватными данными об их текущем состоянии. Решение этой задачи требует учета ключевых особенностей теплообменных процессов в криогенных сосудах при любых режимах их эксплуатации с помощью специальных моделей и алгоритмов сбора и обработки информации.

К настоящему времени разработаны универсальные программные комплексы (ПК), предназначенные, в том числе и для решения задач гидрогазодинамики (ГГД) и теплообмена (ТМО). Среди наиболее известных программных комплексов необходимо отметить отечественную разработку – ПК «ЛОГОС», а также зарубежные системы: ANSYS, COMSOL Multiphysics, Solid Works Flow Simulation, Star-CD, Flowvision, CFD-ACE+. Тем не менее, при применении названных ПК для решения задач моделирования ТМО в криогенных сосудах возникает ряд трудностей, таких как: требование достаточно высокой квалификации пользователей, большие временные затраты при расчете нестационарных процессов ТМО (продолжительность расчета для одного криогенного сосуда может достигать 3-4 недель), сложность задания совокупности исходных данных учета специфики ТМО в криогенных сосудах. Это подчеркивает важность создания специальных систем для моделирования процессов ТМО в криогенных сосудах при длительном хранении и транспортировке криогенных продуктов.

Несмотря на наличие научных трудов, посвященных вопросам ТМО при хранении криогенных продуктов, на сегодняшний день отсутствуют адекватные универсальные подходы к расчету изменяющихся с течением времени теплофизических параметров жидкости и газа в криогенном сосуде. Недостаточно внимания уделено методам моделирования, учитывающим перемещение границы раздела фаз «жидкость-пар» в криогенном сосуде. В зависимости от начальной степени заполнения криогенного сосуда жидким продуктом, уровень жидкости с течением времени будет понижаться или повышаться – вплоть до создания небезопасной ситуации, при которой жидкость занимает полностью весь объем криогенного сосуда (за исключением трубопроводов его обвязки). В этом случае скорость роста давления в криогенном сосуде увеличивается в 5-8 раз.

Для успешного решения комплекса задач по снижению потерь криогенных продуктов при хранении требуется система поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов, обеспечивающая точное прогнозирование максимально допустимой продолжительности бездренажного хранения продукта в криогенном сосуде. В первую очередь, речь идет о принятии решений логистическим персоналом при планировании поставок криогенных продуктов, поскольку по мере уменьшения степени заполнения сосуда жидкостью (менее 30 % по объему) возрастает скорость увеличения давления в сосуде и, соответственно, снижается время бездренажного хранения криогенного продукта. Во-вторых, в распоряжении специалистов, ответственных за безопасную

эксплуатацию криогенных сосудов, отсутствует программное обеспечение поддержки принятия решений при планировании вынужденных сбросов паров из сосудов в тех случаях, когда простой дренаж в атмосферу не допускается в целях безопасности (например, при эксплуатации систем хранения горючих газов).

Таким образом, можно сделать вывод об **актуальности** создания системы поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов на основе расчета максимальной продолжительности бездренажного хранения криогенных продуктов в режиме реального времени.

Цель исследования – снижение потерь криогенных продуктов при длительном хранении и транспортировке за счет информационной поддержки решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов.

Объектом исследования являются информационные системы, применяемые на промышленном производстве при эксплуатации оборудования для длительного хранения и транспортировки криогенных продуктов.

Предметом исследования являются модели, методы и средства информационной поддержки принятия решений при эксплуатации оборудования для длительного хранения и транспортировки криогенных продуктов.

Задачи исследования:

1. Создание системы поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов, позволяющей осуществлять динамический расчет времени бездренажного хранения криогенного продукта.

2. Разработка вычислительного алгоритма прогнозирования времени бездренажного хранения криогенных продуктов, учитывающего состояние тепловой защиты криогенного сосуда и переменные режимы его эксплуатации.

3. Разработка математического обеспечения мониторинга тепломассообменных процессов при длительном хранении и транспортировке криогенных продуктов, реализованного в виде программных модулей для расчета времени бездренажного хранения.

4. Тестирование программного обеспечения для расчета времени бездренажного хранения на основе эмпирических данных, полученных в процессе мультимодальных перевозок криогенных продуктов.

5. Анализ схемных решений в системах реконденсации паров криопродуктов с последующей практической реализацией системы долговременного хранения сжиженного природного газа.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы системного анализа, математическое моделирование процессов тепломассообмена между жидкостью и паром в закрытом сосуде, вычислительные методы расчета термодинамических свойств технических газов, вычислительный эксперимент в среде конечно-элементного анализа, энтропийно-статистический анализ, методы количественного сравнения расчетных и эмпирических данных.

Научная новизна полученных результатов определяется тем, что:

1) создано математическое обеспечение поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов, обеспечивающее корректный динамический расчет времени бездренажного хранения криогенного продукта с учетом ретроспективной информации о состоянии криогенного сосуда;

2) разработан алгоритм расчета времени хранения криогенного продукта, отличающийся возможностью учета состояния тепловой защиты оборудования, температуры окружающей среды и режимов эксплуатации криогенных сосудов;

3) синтезировано математическое обеспечение мониторинга тепломассообменных процессов при длительном хранении и транспортировке криогенных продуктов для расчета нестационарного температурного поля в криогенном сосуде и времени бездренажного хранения криогенных продуктов.

В диссертации получены научные результаты, **выносимые на защиту:**

1. Система поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов, включающая оригинальные программные модули, взаимодействующие с программным комплексом ANSYS Fluent, отличающаяся возможностью динамического расчета времени бездренажного хранения криогенных продуктов.

2. Вычислительный алгоритм прогнозирования времени бездренажного хранения криогенных продуктов для стационарных и транспортных криогенных сосудов, отличающийся возможностью учета состояния тепловой защиты оборудования, температуры окружающей среды и режимов эксплуатации криогенных сосудов.

3. Математическое обеспечение мониторинга тепломассообменных процессов при длительном хранении и транспортировке криогенных продуктов, обеспечивающее расчет нестационарного температурного поля в криогенном сосуде и времени бездренажного хранения криогенных продуктов.

