

Юранев Олег Александрович

**МЕТОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ ДЛЯ
ИМИТАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ТЕМПЕРАТУР КРИОГЕННЫХ
ТОПЛИВНЫХ БАКОВ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С
ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ОТРАБОТКИ ИХ ПРОЧНОСТИ**

Специальность

2.5.14. – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2023 г.

Диссертация выполнена в Акционерном обществе «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (г. Королёв)

Научный руководитель: **Колозезный Антон Эдуардович**,
кандидат физико-математических наук,
начальник отдела температурно-статической
прочности АО «Центральный научно-
исследовательский институт машиностроения»

Официальные оппоненты: **Лебедев Константин Нитович**
доктор технических наук, профессор,
заместитель начальника отделения прочности
АО «Центральный научно-исследовательский
институт специального машиностроения»

Викулов Алексей Геннадьевич
доктор технических наук, доцент кафедры
«Космические системы и ракетостроение»
ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)»

Ведущая организация: Акционерное общество «Ракетно-космический
центр «Прогресс»

Защита диссертации состоится «22» июня 2023 г. в 14-30 на заседании диссертационного совета Д 24.2.331.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, дом 10, факультет Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, аудитория 407м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим присылать по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, дом 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.08.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.08
к.т.н., доцент



А.Ю. Луценко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В России продолжается создание новых космических транспортных средств, функционирующих на основе использования криогенных компонентов топлива: жидких водорода, кислорода, метана. Переход компонентов ракетных топлив на криогенные является перспективным и приоритетным направлением в ракетно-космической отрасли. Важное значение при этом приобретают вопросы отработки «криогенной» прочности топливных баков. Опыт работы с жидким водородом в нашей стране не так велик по сравнению с американскими и европейскими космическими программами. До летных испытаний доведены только два водородных бака – это крупногабаритный бак блока «Ц» РН «Энергия» (2 пуска) и водородный бак разгонного блока 12КРБ, который эксплуатируется в составе индийской ракеты GSLV. Опыта работы с жидким метаном и того меньше.

В преддверии отработки прочности РН и РБ нового поколения необходимо усовершенствовать технологии их экспериментальной отработки, в том числе в части правильной имитации температурных полей, с учетом новых задач и тенденций по сравнению с предшествовавшим периодом. Способы усовершенствования методик температурного нагружения изделий при проведении лабораторных криогенно-статических испытаний разрабатываются с учетом основных целей и задач развития экспериментальной базы отработки прочности и динамики, а также основных положений идеологии наземной отработки прочности и динамики.

Объективная необходимость экспериментального исследования прочности конструкций при эксплуатационных температурах состоит в том, что температурные эффекты могут существенно влиять на прочность и жесткость конструкции. Зачетным прочностным статическим испытаниям должны подвергаться все разрабатываемые ступени носителей и разгонных блоков. При их проведении должны имитироваться эксплуатационные температуры испытываемого объекта, поскольку они влияют на свойства материалов и, следовательно, на прочность и жесткость конструкции.

Значительный вклад в решение проблем проведения криогенно-статических испытаний ракетно-космических конструкций внесли специалисты предприятий отрасли, в том числе теоретики и экспериментаторы ЦНИИмаш: С.Н. Давыдов, М.Б. Ерофеев, А.В. Кармишин, В.В. Краев, В.М. Санников, А.Ф. Сивогризов, С.Н. Сухинин, Я.Г. Осадчий, А.Т. Цыбров и др. Активная работа велась и в других научных, испытательных и образовательных центрах, таких как РКЦ «Прогресс», ЦАГИ, МГТУ им. Н.Э. Баумана и др. Особо следует отметить работы В.Л. Ноткина, В.С. Зарубина, Ю.К. Калинина, Г.А. Дейцера.

Степень разработанности темы.

