

На правах рукописи

УДК 621.59:661.91

Клеблеев Тимур Ильдарович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ
КРИОГЕННЫХ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ
СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Специальность 2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва 2024

Работа выполнена на кафедре холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (национальном исследовательском университете)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук,
доцент
МГТУ им. Н.Э. Баумана
В.Ю. Семенов

Официальные
оппоненты: доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Оборудование
нефтегазопереработки» ФГАОУ ВУ «РГУ нефти
и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»
Фёдорова Елена Борисовна

кандидат технических наук,
заместитель начальника Отдела разработки
специального программного обеспечения и
математического моделирования Управления по
реализации стратегических проектов
ПАО «Газпром автоматизация»
Медведков Илья Сергеевич

Ведущая организация: АО «Криогенмаш»

Защита состоится «20» ноября 2024 года в 16:30 на заседании
Диссертационного совета 24.2.331.22 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение»,
3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем
кондиционирования и жизнеобеспечения.

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.
Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать
по указанному адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5, стр.1.
Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.22.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.22
кандидат физико-математических наук

А.А. Протопопов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Отрасль сжиженного природного газа (СПГ) в России в последние годы стала самостоятельной и важной частью газовой отрасли. Получили развитие все сегменты отрасли, включая малотоннажные проекты, ориентирующиеся на внутренний рынок и отдельные экспортные ниши. Использование сжиженного природного газа в качестве моторного топлива, может стать важнейшим фактором успеха развития отрасли малотоннажного СПГ. Использование природного газа в качестве энергоносителя и моторного топлива также выступает в качестве одного из элементов повышения уровня экологического благосостояния в регионах Российской Федерации.

Развитие инфраструктуры для использования малотоннажного СПГ в качестве газомоторного топлива и для автономной газификации в значительной мере сдерживается из-за требований пожаробезопасности, которые обусловлены возможными последствиями от воспламенения СПГ в случае его пролива. К таким требованиям относятся создание систем противопожарного водоснабжения для орошения и защиты оборудования, что влечет за собой необходимость устройства скважины, водопровода, пожарного бассейна с подогревом воды, противопожарного оборудования и т.д. Кроме того, необходимость больших противопожарных разрывов увеличивает стоимость земли под объекты и ограничивает возможность размещения криогенных заправочных станций вблизи населенных пунктов.

Для объектов малотоннажного СПГ стоимость противопожарных мероприятий может превышать стоимость технологического оборудования.

Следует отметить, что в нормативных документах предусмотрена возможность снизить стоимость противопожарных мероприятий и уменьшить противопожарные разрывы, если полностью исключить пролив жидкости наружу, например, с использованием двухоболочечных резервуаров (оснащенных термоизоляционным кожухом, предназначенным для обеспечения вакуумной изоляции и обеспечивающим при разгерметизации рабочего (внутреннего) сосуда удержание в межстенном пространстве жидкой фазы СПГ и контролируемый сброс паров СПГ в атмосферу).

Однако, до настоящего времени не выпущено ни одного нормативного документа, регламентирующего требования к конструкции, расчету и изготовлению таких резервуаров, не изучены в полной мере процессы, происходящие в двухоболочечном резервуаре при разгерметизации внутреннего сосуда и не разработаны рекомендации для проектирования таких резервуаров.

Проведенный обзор литературных источников показал, что, несмотря на обширные исследования теплофизических и теплогидравлических процессов в криогенном емкостном оборудовании, переходные процессы при нарушении герметичности внутреннего сосуда криогенного резервуара и истечении жидкости в межстенное пространство не рассматривались, научных трудов по данной тематике не найдено. В тоже время, опыт, накопленный при исследовании нестационарных процессов в криогенике, в теплотехнике, в термодинамике может быть использован при решении этой задачи.

На основании вышеперечисленного был сделан вывод о том, что исследования аварийных режимов в криогенных резервуарах при хранении и транспортировании СПГ, включая разработку физико-математической модели развития аварийного процесса, являются актуальными задачами, поскольку результаты исследований заложат основу для разработки и проектирования двухоболочечных резервуаров, применение которых может существенно снизить стоимость реализации проектов малотоннажного СПГ и повысить их безопасность.

Объект исследования - криогенный двухоболочечный резервуар для хранения СПГ.

Предмет исследований – аварийный режим в криогенном двухоболочечном резервуаре при нарушении герметичности внутреннего сосуда и истечении жидкости в изоляционное пространство

Цель работы

Разработать и обосновать физико-математическую модель переходного процесса в криогенном двухоболочечном резервуаре при нарушении герметичности внутреннего сосуда и истечении жидкости в изоляционное пространство

Основные задачи

1. Разработать сценарии и физико-математическую модель развития аварийного процесса в криогенном резервуаре при нарушении герметичности внутреннего сосуда.
2. Экспериментально подтвердить достоверность предложенной физико-математической модели аварийного процесса и работоспособность двухоболочечного резервуара с перепускным предохранительным устройством.
3. Провести численное моделирование аварийных режимов и разработать основы расчета двухоболочечного резервуара с перепускным предохранительным устройством.
4. Оценить перспективы применения криогенных двухоболочечных резервуаров для хранения малотоннажного СПГ

Научная новизна

1. Впервые разработана и экспериментально подтверждена физико-математическая модель переходного процесса в криогенном двухоболочечном резервуаре, позволяющая определять изменения давлений в сосуде и в межстенном пространстве резервуара при нарушении герметичности внутреннего сосуда и истечении жидкости в межстенное пространство
2. Впервые получены экспериментальные данные по развитию аварийного процесса в двухоболочечном криогенном резервуаре с различными типами изоляций

Практическая значимость

1. Обосновано применение и показана работоспособность двухоболочечного резервуара с перепускным предохранительным устройством в аварийных режимах.

2. Разработаны основы расчета двухоболочечных криогенных резервуаров с перепускным предохранительным устройством, применение которых позволяет на порядок сократить стоимость противопожарных мероприятий на объектах малотоннажного СПГ.
3. Определена возможная область применения двухоболочечных резервуаров с перепускным трубопроводом

Внедрение результатов работы Результаты работы внедряются в АО «НПП Криосервис» при разработке емкостного оборудования, а также будут использованы при разработке нормативной документации.

Степень достоверности полученных автором результатов

Физико-математическая модель аварийного процесса, предложенная автором, базируется на фундаментальных законах и уравнениях термодинамики открытых систем и теплообмена и подтверждается результатами испытаний, проведенных в условиях, приближенных к реальным

Положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математическая модель и сценарии развития аварийного режима в криогенном двухоболочечном резервуаре.
2. Результаты испытаний промышленного макета двухоболочечного резервуара с вакуумной изоляцией на жидком азоте и с вакуумно-порошковой изоляцией на СПГ.
3. Результаты численного моделирования процесса аварийного режима в криогенном двухоболочечном резервуаре и основы методики расчета двухоболочечного резервуара.