Практическая значимость. Использование результатов исследования позволяет снизить трудоемкость разработки и повысить качество поддержки принятия решений при эксплуатации оборудования для длительного хранения и транспортировки криогенных продуктов за счет снижения объемов экспериментальных работ, необходимых для определения эксплуатационных характеристик криогенных сосудов.

Использование разработанной системы дистанционного мониторинга состояния криогенных сосудов позволяет на основе получаемых в режиме реального времени данных вычислять прогнозируемое время безопасного хранения продукта в криогенных сосудах любого типа с учетом особенностей их эксплуатации (патент на изобретение № 2714029 от 11.02.2020).

Результаты работы также следует использовать в процессе профессиональной подготовки, переподготовки и повышения квалификации специалистов по транспортной логистике технических газов.

Предложен рациональный вариант организации эффективной системы хранения в виде мультимодального контейнера с автономной системой реконденсации паров (патент на полезную модель № 188760 от 23.04.2019).

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью применяемых математических моделей процессов ТМО и вычислительных методов, а также удовлетворительным совпадением результатов расчетов с эмпирическими данными, а также с результатами исследований (в том числе экспериментальных), полученных другими авторами.

Результаты работы **реализованы** в АО «Линде Газ Рус», ЗАО «МХК «Регионхимснаб»» и в испытательном центре войсковой части 15650.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы представлены на: VII международной научной конференции «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство» (Казань, 2019), Всероссийской научной конференции «Инновационное развитие технологий производства СПГ» (Москва, 2019), II международной научно-практической конференции «Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса» (Санкт-Петербург, 2019), IX Всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» (Екатеринбург, 2019), 62-й Всероссийской научной конференции МФТИ (Долгопрудный, 2019), Всероссийской научно-технической конференции «Интеллектуальные и информационные системы (Интеллект-2019)» (Тула, 2019).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 15 научных работ, в том числе, 6 научных статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России (из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях по профилю специальности 05.13.01), 6 публикаций в сборниках трудов научных конференций, получены 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя. Все представленные в работе результаты исследования получены автором самостоятельно. Результаты других авторов, использованные при проведении исследования, содержат ссылки на соответствующие опубликованные источники.

Структура и объем диссертации. Работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы (107 наименований) и три приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность вопросов создания системы поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов, сформулированы цель и задачи исследования, охарактеризованы научная новизна, практическая значимость полученных результатов, их достоверность, приведены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ методов и средств информационной поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов. В п. 1.1 описаны проблемные вопросы обеспечения безопасного хранения криогенных продуктов на объектах малотоннажного производства и потребления. На основании результатов анализа среднесуточных потерь продукта в криогенных сосудах различной вместимости было предложено ограничиться в работе рассмотрением вопросов моделирования процессов теплообмена в сосудах объемом до 70 м³. В п. 1.2 представлена функциональная структура типовой системы мониторинга состояния криогенных сосудов (рис. 1). Описаны достоинства и недостатки современных информационных систем, использующихся при эксплуатации криогенных сосудов любого типа. Сделан вывод о целесообразности введения в структуру информационной системы расчета времени бездренажного хранения продукта на основании данных, полученных при моделировании процессов теплообмена между жидкостью и паром в криогенном сосуде.

В п. 1.3 рассмотрены подходы к определению времени бездренажного хранения криогенных продуктов для стационарных и транспортных криогенных сосудов. В п. 1.4 выполнен обзор режимов эксплуатации криогенных сосудов, проанализированы методы определения теплового потока к продукту через изоляцию, обозначены факторы, не учитываемые при применении на практике каждого из этих методов.

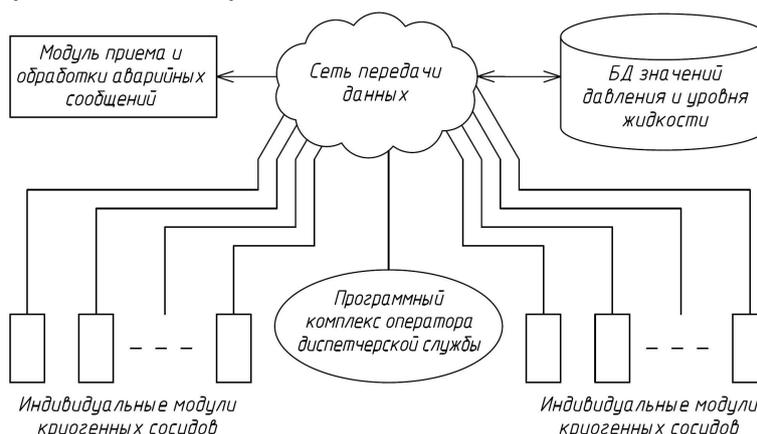


Рисунок 1. Функциональная структура типовой системы мониторинга состояния криогенных сосудов

В п. 1.5 выполнена формальная постановка задачи управления режимами хранения криопродукта.

Основной задачей при управлении режимами хранения криопродукта является достижение максимального времени бездренажного хранения τ_{xp} , обеспечиваемое регулированием с помощью запорной арматуры давления в газовой фазе p_2 , а также переключением на потребление продукта из газовой фазы, вместо потребления из жидкостной фазы, и наоборот (при наличии технической возможности), при заданном

максимальном рабочем давлении в сосуде p_{max} . Исходя из вышесказанного, в качестве критерия оптимальности целесообразно выбрать время бездренажного хранения криопродукта τ_{xp} . На основании сведений, изложенных в подразделах 1.2-1.4, имеет смысл рассматривать время бездренажного хранения как функцию следующих независимых параметров:

$$\tau_{xp} = f(p_g, p_{ж}, p_{вак}, T_0^u, A_{np}, f_{np}, A_n, f_n) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где p_g – давление в газовой фазе емкости, $p_{ж}$ – давление в жидкостной фазе емкости, $p_{вак}$ – давление в вакуумной полости, T_0^u – измеренное значение температуры окружающей среды, A_{np} , f_{np} – соответственно, амплитуда и частота продольных колебаний сосуда, A_n , f_n – соответственно, амплитуда и частота поперечных колебаний сосуда.