Вопрос отработки прочности криогенных баков возник в конце 70-х годов XX века, когда появилась задача по отработке прочности водородного бака блока «Ц» РН «Энергия» при эксплуатационных температурах. В этот период начались активные проработки обликов экспериментальных баз отрасли для

проведения криогенно-статических испытаний. Самые известные и крупные из них – это корпус комплексных температурно-прочностных испытаний в АО «ЦНИИмаш» (г. Королёв), экспериментальные базы в АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара) и АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» в Фаустово.

Цель диссертационной работы:

- разработка методов захлаживания газообразными хладагентами криогенных топливных баков ракет космического назначения для повышения их конструктивно-массового совершенства путем задания их истинного напряженно-деформированного состояния при испытаниях.

Задачи диссертационной работы:

- Анализ существующих подходов по захлаживанию криогенных топливных баков.

- Разработка методов захлаживания, позволяющих задать истинное напряженно-деформированное состояние криогенных топливных баков ракет космического назначения и минимизировать затраты на обеспечение имитации эксплуатационной температуры при их прочностных испытаниях.

- Разработка физико-математической модели теплового состояния криогенных баков для предложенных методов захлаживания при их прочностных испытаниях с учетом протекания нестационарных процессов.

- Оценка времени захлаживания криогенных баков рассматриваемыми методами с целью разработки методик по их применению.

- Экспериментальное подтверждение разработанных методов захлаживания.

- Разработка методик по применению предложенных методов захлаживания при отработке температурно-статической прочности новых изделий ракетно-космической техники.

Научная новизна работы:

- впервые разработан и теоретически обоснован метод захлаживания криогенных топливных баков посредством циркуляции холодного гелия по замкнутому контуру с использованием гелиевого рефрижератора, позволяющий проводить охлаждение конструкций до любого температурного уровня, вплоть до 20 К;

- впервые разработан и экспериментально обоснован метод захлаживания криогенных топливных баков посредством фонтанирования капельно-газовой смеси на внутреннюю поверхность бака специальным разбрызгивателем, установленным в верхней части бака, позволяющий имитировать в баках температуры, близкие к температуре кипения жидкого метана и жидкого кислорода;

- впервые разработан и теоретически обоснован метод захлаживания криогенных топливных баков посредством орошения жидким азотом внешней поверхности бака.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- использование разработанных новых методов на практике позволит выявить истинное напряженно-деформированное состояние конструкций РН и

РБ, возникающее от воздействия температуры в эксплуатационных условиях, повысит достоверность и информативность экспериментальных результатов;

- использование разработанных методов на практике позволит определить истинное массовое совершенство конструкций, в том числе при учете их криогенного упрочнения;

- результаты работы, приведенные в диссертации, применяются в настоящее время (Акт внедрения в АО «ЦНИИмаш» от 14.02.2022 г. № 20023-0276-2022) и будут использованы в дальнейшем для проведения испытаний изделий, разрабатываемых ПАО «РКК «Энергия», АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», АО «РКЦ «Прогресс».

Методология и методы исследования

В работе использованы:

- аналитические и численные методы решения задач теплообмена в сплошной среде, использующие уравнения теплопроводности и теоретические основы теплопередачи;

- экспериментальные методы захлаживания с использованием жидкого азота;

- методы регистрации, обработки и анализа параметров температурных полей.

Положения, выносимые на защиту:

- метод захлаживания топливных баков ракет-носителей и разгонных блоков посредством циркуляции по замкнутому контуру холодного газообразного гелия;

- метод захлаживания топливных баков ракет-носителей и разгонных блоков посредством фонтанирования капельно-газовой смеси на внутреннюю поверхность бака специальным разбрызгивателем, установленным в верхней части бака.

- тепловая физико-математическая модель оценки процесса захлаживания емкостей криогенными теплоносителями.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность и практическая ценность разработанных методов захлаживания газообразными хладагентами криогенных топливных баков ракет космического назначения при проведении их прочностных испытаний подтверждается использованием классических соотношений учения о теплообмене, экспериментальными исследованиями и разработанными на их основе нормативными документами.

Апробация работы.