Апробация работы

Основные результаты работы диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. На третьей международной научно-практической конференции: «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), (Москва, 2020).
2. На 8-ом ежегодном международном конгрессе СПГ (круглый стол: Промышленная и пожарная безопасность), (Москва, 2022).
3. На международной научно-практической конференции «Применение низких температур в науке и промышленности», - Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), (Москва, 2022).

Личный вклад автора

Разработана физико-математическая модель и проведено численное моделирование развития аварийного процесса в криогенном резервуаре при нарушении герметичности внутреннего сосуда.

Разработана методика эксперимента, спроектирован макет двухоболочечного резервуара, проведены эксперименты на жидком азоте и СПГ, обработаны результаты экспериментов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы из 119 наименований, трёх приложений и содержит 125 страниц основного текста, 35 рисунков, 7 таблиц.

Соответствие паспорту специальности

В работе исследуется теплофизический процесс в новом типе криогенного емкостного оборудования. Тема работы полностью соответствует п.1 паспорта специальности 2.4.8 Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассматриваются особенности хранения и транспортирования крупно – и малотоннажного СПГ, включая обзор аварийных ситуаций и меры по обеспечению пожарной безопасности, в том числе путем использования двухоболочечных резервуаров для хранения малотоннажного СПГ. Также проведен анализ научных публикаций, посвященных моделированию теплофизических процессов в криогенных резервуарах.

В настоящее время наряду с крупнотоннажным производством СПГ развивается малотоннажное производство, направленное на использование СПГ в качестве моторного топлива и автономного газоснабжения. Объем емкостного оборудования для хранения СПГ при малотоннажном производстве составляет 5...200м³, объем криогенных заправщиков (автоцистерн) – 10...50м³. Для хранения и транспортирования малотоннажного СПГ применяются криогенные неизотермические двустенные резервуары с вакуумно-порошковой или вакуумно-многослойной изоляцией, полностью аналогичные емкостному оборудованию для жидкого кислорода, азота, аргона. Рабочее давление при хранении СПГ, как правило, равно 0,5 – 0,8 МПа (изб.), температура жидкости 111 – 145К, емкость резервуаров 5-200м³.

В главе дается классификация аварийных ситуаций, возникающих при хранении СПГ, рассматриваются причины и вероятности их появления. Рассматриваются способы их предупреждения и минимизации негативных последствий.

Основной проблемой применения обычных криогенных резервуаров для хранения СПГ (Рисунок 1) является то, что при их эксплуатации возможен пролив жидкости наружу через мембрану на кожухе при нарушении герметичности внутреннего сосуда или коммуникаций в изоляционном пространстве.

Если при хранении жидкого кислорода или азота выброс жидкости наружу является инцидентом, то при проливе СПГ возникает аварийная ситуация при которой возможно воспламенение жидкости или паровоздушной смеси. Чтобы избежать последствий воспламенения на объектах производства и хранения малотоннажного СПГ (по аналогии с крупнотоннажным СПГ) ограничивают возможную площадь пролива СПГ (поддоны, обваловки), предусматривают орошение емкостного оборудования для его охлаждения при пожаре и наличие средств пожаротушения.

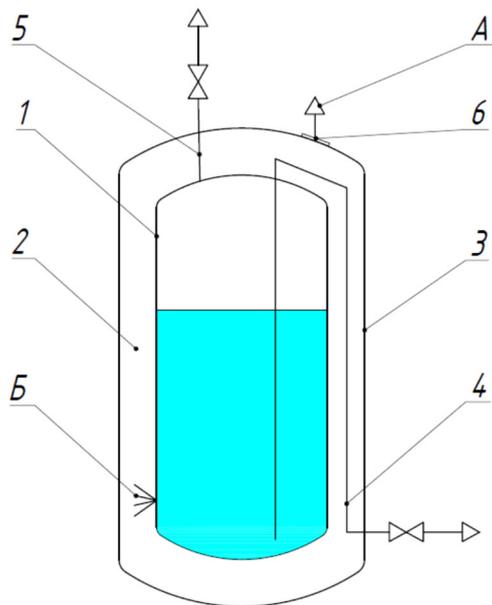


Рисунок 1. Схема обычного криогенного резервуара.

1 - внутренний сосуд;
2 - межстенное пространство;
3 - наружный кожух;
4 - трубопровод слива-налива;
5 - трубопровод газосброса;
6 – мембранное

предохранительное устройство на кожухе.

А - сброс газа из межстенного пространства через разрывную мембрану;

Б - течь в стенке внутреннего сосуда.

Кроме того, предусматриваются противопожарные разрывы, чтобы ограничить возможность разрушения технологического оборудования, инфраструктуры, селитебной зоны. Если для крупнотоннажного СПГ стоимость противопожарных мероприятий составляет несколько процентов, то для малотоннажного СПГ эта величина соизмерима со стоимостью технологического оборудования, а необходимость противопожарных разрывов существенно увеличивает площадь для объектов производства и потребления малотоннажного СПГ.

Одним из путей снижения стоимости противопожарных мероприятий является применение двухоболочечных резервуаров, конструкция которых исключает пролив СПГ наружу при нарушении герметичности внутреннего сосуда. Одной из перспективных технологических схем является двухоболочечный резервуар с перепускным трубопроводом (Патент на изобретение № 2653611 РФ F17C 3/00 «Резервуар для хранения криогенной жидкости» Горбачев С.П., Карпов В.Л., 2008), у которого межстенное пространство через разрывную мембрану соединяется с паровым пространством внутреннего сосуда (Рисунок 2).

При разгерметизации внутреннего сосуда двухоболочечного резервуара жидкость выливается в межстенное пространство, частично испаряется от внешнего теплопритока, давление в межстенном пространстве возрастает пока не сравняется с давлением во внутреннем сосуде (первый период). При этом раскрывается мембрана на перепускном трубопроводе и далее давления в сосуде и в межстенном пространстве растут одновременно, пока не достигнут рабочего давления (второй период) и не откроются предохранительные устройства пар из сосуда и из межстенного пространства сбрасывается в атмосферу (третий период). Исключить разрушение внутреннего сосуда из-за превышения давления в межстенном пространстве над давлением в сосуде возможно за счет правильного выбора пропускной способности перепускного трубопровода, для чего необходимо знать изменение давлений в сосуде и в межстенном пространстве резервуара.