С целью снижения давления в сосуде должны быть предприняты действия по переходу на режим потребления продукта из газовой фазы (при наличии технической возможности), а также по безопасному сбросу избыточного давления в сосуде (см. рис. 2). Перечисленные действия могут быть выполнены оператором дистанционно при наличии удаленного доступа к системе управления запорной арматурой или по месту (в большинстве случаев) при помощи манипуляций с ручной запорной арматурой лицом, ответственным за эксплуатацию сосуда, после получения соответствующего сообщения от оператора.

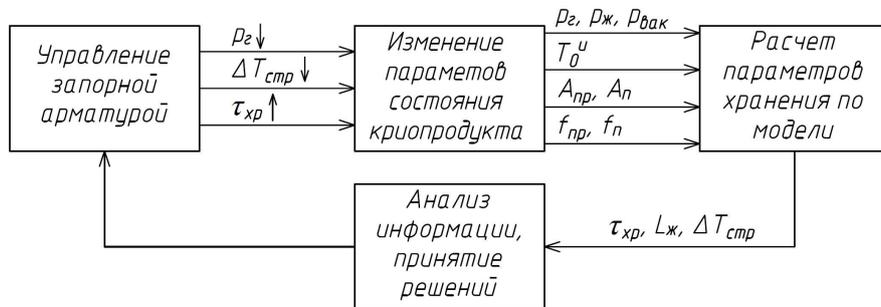


Рисунок 2. Схема управления режимами хранения криопродукта (p_g – давление в газовой фазе сосуда; $p_{ж}$ – давление в жидкостной фазе сосуда; $p_{вак}$ – давление в вакуумной полости, T_0^u – измеренное значение температуры окружающей среды, A_{np} , f_{np} – соответственно, амплитуда и частота продольных колебаний сосуда, A_n , f_n – соответственно, амплитуда и частота поперечных колебаний сосуда; τ_{xp} – время бездренажного хранения продукта; $\Delta T_{стр}$ – температурное расслоение; $L_{ж}$ – уровень жидкости в сосуде).

В тех случаях, когда критичным является значение температурного расслоения (при хранении СПГ в вертикальных резервуарах), вычисленное по результатам компьютерного моделирования, также принимаются меры по снижению температурного расслоения в сосуде (например, осуществляется принудительная циркуляция жидкости). Также после сообщения от оператора может быть установлен временный запрет на заправку сосуда продуктом до принятия мер по устранению температурного расслоения.

В п. 1.6 выполнена постановка задач исследования.

Вторая глава посвящена математическому моделированию процессов теплообмена с подвижной границей раздела фаз «жидкость-пар» в криогенном сосуде длительного хранения. В п. 2.1 представлена математическая модель для описания теплофизических и гидродинамических характеристик рассматриваемой сплошной среды в сосуде в виде системы следующих дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial \tau} = -(\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{u} + \vec{f}, \quad \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \lambda \Delta T, \quad \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0, \quad (2-4)$$

где \vec{u} – вектор скорости, τ – время, T – температура, ρ – плотность, c_p – теплоемкость, p – давление, ν – кинематическая вязкость, \vec{f} – вектор поля массовых сил, λ – коэффициент теплопроводности.

Соотношение (2) является векторным уравнением движения Навье-Стокса, уравнение (3) – уравнение энергии, которое включается в математическую модель для описания

переменного температурного поля. Соотношение (4) – уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости.

Система уравнений также дополняется граничными условиями, задающими значения параметров газа и жидкости на границах расчетной области. На стенках сосуда действует условие «прилипания»:

$$u = 0,$$

Также для границы расчетной области задаются условия теплообмена на стенках сосуда:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} &= \alpha_{cm} (\theta - T), \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} &= \alpha_{cm} (\theta - T), \end{aligned}$$

где α_{cm} – коэффициент теплоотдачи, θ – температура стенки, x , y – координаты, соответственно, горизонтальная и вертикальная.

Граничные условия на оси симметрии криогенного сосуда ($x=0$):

$$u = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

Условия в начальный момент времени ($\tau=0$):

$$u|_{\tau=0} = 0, \quad T|_{\tau=0} = T_{нач},$$

Среди способов решения системы уравнений выделен весьма перспективный в настоящее время метод осреднения уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу. С учетом соотношений декомпозиции (Я.А. Коркодинов, 2013) уравнение Рейнольдса запишется следующим образом:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \tau} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \rho \bar{g}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\sigma}_{ij} - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j), \quad (5)$$

где \bar{u}_i , \bar{u}_j – усредненные скорости, \bar{u}'_i , \bar{u}'_j – отклонения от средних значений, $\bar{\sigma}_{ij}$ – напряжения в жидкости. Для определения всех неизвестных параметров – скорости, давления и напряжений Рейнольдса – требуются дополнительные уравнения (проблема «замыкания турбулентности»). Для решения этого вопроса необходимо использовать различные модели турбулентности.

В п. 2.3 рассмотрены модели турбулентности, которые могут быть использованы для описания течений в замкнутом пространстве криогенного сосуда. В качестве расчетных зависимостей, позволяющих на практике наиболее точно учитывать процессы сжимаемости газа и естественной конвекции, предложено использовать двухпараметрические полуэмпирические модели «k-ε» и «RNG k-ε». В п. 2.4 описана общая схема моделирования процесса нестационарного нагрева парожидкостной смеси в криогенном сосуде на примере использования программного комплекса ANSYS Fluent.

Приведены типовые результаты расчетов температурного поля в сосуде со сжиженным природным газом (табл. 1), а также данные по изменению давления хранения СПГ с течением времени (табл. 2) при бездренажном хранении с начального давления 1,5 МПа до конечного (максимального) давления 1,8 МПа.

Из результатов моделирования следует, что расчетное (прогнозируемое) время бездренажного хранения продукта не превышает 121 час в момент времени, когда текущее измеренное значение давления в сосуде составляет 1,5 МПа, при текущей степени заполнения сосуда равной 80 %. Таким образом, разработанная математическая модель позволила рассчитать изменение давления хранения с течением времени и температурное поле в сосуде со сжиженным природным газом, причем переход при расчете от трехмерной к двумерной модели позволил существенно уменьшить объем вычислений.