Результаты проведенных исследований докладывались и обсуждались на отраслевых и всероссийских конференциях, в том числе:

- на молодежной научно-технической конференции «Инновационный арсенал молодежи 2012», (г. Санкт-Петербург, 2012 г.);

- на Международном Аэрокосмическом Конгрессе IAC'12 (г. Москва, 2012 г.);

- на XXXVIII Всероссийской конференции, посвященной 75-летию Южно-Уральского государственного университета (г. Миасс Челябинской обл., 2018 г.);

- на 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ (Москва, 2021 г.).

Личный вклад автора заключается:

- в непосредственном участии в разработке метода охлаждения баков циркуляцией холодного гелия, его расчетном обосновании, подготовке публикаций и личных выступлениях с докладами по выполненной работе;

- в разработке метода захолаживания топливных баков ракет-носителей и разгонных блоков посредством фонтанирования капельно-газовой смеси на внутреннюю поверхность бака специальным разбрызгивателем, установленным в верхней части бака, его экспериментальном подтверждении, получении и обработке результатов эксперимента;

- в разработке научно-методических основ совершенствования методов прочностных испытаний конструкций ракет-носителей и разгонных блоков посредством более точного имитирования температурных полей конструкции.

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 12 научных работах, в том числе в 7 статьях в журналах Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ и 4 сборниках тезисов конференций.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 108 наименований. Она изложена на 146 страницах, содержит 30 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы. Показаны новизна, а также достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы. Кратко охарактеризованы методы исследования. Представлены теоретическая и практическая значимость работы, описана структура диссертации.

В первой главе приведен обзор существующих методов охлаждения конструкций, таких как конвективный способ, а именно: конвективный способ захолаживания с помощью жидкого хладоносителя, конвективный способ захолаживания внутри стационарного устройства, конвективный способ захолаживания посредством газообразного хладоносителя, контактные методы захолаживания. Проанализирована технология охлаждения конструкций жидким и газообразным хладагентами. Сформулированы предложения по использованию того или иного метода в различных случаях.

Одно из основных требований к захолаживающим жидкостям – имитация физических характеристик криогенных топлив.

Отмечается, что для имитации температуры жидкого кислорода, то есть наиболее близкой к нему по температуре кипения жидкостью, предлагается использовать сжиженный аргон. Малая разница в температурах кипения (3 К), не очень большая разница в плотностях (примерно в 1,2 раза) и приемлемая стоимость делают аргон идеальным веществом для имитации температуры

жидкого кислорода. Жидкий азот уступает жидкому аргону как в разнице температур, так и в разнице плотностей кипящих жидкостей, единственное преимущество – более низкая стоимость.

Температуру жидкого водорода можно имитировать жидким неоном, температура кипения которого всего лишь на 7 К выше. В этом случае разница в изменении механических свойств материала баков будет несущественной. Но разница в плотностях в 17 раз не позволит проводить испытания водородных баков без обезвешивания. Использование жидкого гелия в этом случае нецелесообразно из-за слишком низкой температуры и чересчур высокой стоимости.

Автором в целях отработки прочности изделий ракетно-космической техники был предложен и экспериментально опробован способ охлаждения конструкций парами жидкого азота и теоретически обоснован способ охлаждения газообразным гелием. Метод захолаживания конструкций парами криогенной жидкости применим для любых низкокипящих жидкостей, но с точки зрения пожаровзрывобезопасности и экономической эффективности используется жидкий азот (Рисунок 1). Парами жидкого азота возможна имитация перспективного ракетного горючего – жидкого метана (минус 161 °С), а также жидкого кислорода (минус 183 °С). Осуществить это можно двумя способами. Первый способ заключается в том, что в нижнее днище бака подается жидкий азот, испаряющиеся пары которого движутся вдоль стенки бака, охлаждают ее и выходят через дренажное отверстие в верхнем днище бака.

При осуществлении второго способа жидкий азот подается со стороны верхнего днища бака. Желательно для более равномерного и интенсивного охлаждения внутри бака в районе верхнего днища установить разбрызгиватель с форсунками (Рисунок 2).