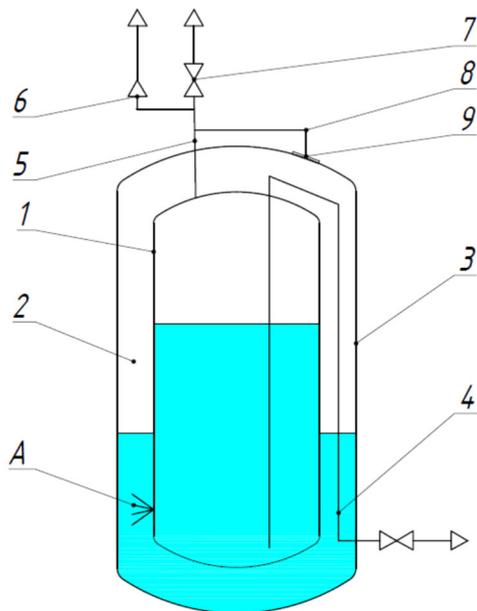


Рисунок 2. Технологическая схема двухоболочечного криогенного резервуара с перепускным предохранительным устройством .

- А - течь в стенке внутреннего сосуда;
 1 - внутренний сосуд;
 2 - межстенное пространство;
 3 - наружный кожух;
 4 - трубопровод слива-налива;
 5 - трубопровод газосброса;
 6 – предохранительный клапан сосуда;
 7 – клапан газосброса;
 8 – перепускной трубопровод;
 9 – предохранительная мембрана перепускного трубопровода.

В конце главы формулируются цели и основные задачи работы.

В главе 2 рассматривается физико-математическая модель аварийного процесса в криогенном двухоболочечном резервуаре. При расчете аварийного процесса криогенный резервуар представим, как термодинамическую систему, состоящую из двух сообщающихся камер (Рисунок 3).

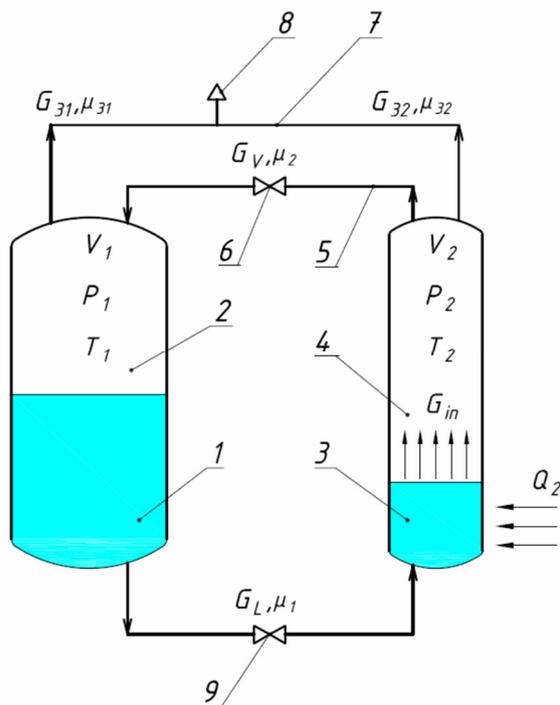


Рисунок 3. Расчетная схема двухоболочечного резервуара.

- 1 – внутренний сосуд; 2 - паровое пространство внутреннего сосуда резервуара;
 3– межстенное пространство резервуара; 4 - объем межстенного пространства, заполненного паром; 5 - перепускной трубопровод; 6 – перепускная мембрана; 7 – дренажный трубопровод; 8 – предохранительная мембрана; 9– негерметичность внутреннего сосуда;
 V_1, P_1, T_1 – объем, давление, температура в паровом пространстве внутреннего сосуда; V_2, P_2, T_2 - объем, давление, температура в паровом пространстве внутреннего сосуда и в

паровом объеме межстенного пространства; G_v – расход пара через перепускной трубопровод; G_L - расход жидкости через негерметичность; G_{in} – массовая скорость испарения жидкости в межстенном пространстве; G_{31} и G_{32} –расходы пара через дренажные коммуникации; Q_2 –теплоприток к жидкости в изоляционном пространстве, Вт; μ_1 – коэффициент расхода через негерметичность; μ_2 - коэффициент расхода через перепускной трубопровод; μ_{31}, μ_{32} - коэффициенты расхода через дренажные коммуникации.

Из обеих камер имеется общий вывод пара в окружающую среду через предохранительную мембрану 8. Камеры соединены между собой через диафрагму (негерметичность 9) и перепускным трубопроводом 5 с разрывной мембраной 6.

Основные допущения при постановке задачи

1. Как в сосуде, так и в межстенном пространстве пар и жидкость находятся в неравновесном состоянии (гетерогенная среда) и температура пара всегда выше равновесного значения. Это позволяет рассматривать паровые пространства в сосуде и в межстенном пространстве (Рисунок 3) как открытые термодинамические системы (обмен с внешней средой энергией и массой) с изменяемыми внешними границами из-за изменения уровня жидкости в сосуде и в межстенном пространстве;

2. Пар в сосуде и в межстенном пространстве рассматривается как идеальный газ.

3. Тепловые потоки к внутреннему сосуду и к паровому объему межстенного пространства отсутствуют. В частности, это предполагает, что температура жидкости в сосуде остается постоянной во время переходного процесса и равной начальному значению.

4. Предполагается, что в начале переходного процесса межстенное пространство заполнено только паром при давлении 0,1 МПа. Температура пара равна температуре жидкости во внутреннем сосуде.

При принятых допущениях изменения давления, как в паровом пространстве сосуда, так и в паровом объеме межстенного пространства можно описать уравнениями термодинамики открытых систем для однофазной среды [1].

$$\frac{V}{\eta} \frac{dP}{d\tau} = \mu P \frac{dV}{d\tau} + \sum (\mu P v - \Delta h) \frac{dM}{d\tau} \quad (1)$$

Для наших условий:

P – давление в сосуде и в межстенном пространстве во время переходного процесса;

M – масса пара во внутреннем сосуде или в межстенном пространстве,

$\frac{dV}{d\tau} = \frac{G_L}{\rho_L}$ – скорость изменения объема парового пространства внутреннего сосуда и межстенного пространства;

$\frac{dM}{d\tau} = G_v + G_{in} + G_{31} + G_{32}$ – скорость изменения массы пара в паровом пространстве внутреннего сосуда и межстенного пространства;

$\Delta h_k = c_p(T_1 - T_2)$ – разность между энтальпиями газа в системе и поступающим газом извне;

$v = \frac{V}{M}$ – удельный объем пара в паровом пространстве внутреннего сосуда и межстенного пространства.

Температуры пара во внутреннем сосуде и в межстенном пространстве равны:

$$T_1 = \frac{P_1 V_1}{M_1 R} \quad T_2 = \frac{P_2 V_2}{M_2 R} \quad (2)$$

С использованием значений расхода пара и жидкости уравнение (1) для парового объема внутреннего сосуда и межстенного пространства может быть представлено в виде системы двух уравнений.