Таблица 1. Результаты распределения температуры в паровом пространстве криогенного сосуда по высоте (y – вертикальная координата; T_s – температура паровой фазы)

y , м	T_s , К		
	Расчет по модели « k - ε »	Расчет по модели «RNG k - ε »	Эксперимент
0	111	111	111
0,125	116	115	115
0,250	119	118	118
0,375	123	121	120
0,500	140	137	131
0,625	162	159	144
0,750	179	174	162
0,875	227	218	206
1,000	264	256	243

Таблица 2. Результаты моделирования процесса теплообмена при бездренажном хранении СПГ с давления 1,5 МПа до давления 1,8 МПа

Давление в сосуде, МПа	Вертикальная координата свободной поверхности, м	Степень заполнения сосуда жидкостью, %	Время процесса, ч
1,50	0,000	80	0
1,55	0,016	80	26
1,60	0,033	80	53
1,65	0,065	81	76
1,70	0,076	81	95
1,75	0,094	82	112
1,80	0,132	83	121

Третья глава посвящена описанию работы информационной системы, содержащей в своей структуре вычислительный комплекс для расчета времени бездренажного хранения криогенных продуктов. В п. 3.1 представлена функциональная структура системы поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов (рис. 4). Исходной информацией при подготовке моделей являются геометрические параметры сосудов, данные о теплопритоках через изоляцию, а также теплофизические параметры реальных газов, рассчитанные по соответствующим пакетам термодинамических свойств.

В моделирующем программном комплексе конечно-элементного анализа ANSYS Fluent производится подготовка компьютерных моделей, описывающих процесс нестационарного нагрева содержимого криогенного сосуда. Последующая корректировка моделей проводится по данным верификационного модуля, осуществляющего компарирование температурных полей и значений давления в газовой фазе. По результатам моделирования производится накопление базы данных теплофизических параметров в виде значений давления хранения и нестационарных температурных полей в паровом пространстве внутреннего сосуда. Из этой информации по запросу от вычислительного модуля формируется массив данных давления и времени хранения, из элементов которого впоследствии и определяется искомая величина прогнозируемого времени бездренажного хранения.

На единый пульт диспетчерской службы аккумулируется информация со всего парка стационарных и транспортных сосудов, а именно: данные по давлению и уровню жидкого продукта в каждой емкости, техническое состояние теплоизоляции, реализуемый в конкретный момент времени режим хранения (стационарный или транспортный), прогнозируемое время до момента открытия предохранительных клапанов.

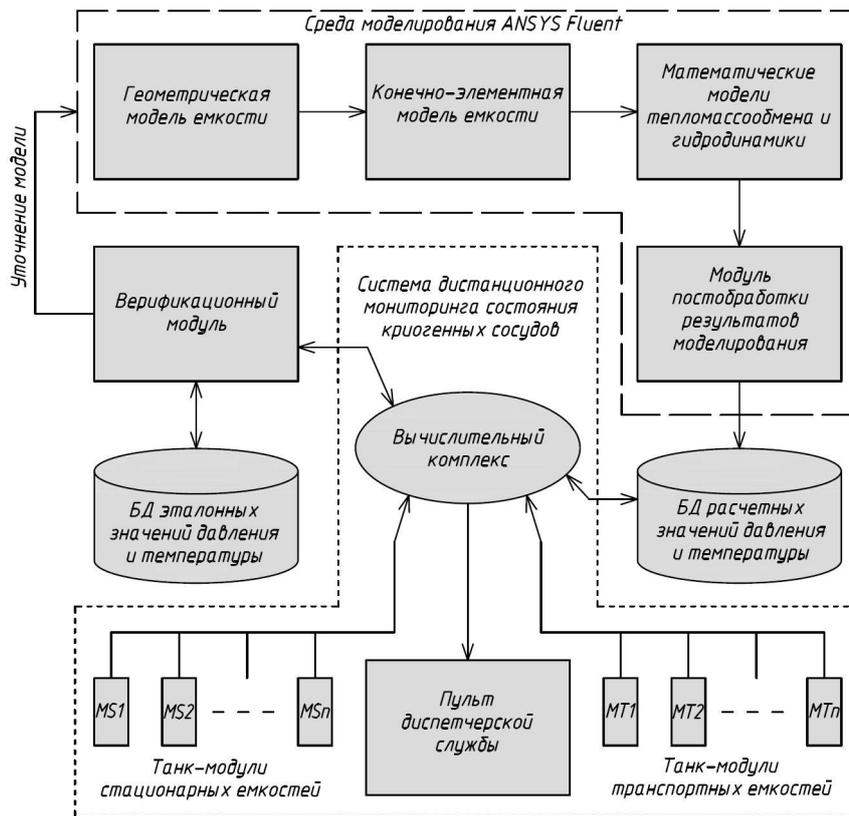


Рисунок 4. Функциональная структура системы поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов

В п. 3.2 представлено описание вычислительного алгоритма расчета времени бездренажного хранения криогенных продуктов (рис. 5). Танк-модуль аккумулирует информацию от датчиков давления, температуры, механических колебаний и осуществляет передачу данных по беспроводной сети на вычислительный комплекс, включающий ряд расчетных модулей.

Мгновенное значение уровня жидкости в сосуде вычисляется по формуле:

$$L_{ж} = \frac{P_{ж} - P_{г}}{\rho_{ж} \cdot g}, \quad (6)$$

где $p_{ж}$, $p_{г}$ – давление, соответственно, в жидкостной и паровой фазах, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения. После того как известен уровень, вычисляется площадь свободной поверхности жидкости F_f , согласно исходным данным по геометрическим характеристикам сосуда.

Далее производится проверка соответствия значения уровня жидкости заданному безопасному диапазону

$$L_{нкр} < L_{ж} < L_{вкр},$$

где $L_{нкр}$ и $L_{вкр}$ – соответственно, нижний и верхний критические уровни жидкости в сосуде, задаваемые согласно требованиям документации от изготовителя сосуда и с учетом условий эксплуатации.