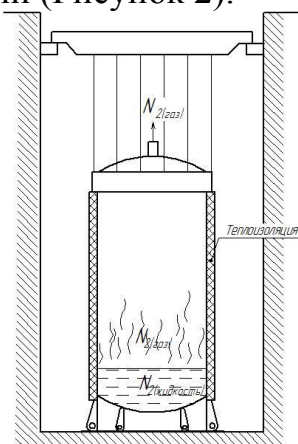


Рисунок 1. Схема захолаживания бака испаряющимся азотом

Следует отметить, что скорость захолаживания бака данным способом оказалась намного выше, чем в предыдущем способе.

Вызывает интерес комбинированный способ охлаждения, совмещающий в себя охлаждение испаряющимся азотом, залитым снизу, и азотной капельно-газовой смесью, подаваемой сверху. Схематично он показан на Рисунке 3.

В этом случае капельно-жидкостная смесь, попадая в область стенок бака, начинает опускаться вниз бака за счет массовых сил инерции, по пути охлаждая стенки бака, а затем, нагреваясь, начинает подниматься вверх через центральную часть бака и выходит через дренажное отверстие.

Данный способ также был отработан в ЦНИИмаш, что отражено в главе 3 диссертации.

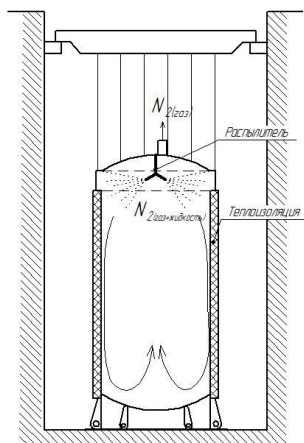


Рисунок 2. Схема захлаживания бака испаряющимся азотом сверху

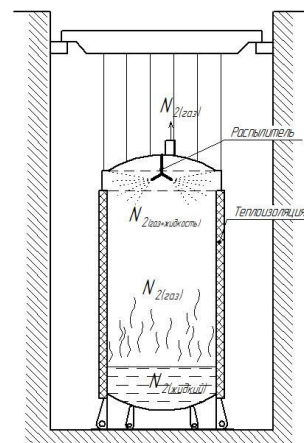


Рисунок 3. Схема захлаживания бака азотом комбинированным способом

В процессе проведения испытаний происходит большой приток тепла к баку со стороны оснастки. Для уменьшения данных теплопритоков предлагается между шпангоутом и оснасткой установить кольцо из материала, обладающего низким коэффициентом теплопроводности.

Во второй главе представлены результаты расчетов охлаждения водородного, метанового и кислородного баков. Расчеты проведены в аналитической постановке.

Приведено расчетное обоснование возможности охлаждения до температуры 20 К (минус 253 °С) крупногабаритных емкостей с помощью газообразного гелия на примере технологии относительно недорогого и взрывобезопасного захлаживания водородного бака (Рисунок 4).

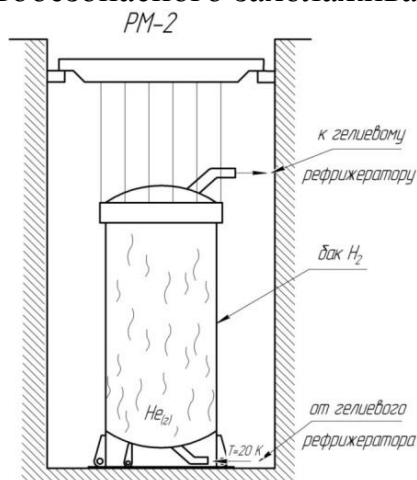


Рисунок 4. Схема охлаждения до 20 К крупногабаритных емкостей с помощью газообразного гелия

с помощью газообразного гелия снова в рефрижератор и там охлаждается. Цикл повторяется.

Бак, теплоизоляция и газ, находящийся внутри бака имеют начальную температуру 293 К. Далее в емкость начинает поступать холодный газ (гелий) постоянной температурой 20 К. Этот газ вытесняет теплый газ и заполняет емкость. По мере поступления холодного газа в емкость понижаются температура стенок и теплоизоляции.