Для внутреннего сосуда

$$\begin{aligned} \frac{dP_1(\tau)}{d\tau} = & -\frac{1}{V_1(\tau)} kP_1(\tau) \frac{G_L(\tau)}{\rho_L} \\ & + \frac{1}{V_1(\tau)} \left[\frac{kP_1V_1(\tau)}{M_{v1}(\tau)} - (k-1)c_p(T_1(\tau) - T_2(\tau)) \right] G_v(\tau) \\ & - \frac{1}{V_1(\tau)} \left[\frac{kP_1V_1(\tau)}{M_{v1}(\tau)} \right] G_{31}(\tau) \end{aligned} \quad (3)$$

Для межстенного пространства

$$\begin{aligned} \frac{dP_2(\tau)}{d\tau} = & \frac{1}{V_2(\tau)} kP_2(\tau) \frac{G_L(\tau)}{\rho_L} - \frac{1}{V_2(\tau)} \frac{kP_2V_2(\tau)}{M_{v2}(\tau)} G_v \\ & + \frac{1}{V_2(\tau)} \left[\frac{kP_2V_2(\tau)}{M_{v2}(\tau)} - (k-1)c_p(T_2(\tau) - T_{s2}(\tau)) \right] G_{in}(\tau) \\ & - \frac{1}{V_2(\tau)} \left[\frac{kP_2V_2(\tau)}{M_{v2}(\tau)} \right] G_{32}(\tau) \end{aligned} \quad (4)$$

где:

$$\begin{aligned} \frac{dM_{v1}}{d\tau} = G_v - G_{31} & \quad \frac{dV_2}{d\tau} = -\frac{dV_1}{d\tau} = G_L; \quad v_1 = \frac{V_1}{M_{v1}}; \quad v_2 = \frac{V_2}{M_{v2}} \\ \frac{dM_{v2}}{d\tau} = G_{in} - G_v - G_{32} & \end{aligned}$$

Система уравнений 3 и 4 является замкнутой, если известны потоки массы для внутреннего сосуда и межстенного пространства.

Расход жидкости из внутреннего сосуда в межстенное пространство через негерметичность G_L , расход пара из межстенного пространства в сосуд через перепускной трубопровод G_v , расходы пара через дренажные коммуникации G_{31} и G_{32} соответственно равны:

$$\begin{aligned} G_L = \mu_1 f_1 \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{v_L}}, & \quad G_v = \mu_2 f_2 \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1)}{v_2}}, \\ G_{31} = \mu_{31} f_{31} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_3)}{v_1}}, & \quad G_{32} = \mu_{32} f_{32} \sqrt{\frac{2(P_2 - P_3)}{v_2}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где f – площадь негерметичности, m^2 ; μ – коэффициент расхода.

Расход пара G_{in} , поступающего в свободный объем межстенного пространства равен количеству пара, образовавшемуся в результате теплопритока от стенки наружного кожуха к жидкостной фазе межстенного пространства, т.е.

$$G_{in}(\tau) = \frac{\alpha_1 F_w(\tau) (\theta_w(\tau) - T_{L2}(\tau))}{r}, \quad (6)$$

В этом выражении:

α_1 – коэффициент теплоотдачи от стенки кожуха к жидкости в межстенном пространстве; $F_w(\tau)$ – площадь контакта между жидкостью и наружной стенкой межстенного пространства; $\theta_w(\tau)$ – температура стенки кожуха в

области контакта с жидкостью; TL_2 - температура жидкости в межстенном пространстве; r – теплота парообразования.

С учетом разности температур между стенкой кожуха и жидкостью в межстенном пространстве (свыше 150К), на внутренней поверхности стенки имеет место поверхностное (пленочное) кипение недогретой жидкости в большом объеме и усреднённое значение коэффициента теплоотдачи α_1 можно принять равным 50 Вт/м²К.

Более сложный вопрос - определение поверхности теплообмена между наружной стенкой и жидкостью в межстенном пространстве.

Если межстенное пространство резервуара свободно от изоляции или применяется экранно-вакуумная изоляция, то пролитая в межстенное пространство жидкость стекает вниз, частично или полностью заполняет нижнее днище вертикального резервуара или нижний сегмент цилиндрической обечайки горизонтального резервуара.

В частности, если толщина изоляционного слоя много меньше диаметра сосуда, то для горизонтального резервуара площадь контакта между пролитой жидкостью и наружной стенкой межстенного пространства можно принять равной

$$F_{w1} = \pi DL \frac{M_L}{V_0 \rho_L} \quad (7)$$

Для вертикального резервуара

$$F_{w2} = \pi DH \frac{M_L}{V_0 \rho_L} + \frac{\pi D^2}{4} \quad (8)$$

где D – диаметр кожуха резервуара, м, L - длина внутреннего сосуда горизонтального резервуара, м; H - высота внутреннего сосуда вертикального резервуара, м; V_0 – свободный объем межстенного пространства, м³; M_L – масса жидкости в межстенном пространстве, кг; ρ_L – плотность жидкости, кг.

Если используется вакуумно-порошковая изоляция, то предполагается, что для вертикального сосуда жидкость, поступившая через негерметичность в межстенное пространство, формируется в виде полого цилиндра, боковая поверхность которого контактирует с наружной стенкой кожуха, при этом площадь контакта равна

$$F_{w2} = \pi DH \frac{M_L}{nV_0 \rho_L} m \quad (9)$$

а для горизонтального резервуара

$$F_{w2} = \pi DL \frac{M_L}{nV_0 \rho_L} m \quad (10)$$

где n – межзерновая пустотность изоляции (для вакуумно-порошковой изоляции можно принять $n = 0,6$); m – коэффициент поверхности теплообмена.

В обоих случаях поверхность контакта пролитой жидкости с наружной стенкой кожуха может быть определена, если известна масса пролитой жидкости.

Развитие аварийного процесса.

Как было показано выше, развитие переходного процесса при нарушении герметичности внутреннего сосуда происходит в три периода.

Уравнения (3) – (8) можно использовать для описания переходного процесса для каждого периода при следующих условиях:

Во время первого периода происходит только истечение жидкости через негерметичность из внутреннего сосуда в межстенное пространство с расходом G_L , частичное ее испарение от внешнего теплопритока и поступление пара в свободный объем межстенного пространства с расходом G_{in} . Остальные потоки отсутствуют, т.е. в первом периоде $G_v = 0$, $G_{31} = 0$, $G_{32} = 0$.

Как указывалось, выше, при давлении в межстенном пространстве ниже 0,1МПа накоплением жидкости пренебрегаем.