Характерной особенностью используемого типа танк-модулей является возможность передавать данные от датчика уровня вакуума в межсосудной полости криогенного сосуда. С учетом полученного от датчика мгновенного значения давления вакуума $p_{вак}$ расчет дополнительного теплового потока за счет газа в межсосудном пространстве производится по формуле (А.М.Архаров, 1999):

$$Q_{газ} = \alpha \left(\frac{k+1}{k-1} \right) \frac{18,2 p_{вак} (T_0^u - T_x) F_x}{\sqrt{MT_0}}, \quad (7)$$

где α – коэффициент аккомодации, учитывающий неполноту обмена энергией между молекулами и поверхностью, k – показатель адиабаты, M – молекулярная масса вещества продукта. Тепловой поток через изоляцию $Q_{из}$ вычисляется по формуле:

$$Q_{из} = \frac{T_0^u - T_x}{T_0 - T_x} Q_{бд} + Q_{газ}, \quad (8)$$

где $Q_{бд}$ – нормальный тепловой поток через изоляцию для рассматриваемой емкости, $T_0=293$ К – нормальная температура окружающей среды. Затем переменной $Q_{из}$ присваивается значение ближайшего к ней по величине элемента Q'_k из массива данных тепловых потоков, использовавшихся в конечно-элементном анализе процессов теплообмена при заполнении базы данных температурных полей и давлений.

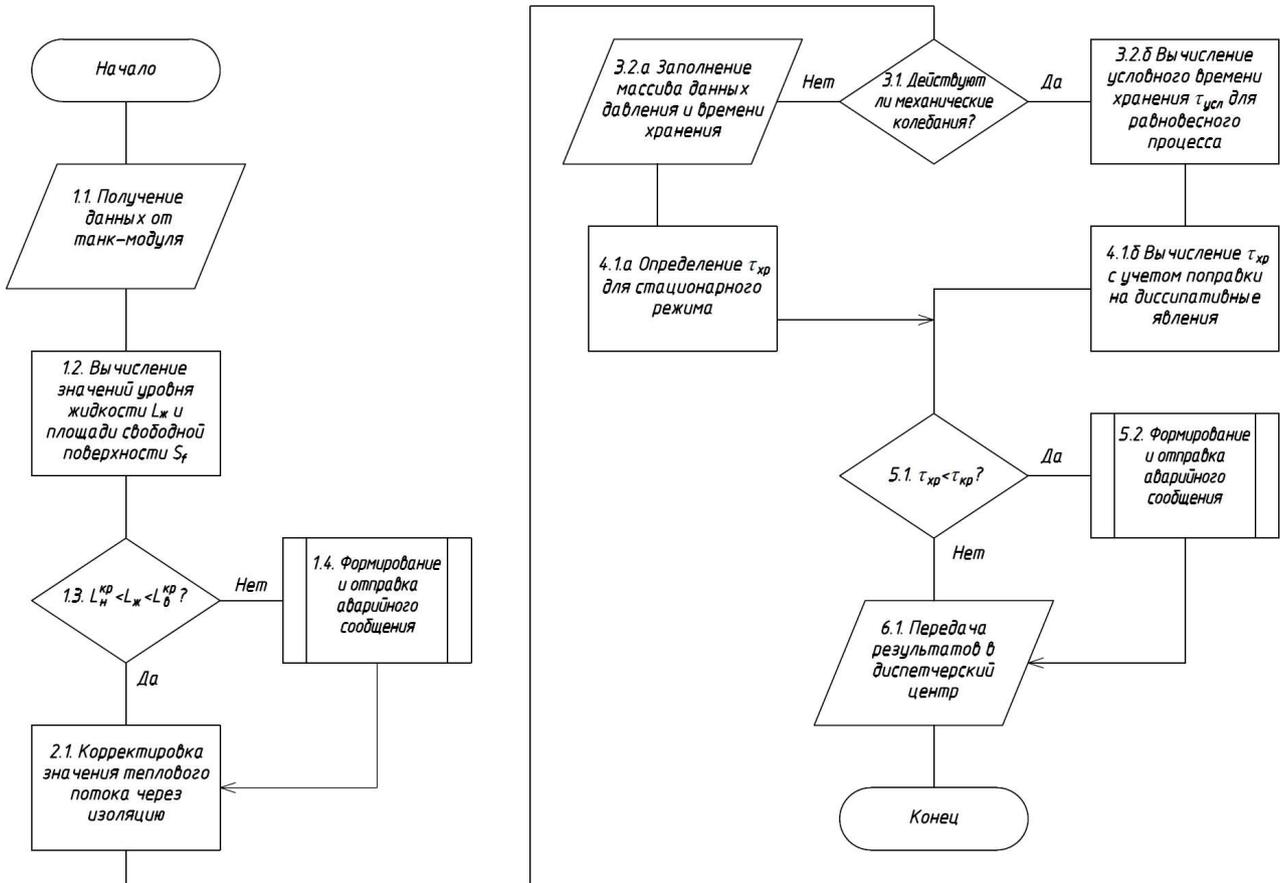


Рисунок 5. Алгоритм расчета времени бездренажного хранения криогенных продуктов

Танк-модуль также передает информацию от датчиков механических колебаний, установленных на транспортном сосуде. При отсутствии вынужденных и параметрических колебаний (равно как и при отсутствии на емкости соответствующих датчиков) дальнейший расчет ведется для стационарного режима.

В этом случае в вычислительный модуль загружается массив данных времени $\tau_{xp,i}$ и давления хранения $p_{xp,j}$, соответствующих рассчитанному ранее тепловому потоку. Из массива выбирается наибольший элемент, удовлетворяющий условию

$$p_{xp,j} < p_{max},$$

где p_{max} – заданное максимальное разрешенное давление в сосуде. Соответствующее выбранному элементу значение $\tau_{xp,i}$ является искомым прогнозируемым временем хранения. Степень дискретизации значений давления в сосуде составляет 0,05 МПа.

В случае если полученная величина τ_{xp} оказывается меньше заданного значения критического давления $\tau_{кр}$, системой производится формирование и отправка аварийного сообщения на пульт диспетчерской службы.