Суть подобного охлаждения заключается в следующем. Через бак прокачивается холодный газообразный гелий (Рисунок 4). Газообразный гелий может быть охлажден до низких температур. Рассмотрим охлаждение до температуры $T_2 = 20$ К (температура жидкого водорода). Гелий охлаждается в гелиевом рефрижераторе до требуемой температуры, после чего подается в бак, где, нагреваясь от стенок бака, через верхнее днище попадает

Расчет проводился по методу тепловых балансов (Рисунок 5). В проводимом расчете температура определяется в центре толщины стенки бака. Время захлаживания определялось путем решения нестационарного уравнения теплопроводности, решаемого явным методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности. Принималось, что процесс заполнения бака гелием происходит гораздо быстрее процесса охлаждения.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процесс теплообмена в одномерной постановке, будет иметь вид:

$$\begin{aligned} C_p(T_1^{He}) \cdot \rho(T_1^{He}) \frac{\partial T_1^{He}}{\partial \tau} V_1^{He} &= C_p(T_1^{He}) G_{\text{вх}} (T_{\text{вх}}^{He} - T_1^{He}) F_{He} + \alpha_{\text{к}}^{\text{вын}} (T_i^{Al} - T_1^{He}) F_{\text{конв}}; \\ T_1^{He}(0) &= 20 \text{ K}; \\ C_p(T_2^{He}) \cdot \rho(T_2^{He}) \frac{\partial T_2^{He}}{\partial \tau} V_2^{He} &= C_p(T_2^{He}) G_{\text{вых}} (T_{\text{вых}}^{He} - T_2^{He}) F_{He} + \alpha_{\text{к}}^{\text{вын}} (T_i^{Al} - T_2^{He}) F_{\text{конв}}; \\ T_2^{He}(0) &= 20 \text{ K}; \\ C(T_i^{Al}) \cdot \rho(T_i^{Al}) \frac{\partial T_i^{Al}(\tau)}{\partial \tau} &= -\alpha_{\text{к}}^{\text{вын}} (T_i^{Al} - T_{\text{г}}^i) + \frac{\lambda(T_i^{Al})}{h_{Al}} (T_{i+1}^{Al} - T_i^{Al}) + \\ &+ \frac{\lambda_{\text{тзп}}(T_i^{\text{тзп}})}{h_{\text{тзп}}} (T_i^{\text{тзп}} - T_i^{Al}); \\ T_i^{Al}(0) &= 293 \text{ K}; T_i^{\text{тзп}} = T_{\text{м}}; \lambda_{\text{тзп}}(T_i^{\text{тзп}}) = \lambda_{\text{эф}}(T_2^{Al}, T_{\text{м}}); h_{\text{тзп}} = \delta_{\text{эф}} \\ C_p(T_i^M) \cdot \rho(T_i^M) \frac{\partial T_i^M}{\partial \tau} \delta_{\text{ст}} &= \frac{\lambda(T_i^M)}{h_{Al}} (T_{i+1}^M - T_i^M) + \frac{\lambda(T_i^M)}{h_{Al}} (T_i^M - T_i^{Al}) + \\ &+ \varepsilon_i \sigma (T_i^{M^4} - T_{\text{ср}}^4) - \alpha_{\text{к}}^{\text{св}} (T_i^M, T_{\text{ср}}) (T_i^M - T_{\text{ср}}); \\ T_i^M(0) &= 293 \text{ K}, \end{aligned}$$

где: $F_{He} = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь сечения потока гелия; $F_{\text{конв}} = \pi dl$ – площадь конвективного теплообмена стенки бака с гелием; $V_j^{He} = \frac{\pi d^2 h_j}{4}$; $j = 1, 2$ – объем части бака; $\alpha_{\text{к}}^{\text{вын}} = \frac{\text{Nu}_d \lambda_{He}}{d}$.