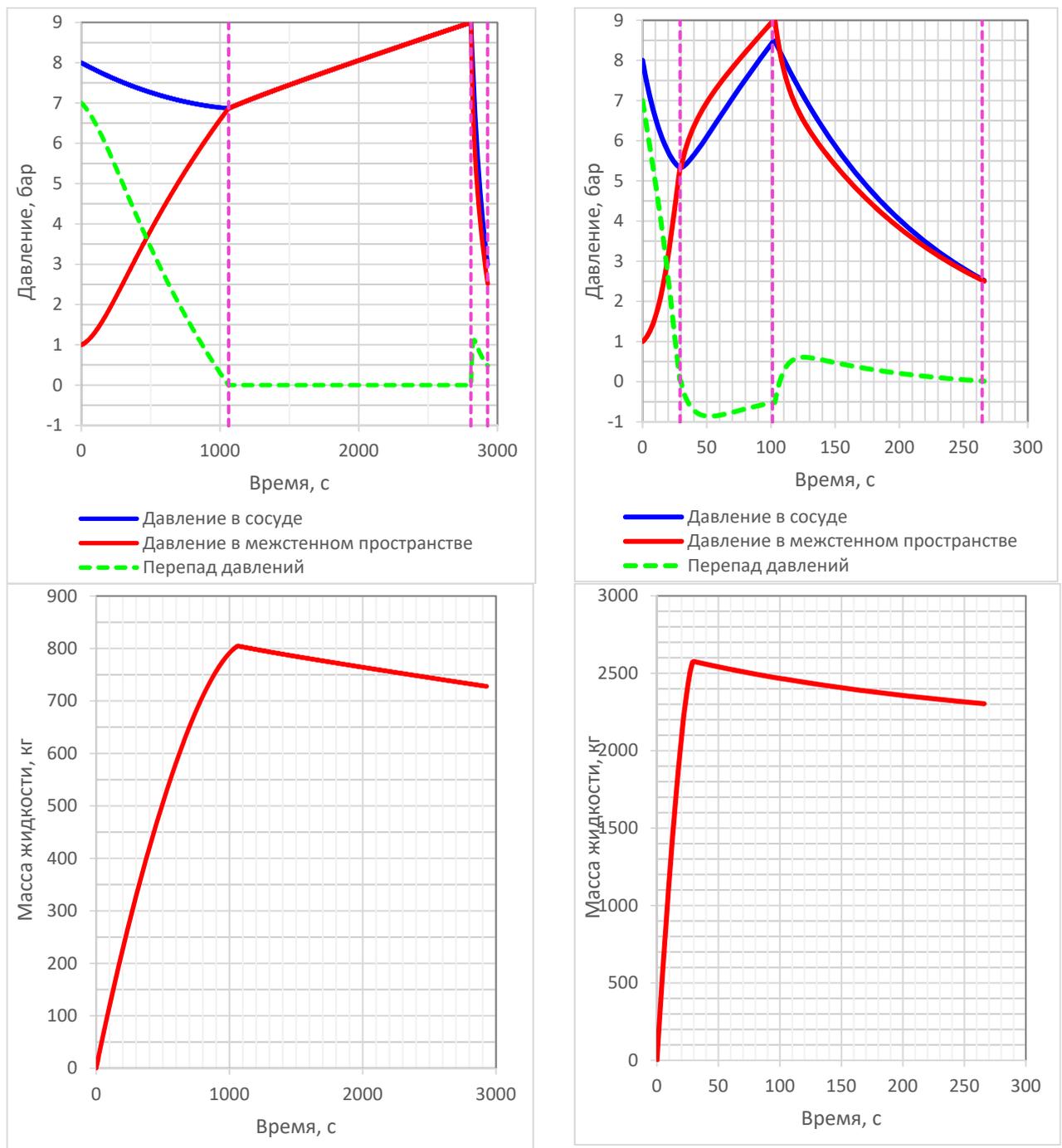
Длительность первого периода τ_1 определяется из условия равенства давлений в сосуде и в межстенном пространстве в конце первого периода, т.е. $P_1(\tau_1) = P_2(\tau_1)$.

Во втором периоде имеет место перетекание пара из межстенного пространства во внутренний сосуд с расходом G_v , а также продолжается испарение жидкости в межстенном пространстве и поступление пара в свободный объем межстенного пространства с расходом G_{in} . Остальные потоки отсутствуют, т.е. $G_L = 0$, $G_{31} = 0$, $G_{32} = 0$. В качестве начальных условий используются параметры системы в конце первого периода при $\tau = \tau_1$. Второй период заканчивается, когда давление в межстенном пространстве достигнет допустимого значения (рабочего давления резервуара), т.е. $P_2(\tau_2) = P_{max}$. Из этого условия определяется длительность второго периода τ_2 .

В третьем периоде раскрываются предохранительный клапан 8 (рис. 1,б) и происходит истечение пара из внутреннего сосуда с расходом G_{31} и из межстенного пространства с расходом G_{32} в окружающую среду. При этом истечение жидкости из внутреннего сосуда в межстенное пространство отсутствует ($G_L = 0$), а перетекание пара из межстенного пространства во внутренний сосуд (G_v) и испарение жидкости в межстенном пространстве (G_{in}) продолжают. В качестве начальных условий для третьего периода используются параметры системы в конце второго периода, т.е. при $\tau = \tau_2$.

На Рисунке 4 представлены результаты расчетов всех трех этапов аварийного режима в резервуаре объемом 56 м^3 с диаметром перепускного трубопровода 0,05м при диаметрах негерметичности 0,01 и 0,1 м.

Таким образом предложенная физико-математическая модель позволяет определять значение давлений в сосуде и в межстенном пространстве и разность между этими величинами на всех стадиях аварийного режима.



а)

б)

Рисунок 4. Изменение давления и массы жидкости в межстенном пространстве при развитии аварийного режима в двухоболочечном резервуаре при негерметичности 0,01 м (а) и 0,1 м (б).

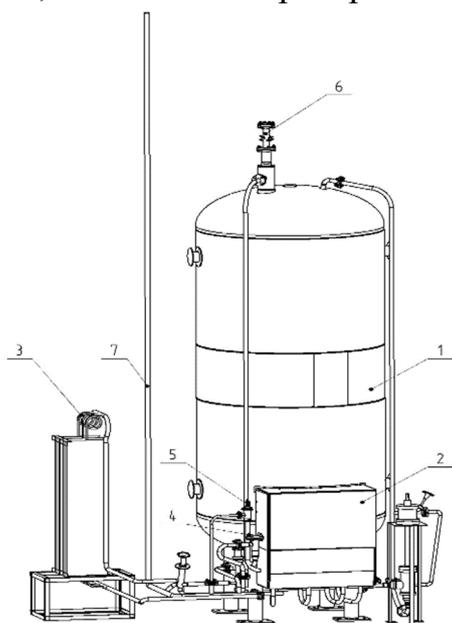
В третьей главе рассматриваются результаты экспериментальных исследований аварийного режима.