В п. 3.3 представлено описание разработанной системы дистанционного мониторинга состояния криогенных сосудов с возможностью определять (прогнозировать) время бездренажного хранения криогенного продукта.

Функциональная схема информационной системы показана на рис. 6, на котором обозначены: 1 – датчик дифференциального давления; 2 – датчик давления газовой фазы; 3 – датчик давления вакуума в теплоизоляционной полости; 4 – датчик температуры окружающей среды; 5 – датчик механических колебаний (опция для транспортных сосудов); 6 – модуль беспроводной передачи данных; 7 – модуль определения времени хранения криопродукта; 8 – блок хранения характеристик теплофизических свойств жидкости и газа; 9 – приемно-передающий блок.

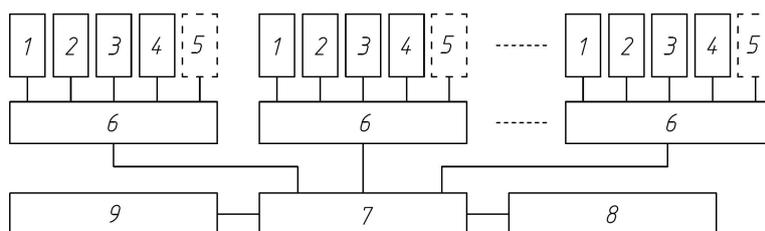


Рисунок 6. Информационная система дистанционного мониторинга состояния криогенных сосудов

Система генерирует сообщения о состоянии сосуда, которые поступают в приемно-передающий блок, откуда данные о состоянии криогенного сосуда направляются персоналу, ответственному за дистанционный контроль состояния криогенных сосудов. По результатам анализа информационной картины (рис. 7) оператором, ответственным за дистанционный контроль состояния криогенных сосудов, могут быть приняты решения о:

- направлении сообщения в службу логистики технических газов о необходимости заправки сосуда (при снижении уровня жидкости ниже 30 %, если сосуд используется в режиме стационарного хранилища);
- информировании лица, ответственного за исправное состояние и безопасную эксплуатацию сосуда, при смене статуса с «ОК» на «ВНИМАНИЕ» (статус изменяется в том случае, если значение времени хранения становится меньше или равно 24 ч);

ИСО-контейнер № 934671 Статус: ОК
 Продукт: СПГ
 Режим: стац.
 Время хранения: 132 ч

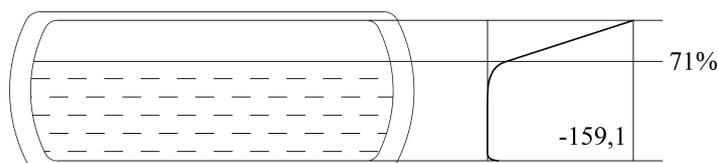


Рисунок 7. Пример вывода данных о состоянии криогенного сосуда на дисплей оператора диспетчерской службы.

- немедленном информировании лица, ответственного за исправное состояние и безопасную эксплуатацию сосуда, при смене статуса на «ОПАСНО» (статус изменяется, например, при достижении текущего давления в сосуде значения $0,98p_m$ (где p_m – максимально допустимое рабочее давление в сосуде), или в том случае, если значение времени хранения становится меньше или равно 2 ч);

- немедленном информировании лица, ответственного за исправное состояние и безопасную эксплуатацию сосуда, и специальных служб (при необходимости) в случае получения аварийного сообщения (значение давления в сосуде превышает $1,15p_m$, отсутствие вакуума в теплоизоляционной полости, значение уровня жидкости превышает 98 % и пр.).

Четвертая глава посвящена анализу схемных решений в системах реконденсации паров криогенных продуктов. В п. 4.1 представлены результаты моделирования систем

реконденсации паров на базе циклов с дросселированием. Приведены данные оценки степени термодинамического совершенства установок для реконденсации паров криопродуктов с различными вариантами реализации цикла охлаждения на примере оборудования для сжиженного природного газа: обратный цикл Стирлинга – 0,132, рефрижераторный цикл простого дросселирования – 0,196, рефрижераторный цикл с предварительным охлаждением – 0,344, цикл с многопоточным ТОА на смесевом хладагенте – 0,362.

В п. 4.2 представлены результаты расчета распределения затрат работы (электроэнергии) для компенсации потерь по элементам установок на базе циклов с дросселированием. Также приведены результаты расчетов удельных затрат электроэнергии в циклах охлаждения для различных уровней давления хранения в сосуде (рис. 8), имеющие важное практическое значение для принятия решений при промышленной реализации криогенных сосудов, оборудованных системой реконденсации паров. В п. 4.3 проведен анализ безмашинных способов получения увеличения продолжительности бездренажного хранения криопродуктов в криогенных сосудах.

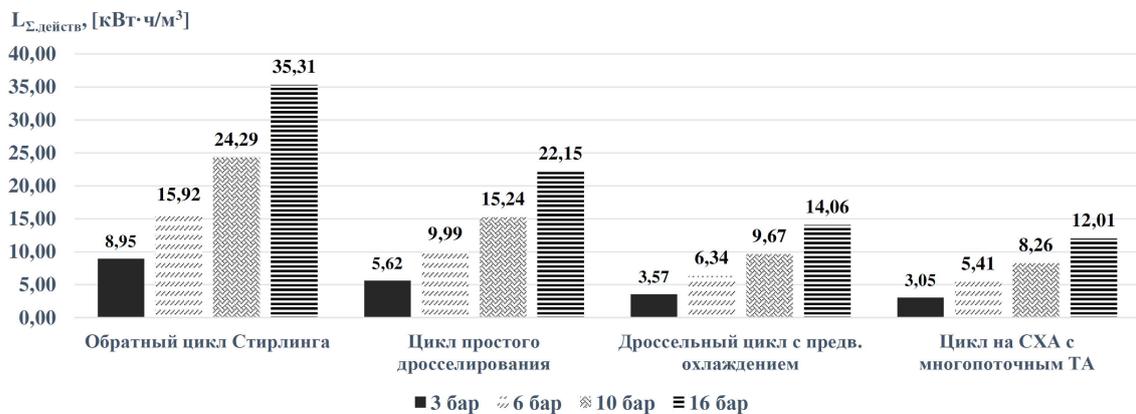


Рисунок 8. Удельные затраты электроэнергии в циклах охлаждения при различных уровнях давления хранения

Пятая глава посвящена исследованию эффективности применения системы поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов.