Процесс теплообмена между оснасткой и окружающей средой характеризуется свободным движением воздуха и таким образом критерий Нуссельта определяется произведением чисел Грасгофа и Прандтля при обтекании вертикальной стенки свободномолекулярным потоком воздуха:

$$\begin{aligned} \text{Nu}_l &= 0,75 (Gr(T) \text{Pr}(T))^{0,25}; \\ Gr_l &= \frac{g \beta \rho^2 (T_i^{\text{тзи}} - T_{\text{ср}}) l^3}{\eta(T)^2}. \end{aligned}$$

Коэффициент расширения пара определяется выражением:

$$\beta = \frac{1}{T_{He}^i};$$

Тогда для коэффициента теплоотдачи получаем:

$$\alpha_{\text{к}}^{\text{св}} = \frac{\text{Nu}_l \lambda_{\text{в}}(T)}{l}.$$

Расход паров гелия на входе определяется выражением:

$$G_{\text{вх}} = \sqrt{2 \rho_{\text{вх}} (p_{\text{вх}} - p)}.$$

Расход паров гелия на выходе определяется выражением:

$$G_{\text{вых}} = \frac{F_{\text{др}} p}{\sqrt{RT_{\text{пmax}}}} f\left(\gamma, \frac{p_0}{p}\right); T_{\text{пmax}} = 293 \text{ K}.$$

Показатель адиабаты паров гелия:

$$f\left(\gamma, \frac{p_0}{p}\right) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} & \text{при } \frac{p_0}{p} \geq \left(\frac{2}{\gamma-1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma-1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} & \text{при } \frac{p_0}{p} \leq \left(\frac{2}{\gamma-1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases}, \quad (1)$$

R – газовая постоянная пара; p_0 – давление среды на выходе из емкости;

$F_{\text{др}}$ – площадь дренажного отверстия.

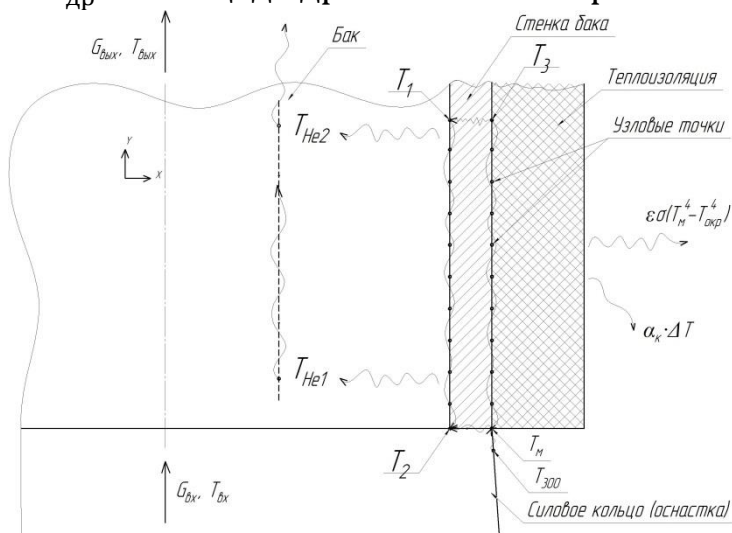


Рисунок 5. Расчетная схема

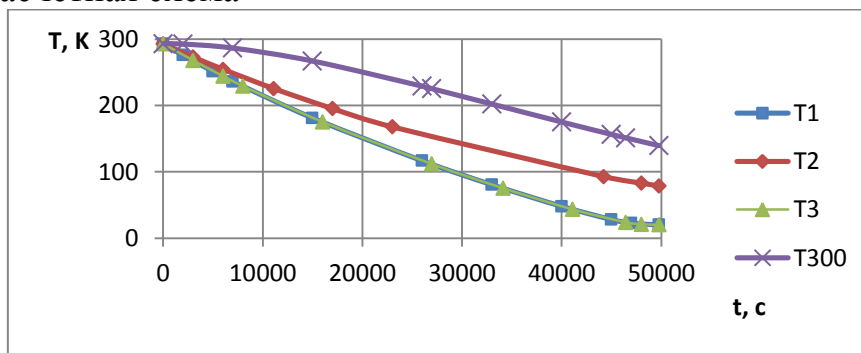


Рисунок 6. Распределение температур в разных точках бака по времени (кривые T2 и T_м близки друг к другу)

Анализ результатов показал, что температура стенки бака достигнет температуры 20 К не более, чем за 22 часа. Температура бака (шпангоут) в точке соприкосновения с силовым кольцом при этом будет иметь значение 78 К. Температура оснастки в точке соприкосновения с баком при этом составляет ~ 79 К (минус 195 °С).