Основные задачи исследований:

- Экспериментально показать достоверность предложенной физико-математической модели и возможность ее применения для расчета аварийных процессов в криогенном резервуаре.
- Подтвердить работоспособность технологической схемы криогенного двухоболочечного резервуара с перепускным трубопроводом.

Для проведения испытаний был разработан и изготовлен макет двухоболочечного резервуара объемом 10м³ (Рисунок 5). Испытания

проводились в два этапа: 1) рабочая среда – жидкий азот, межстенное пространство заполнено воздухом при давлении 0,1 МПа; 2) рабочая среда – СПГ, межстенное пространство заполнено перлитом при давлении 0,1МПа.



а



б

Рисунок 5. Макет двухболоечного резервуара. а- общий вид; б – сброс жидкого азота из межстенного пространства макета; 1 – макет криогенного резервуара; 2 – арматурный шкаф; 3 – испаритель наддува; 4 – пневматический клапан, имитирующий разгерметизацию внутреннего сосуда; 5 – перепускной клапан, имитирующий разрывную мембрану; 6 – система термометрии.

Таблица 1. Интегральные значения результатов расчетов и экспериментов.

Параметр	Обозначение	Эксп. значение	Расчетное значение
Давление во внутреннем сосуде в начале первого периода, МПа	P10	0,576	0,576
Объем парового пространства в сосуде, м ³	V10	3,2	3,2
Длительность первого периода, с	τ1	86	88
Давление в сосуде и кожухе в конце первого периода, МПа	P11, P12	0,5	0,49
Объем пара в сосуде в конце первого периода, м ³	V11	3,5	3,622
Длительность второго периода, с	τ2	771	672
Давление во внутреннем сосуде в конце второго периода, МПа	P12	0,576	0,576
Давление в кожухе в конце второго периода, МПа	P22	0,593	0,576
Объем пара в сосуде в конце второго периода, м ³	V12	3,64	3,622

Нарушение герметичности внутреннего сосуда имитировалось перепусканием жидкости из внутреннего сосуда в межстенное пространство через трубопровод с пневмоклапаном диаметром 40мм. В процессе испытаний измерялись давление в сосуде и в межстенном пространстве, количество жидкости в сосуде.

Результаты испытаний на жидком азоте и их сравнение с расчетом представлены на Рисунке 6 и в Таблице 1. Видно, что результаты расчетов и экспериментов по длительности этапов переходного процесса и значений давлений согласуются с точностью до 15%, что следует признать подтверждением достоверности расчетной модели.

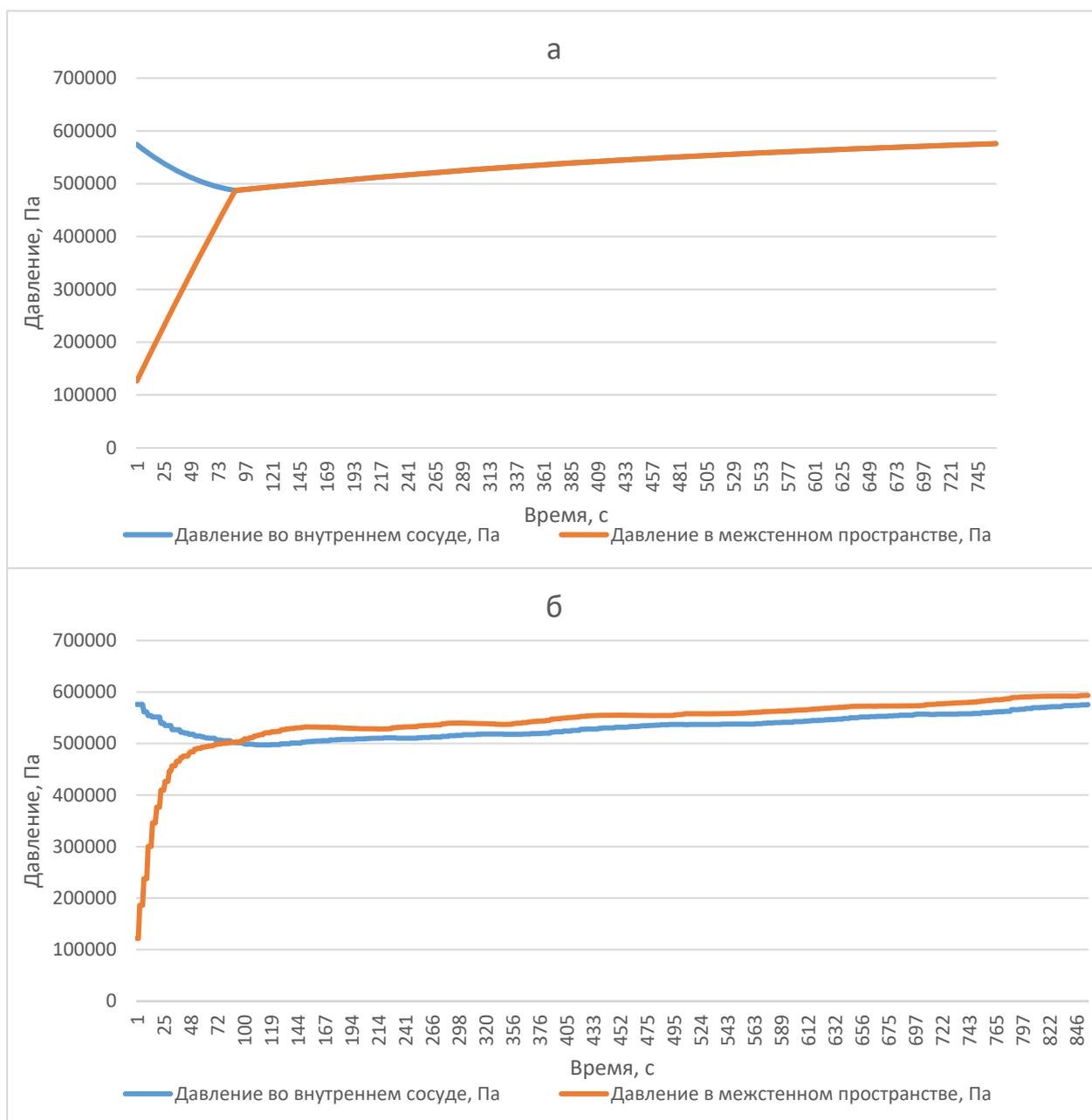


Рисунок 6. Графики изменения давлений во внутреннем сосуде и в межстенном пространстве (а – результаты расчета; б – экспериментальные данные).