В п. 5.1 приведена структурная схема, показывающая взаимосвязь программных комплексов для решения задач моделирования термодинамических процессов и мониторинга тепловых параметров криогенного оборудования различного типа (рис. 9).

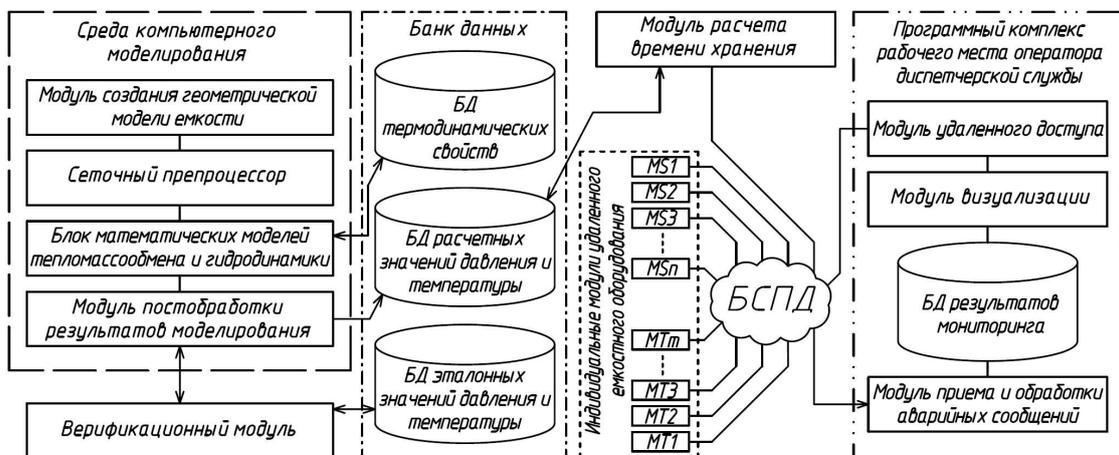


Рисунок 9. Структура программного обеспечения для моделирования и мониторинга процессов при длительном хранении криопродуктов в резервуарах и танк-контейнерах (БСПД – беспроводная сеть передачи данных, MS1, MS2, ... MSn – модули, установленные на криогенных резервуарах, MT1, MT2, ... MTm – модули, установленные на танк-контейнерах).

Для анализа соответствия друг другу расчетных и паспортных значений времени бездренажного хранения были исследованы опытные данные по смешанным перевозкам криопродуктов в мультимодальных контейнерах (табл. 3). Для сравнения бралось общее время транспортировки в наиболее сложных условиях: смешанная перевозка автомобильным и морским транспортом, с учетом стационарного хранения в течение нескольких дней в порту и в пункте назначения. Расчетные и эмпирические значения времени хранения продукта оказываются ниже теоретических значений, указываемых в технической документации на сосуды, вплоть до различий в 1,5 раза. При этом расчетные значения в среднем отличаются от опытных не более чем на 3...5 %. Это обуславливает целесообразность прогнозирования продолжительности безопасного хранения на основе результатов расчетов.

Таблица 3. Параметры долговременного хранения инертных и горючих криопродуктов в мультимодальном 40-футовом танк-контейнере

Давление хранения	Продукт	Начальная степень заполнения сосуда	Продолжительность бездренажного хранения, дней			$\Delta\tau_1$, %	$\Delta\tau_2$, %
			Расчетные значения	Опытные данные	Паспортные значения		
0,7 МПа	Азот	64 %	32	31	45	31,1	3,1
	Аргон	37 %	29	30	53	43,4	3,3
	Этилен	85 %	103	111	129	13,9	7,2
	СПГ	85 %	49	47	74	36,5	4,1
1,0 МПа	Азот	64 %	28	29	62	53,2	3,4
	Аргон	37 %	45	45	71	36,6	0,0
	Этилен	85 %	134	135	174	22,4	0,7
	СПГ	85 %	74	75	95	21,1	1,3

Примечание: $\Delta\tau_1$ – различие между паспортным и опытным значениями времени хранения; $\Delta\tau_2$ – различие между расчетным и опытным значениями времени хранения.

В п. 5.2 приведено описание системы долговременного хранения сжиженного природного газа в виде мультимодального танк-контейнера с автономной установкой реконденсации паров. Отличительной особенностью рассматриваемого контейнера является наличие закрепленных в верхней части корпуса поликристаллических солнечных панелей, осуществляющих зарядку основной и резервной аккумуляторных батарей, и обеспечивающих, таким образом, полную автономность системы. Удельная электрическая мощность панелей составляет не менее 140 Вт на 1 м² площади. За счет наличия холодильной машины и системы автономного электропитания, в рассматриваемом танк-контейнере отсутствуют ограничения по времени хранения СПГ.

В п. 5.3 определены возможные применения результатов исследования в других предметных областях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена **научная задача** разработки системы поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов, имеющая существенное значение для развития производства и потребления технических газов.

По результатам исследования сделаны следующие **выводы**:

1. Анализ потребностей эффективной и безопасной эксплуатации криогенных сосудов показал необходимость разработки системы поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов, обеспечивающей информационную поддержку специалистов по эксплуатации криогенных сосудов для повышения безопасности и снижения потерь криогенных продуктов при длительном хранении и транспортировке.

2. Разработана система поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации криогенных сосудов объемом до 70 м³, отличающаяся от ранее известных

возможностью динамического расчета времени бездренажного хранения криогенного продукта с учетом ретроспективной информации о процессе хранения.

3. Вычислительный алгоритм прогнозирования времени бездренажного хранения криогенных продуктов, учитывающий режимы эксплуатации криогенных сосудов и состояние их тепловой защиты, впервые обеспечивает возможность вычисления времени бездренажного хранения криогенного продукта в режиме реального времени для стационарных и транспортных криогенных сосудов.