Результаты испытаний на СПГ и их сравнение с расчетом представлены на Рисунке 7 и в Таблице 2.

Таблица 2. Интегральные значения результатов расчетов и экспериментов с СПГ

Параметр	Обознач.	Эксп. значение	Расчетное значение Режим А	Расчетное значение Режим Б
Давление во внутреннем сосуде в начале первого периода, МПа	P10	0,482	0,482	0,482
Объем парового пространства в сосуде в начале испытаний, м ³	V10	3	2,976	2,976
Длительность первого периода, с	τ_1	98	127	127
Давление в сосуде и кожухе в конце первого периода, МПа	P11, P12	0,369	0,356	0,356
Длительность второго периода, с	τ_2	5142	1205	4961
Давление во внутреннем сосуде в конце второго периода, МПа	P12	0,779	0,78	0,78
Давление в кожухе в конце второго периода, МПа	P22	0,785	0,78	0,78

Как видно из Таблицы 2, при испытаниях на СПГ (порошковая изоляция, режим А) между экспериментальными и расчетными результатами базовой расчетной модели (не учитывающей особенности теплообмена в порошковой изоляции) во втором периоде имеются существенные расхождения, которые можно объяснить тем, что скорость испарения жидкости в межстенном пространстве ниже расчетного значения. В случае уменьшения во втором периоде значения коэффициента, учитывающего поверхность теплообмена, до $m=0,4$, получается вполне удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных значений (режим Б).

Таким образом, возможной причиной расхождения расчетных и экспериментальных значений параметров при испытаниях резервуара с порошковой изоляцией является снижение скорости испарения криогенной жидкости, пролитой в изоляционное пространство, из-за уменьшения теплообменной поверхности между пролитой жидкостью и наружной стенкой межстенного пространства.

Для проверки этого предположения были проведены дополнительные эксперименты на макете теплоизоляционного пространства резервуара, которые показали, что жидкость, пролитая в объем с порошковой изоляцией, распределяется в виде некоторого облака с переменными границами и площадь контакта жидкости с теплой стенкой со временем уменьшается, что в свою очередь, приводит к снижению теплопритока к пролитой жидкости.

Таким образом, значение пропускной способности перепускного трубопровода для резервуара с порошковой изоляцией, определенной по данной модели при значении коэффициента теплообменной поверхности $m=1$, является завышенным, т.е. расчет выполняется с запасом.

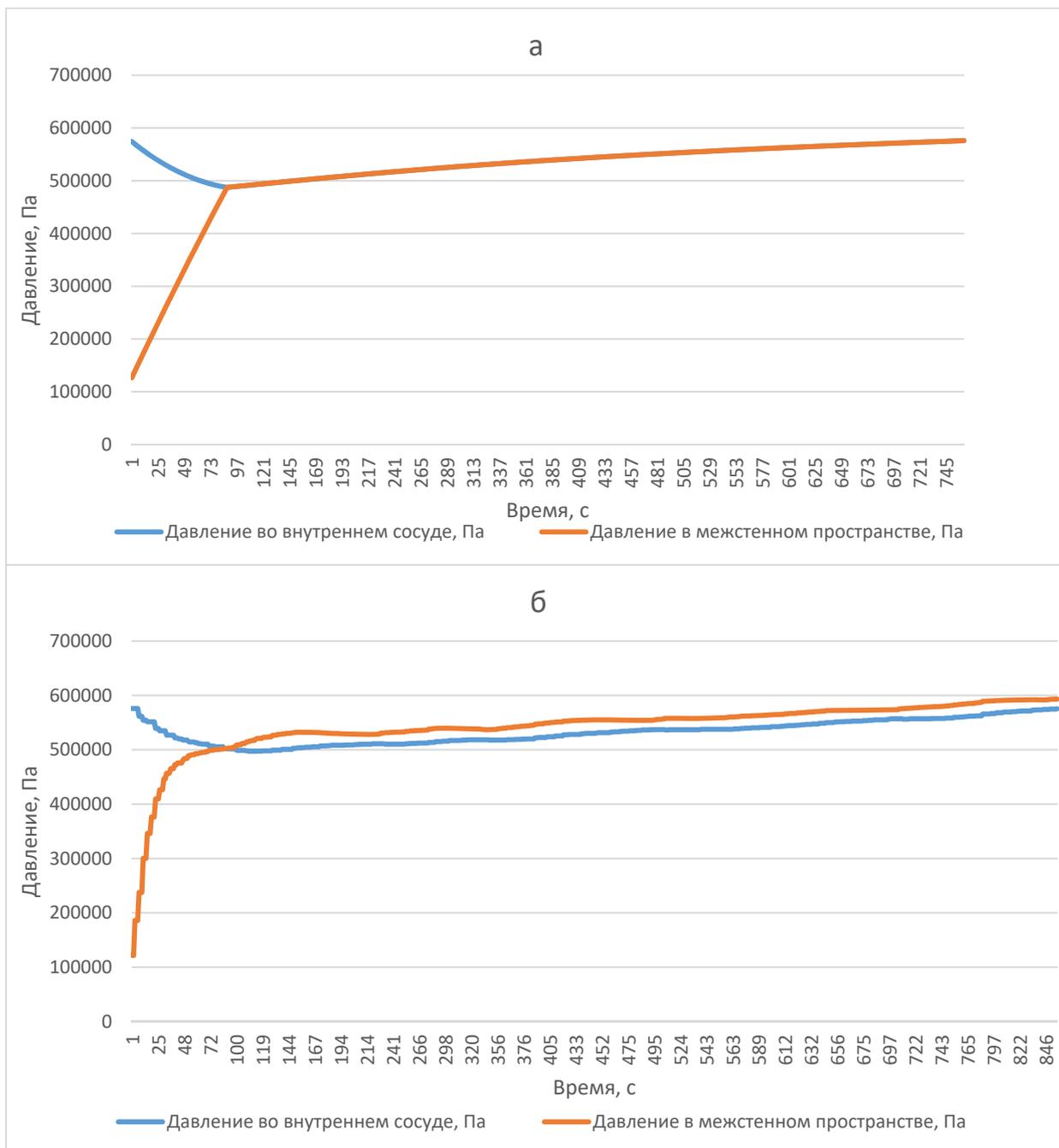


Рисунок 7. Изменения давлений во внутреннем сосуде и в межстенном пространстве в переходном процессе при испытании на жидком азоте. (а – результаты расчета; б – экспериментальные данные).

В четвертой главе приводятся результаты численного моделирования аварийных режимов криогенных двухбололочечных резервуаров объемом 10 и 50м³ для различных размеров негерметичности, различной степени заполнения, различного начального давления во внутреннем сосуде; различных геометрических размерах резервуара.

На основании полученных результатов разработан ряд рекомендаций к проектированию двухбололочечных резервуаров:

1. В качестве расчетных значений следует выбирать:
 - максимальный размер негерметичности, с учетом вероятности её появления;
 - минимальную степень заполнения внутреннего сосуда;

- максимально допустимое во внутреннем сосуде давление (давление срабатывания предохранительной арматуры, устанавливаемой на резервуаре);
 - коэффициент поверхности теплообмена $m=1$.
2. При проектировании резервуаров, кроме стандартных для сосудов, работающих под давлением расчетов, дополнительно рекомендуется выполнить следующие расчеты:
- расчет внутреннего сосуда на устойчивость к наружному давлению;
 - расчет наружного кожуха на прочность (расчетное давление соответствует расчетному давлению внутреннего сосуда);
 - расчет аварийного расхода через предохранительную арматуру;
 - расчет пропускной способности предохранительной арматуры и подводящих коммуникаций с учетом конструктивных особенностей схемы двухбололочного резервуара;
 - расчет пропускной способности перепускного устройства между теплоизоляционной полостью и внутренним сосудом.
3. При изготовлении двухбололочного резервуара необходимо провести дополнительные испытания:
- испытание внутреннего сосуда на устойчивость к наружному давлению;
 - испытание кожуха резервуара на внутреннее давление, величина которого соответствует рабочему значению

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ пожароопасности современных систем хранения и транспортирования малотоннажного СПГ, использующих криогенные резервуары, в том числе рассматривается наиболее опасная ситуация: пролив СПГ наружу при нарушении герметичности внутреннего сосуда криогенного резервуара. С целью снижения стоимости противопожарной защиты и уменьшения противопожарных разрывов предложено исключить пролив жидкости наружу за счет применения двухбололочных криогенных резервуаров, но для этого необходимо оценить их работоспособность в аварийных ситуациях.

С использованием аппарата термодинамики открытых систем разработана физико-математическая модель развития аварийного процесса в криогенном резервуаре при нарушении герметичности внутреннего сосуда с проливом жидкости в межстенное пространство. На основании этой модели разработана программа для расчета давлений во внутреннем сосуде и в межстенном пространстве во время переходного процесса.

Проведено экспериментальное моделирование аварийных режимов на промышленном макете двухбололочного резервуара объемом 10 м³ с вакуумной и вакуумно-порошковой изоляцией при хранении жидкого азота и СПГ, а также качественная оценка распределения криогенной жидкости в порошковой изоляции на лабораторной модели.

Разработаны сценарии развития аварийных режимов в криогенных двухоболочечных резервуарах и проведено численное моделирование и анализ переходных процессов.

По результатам работы можно сделать следующие выводы

1. Разработанная физико-математическая модель развития аварийного процесса в криогенном двухоболочечном резервуаре при нарушении герметичности внутреннего сосуда позволяет определять изменения давлений в сосуде и в межстенном пространстве, а также расходы жидкости и пара между ними в переходном процессе при условии, что жидкость и пар в сосуде находятся в неравновесном состоянии (гетерогенная модель).

2. Результаты испытания промышленного макета двухоболочечного резервуара (объем 8м³) с вакуумной изоляцией на жидком азоте согласуются с результатами расчета с точностью до 15%.

3. При испытаниях макета с вакуумно-порошковой изоляцией на СПГ длительность и параметры первого периода согласуются с результатами расчета с точностью до 15%, а длительность второго этапа переходного процесса в 4 раза меньше расчетного значения.

Это расхождение обусловлено уменьшением скорости испарения жидкости в межстенном пространстве из-за неравномерного распределения пролитой жидкости в порошковой изоляции, что, в частности, качественно подтверждается результатами испытаний по проливу криогенной жидкости в порошковую среду на лабораторной модели. Таким образом, расчеты параметров аварийного режима по предложенной модели выполняются с запасом.

4. На основе численного моделирования аварийных процессов определено влияние конструктивных и технологических параметров резервуара на развитие процесса и обоснованы наиболее опасные сценарии развития процессов. Показано, что при хранении недогретой жидкости в двухоболочечных криогенных резервуарах объемом 10 - 50м³ при значениях диаметра перепускного трубопровода 0,02 – 0,04 м, при относительной величине свободного объема изоляции свыше 0,5 при рабочем давлении резервуара до 0,8МПа и при величине негерметичности внутреннего сосуда до 100мм исключается возможность разрушения оболочек внутреннего сосуда и межстенного пространства, при этом толщина стенок сосуда и кожуха по отношению к обычному резервуару не увеличивается.

6. Разработаны основы инженерного расчета двухоболочечных резервуаров, которые могут быть использованы при создании нормативных документов.

7. Использование двухоболочечных резервуаров в системах для хранения малотоннажного СПГ исключает пролив СПГ наружу при нарушении герметичности внутреннего сосуда резервуара, что позволяет снизить стоимость противопожарных систем (отказ от защитного ограждения под резервуаром, отказ от аварийного водоснабжения, отказ от систем орошения) и уменьшения более, чем в два раза противопожарных разрывов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Горбачев С.П., Клеблеев Т.И. Аварийные режимы в криогенных неизотермических резервуарах для сжиженного природного газа. Научно-технический сборник «Вести газовой науки». №1(42), 2020. С.130-135 (0,75 п.л./0,35 п.л.).
2. Горбачев С.П., Семенов Ю.В., Клеблеев Т.И. Технологические схемы криогенных двухоболочечных резервуаров для СПГ// Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2021.№7. С. 16-19(0,65 п.л./0,2 п.л.).
3. Испытания макета двухоболочечного резервуара для хранения и транспортирования сжиженного природного газа / Т.И. Клеблеев [и др.] // Газовая промышленность. 2022. №2. С. 20 – 25 (0,75 п.л./0,25 п.л.).
4. Горбачев С.П., Кириенко К.И., Клеблеев Т.И. Физико-математическая модель развития аварийного режима в двухоболочечном криогенном резервуаре для сжиженного природного газа. // Научно-технический сборник. «Вести газовой науки». 2022. № 2. С. 74-81. (0,85 п.л./0,3 п.л.).
5. Клеблеев Т.И., Семенов В.Ю. Экспериментальное исследование теплообмена в межстенном пространстве криогенного резервуара с порошковой изоляцией. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, 2023, № 3 (146), С. 113-126 (0,65 п.л./0,4 п.л.).
6. Горбачев С.П., Семенов Ю.В., Клеблеев Т.И. Результаты испытаний неизотермического криогенного двухоболочечного резервуара для хранения и транспортирования СПГ// Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2022. № 10. С. 19-22 (0,65 п.л./0,25 п.л.).