4. Программное обеспечение моделирования и мониторинга процессов теплообмена при длительном хранении и транспортировке криогенных продуктов обеспечивает информационную поддержку диспетчерских служб о состоянии сосуда в реальном времени в любых, в том числе, в аварийных режимах его эксплуатации, что позволяет снизить потери криогенных продуктов в сосудах объемом до 70 м³ при длительном хранении и транспортировке на 4...7 %.

5. Тестирование программного обеспечения расчета времени хранения криогенного продукта в криогенном сосуде на основе эмпирических данных, полученных в процессе мультимодальных перевозок криогенных продуктов, показало отличие расчетных данных от эмпирических значений не более, чем на 5 %, при этом отличие эмпирических значений от паспортных данных составляет 20...50 %.

6. В результате анализа схемных решений в системах реконденсации паров сжиженного природного газа установлено, что: наибольшие затраты электроэнергии на компенсацию тепловых потерь приходятся на компрессор (37...40 %) и дроссель (17...27 %), ориентировочные удельные затраты электроэнергии на реконденсацию 1 м³ парового пространства составляют 3...9 кВт·ч/м³ при низком (0,3 МПа) и 12...35 кВт·ч/м³ при высоком (1,6 МПа) давлении в криогенном сосуде, что имеет важное значение для поддержки принятия решений при управлении режимами эксплуатации и проектировании криогенных сосудов, оборудованных системой реконденсации паров.

7. Результаты исследования являются универсальными и могут быть эффективно использованы в других предметных областях, в частности, для исследования теплообменных процессов при стерилизации жидкостей или при термической обработке продуктов питания, а разработанное программное обеспечение следует использовать для поддержки принятия решений при организации логистических процессов в смежных прикладных областях, где ключевое значение имеет прогнозирование состояния транспортных сосудов, работающих под избыточным давлением, в режиме реального времени.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по научной специальности диссертации

1. Солдатов Е.С. Анализ схемных решений в системах реконденсации паров сжиженного природного газа для транспортных и стационарных резервуаров длительного хранения / Е.С. Солдатов, И.А. Архаров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 2. С. 263–276.

2. Солдатов Е.С. Вычислительный алгоритм прогнозирования времени бездренажного хранения криопродуктов в стационарных и транспортных сосудах / Е.С. Солдатов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2019. Т. 46, № 3. С. 485–495.

3. Солдатов Е.С. Моделирование процессов теплообмена в криогенном резервуаре длительного хранения сжиженного природного газа / Е.С. Солдатов // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2019. Т. 46, № 1. С. 92–98.

4. Солдатов Е.С. Программное обеспечение моделирования и мониторинга процессов в резервуарах и цистернах при длительном хранении криогенных продуктов / Е.С. Солдатов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. №10. С. 385–393.

**Статьи в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России
по другим научным специальностям**

5. Солдатов Е.С. Анализ термодинамической эффективности установок реконденсации паров сжиженного природного газа / Е.С. Солдатов, И.А. Архаров // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 7. С. 300–303.

6. Солдатов Е.С. Численное исследование нестационарного тепломассообмена в криогенном резервуаре долговременного хранения с подвижной границей раздела фаз / Е.С. Солдатов // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Т. 5. № 2. С. 148–159.

Результаты интеллектуальной деятельности

7. Солдатов Е.С. Автоматизированная система расчета температурного поля в мультимодальном танк-контейнере для сжиженного природного газа: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017660743; правообладатель – Солдатов Е.С. заявл. 02.08.2017; опубл. 25.09.2017.

8. Солдатов Е.С. Мультимодальный контейнер для хранения и транспортировки сжиженных криогенных газов с автономной системой реконденсации паров: патент на полезную модель № 188760; патентообладатель – Солдатов Е.С. заявл. 09.11.2018; опубл. 23.04.2019.

9. Солдатов Е.С. Система дистанционного мониторинга состояния криогенных сосудов: патент на изобретение № 2714029; патентообладатель – Солдатов Е.С. заявл. 24.06.2019; опубл. 11.02.2020.

Публикации в сборниках трудов научных конференций

10. Солдатов Е.С. Имитационное моделирование процессов теплообмена в стационарных и транспортных сосудах с криопродуктами / Е.С. Солдатов // Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019). Труды конференции, 16–18 октября 2019 г., Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т., 2019. С. 530–535.

11. Солдатов Е.С. Математическое моделирование нестационарного тепломассообмена в криогенном резервуаре / Е.С. Солдатов // Труды 62-й Всероссийской научной конференции МФТИ. 18-24 ноября 2019 года. М.: МФТИ, 2019. С. 243–244.

12. Солдатов Е.С. Моделирование и мониторинг тепломассообменных процессов при долговременном хранении сжиженного природного газа на объектах малотоннажного производства / Е.С. Солдатов // Инновационное развитие технологий производства СПГ. Сборник статей всероссийской научной конференции. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2019. С. 55–59.

13. Солдатов Е.С. Моделирование нестационарного тепломассообмена с подвижной границей раздела фаз при хранении и транспортировке криотоплива в закрытом сосуде / Е.С. Солдатов // Модернизация и инновационное развитие топливно-энергетического комплекса: материалы международной научно-практической конференции. – С-Пб: СПбФ НИЦ МС 2019. № 2. С. 34–37.

14. Солдатов Е.С. Программный комплекс поддержки принятия решений при эксплуатации современных систем хранения криопродуктов / Е.С. Солдатов // Интеллектуальные и информационные системы: труды Всероссийской научно-технической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. С. 101–109.

15. Солдатов Е.С. Численное исследование температурной стратификации в танк-контейнере для хранения и транспортировки сжиженного природного газа / Е.С. Солдатов // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей седьмой международной научной конференции. М.: Конверт, 2019. С. 36–38.

Подписано в печать 16.07.2020.

Формат бумаги 70×100^{1/16}. Бумага офсетная. Усл. печ.л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 987655

Отпечатано в ООО «Реглет»: 117638, Москва, Нахимовский проспект д. 6, стр. 2