При этом на расстоянии 300 мм от стыка температура оснастки составляет 140 К (минус 133 °С). На расстоянии 1000 мм от стыка температура оснастки составит 233 К (минус 40 °С).

Низкая температура оснастки обусловлена тем, что расчет проводился в одномерной постановке. В двумерной постановке температура оснастки оценочно должна быть выше примерно на 40 К.

Если перед испытателями стоит задача свести к минимуму затраты времени на захлаживание бака, предлагается его предварительно охладить жидким азотом до температуры порядка 80 К одним из вышеуказанных

способов. Затем по той же технологии продолжить захолаживание бака газообразным гелием. Оценим общее время захолаживания по данному способу.

Сначала рассчитаем время охлаждения бака до температуры ~ 80 К. Предположим, что бак будет захолажен путем его полной заливки жидким азотом. При этом время охлаждения бака будет эквивалентно времени его полного заполнения.

Объемный расход жидкого азота по магистрали определяется по формуле:

$$Q = V \cdot S, \text{ где}$$

V – скорость потока жидкого азота, [м/с];

S – площадь поперечного сечения магистрали, [м²].

При расчете времени заполнения бака пренебрежем количеством испарившегося азота. Тогда бак заполнится жидким азотом за время

$$t = \frac{V_6}{Q} = \frac{105 \text{ м}^3}{0,038 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}} = 2763 \text{ с} < 1 \text{ ч}$$

Для простоты расчета примем, что время заполнения бака составит порядка одного часа. Аналогично примем, что и время опорожнения жидкого азота из бака также произойдет за время порядка 1 ч.

Далее определим время охлаждения бака от температуры ~ 80 К до температуры 20 К газообразным гелием.

Методика расчета аналогична той, что представлена выше. Ниже приводится график изменения температуры стенки со временем.

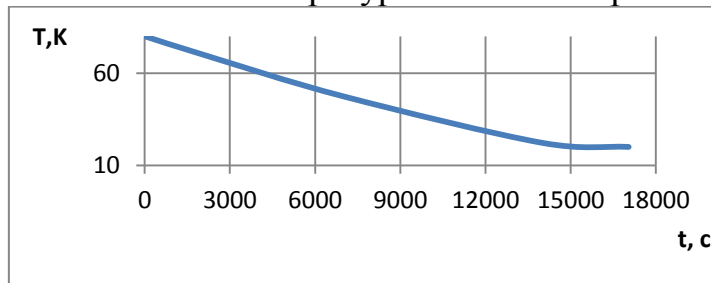


Рисунок 7. Зависимость температуры обечайки бака от времени в случае захолаживания от 80 К

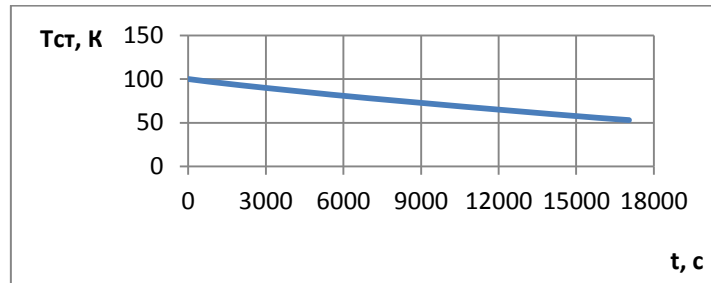


Рисунок 8. Зависимость температуры стыка силового кольца от времени

Таким образом получили, что время захолаживания бака газообразным гелием в интервале температур 80-20 К составит $17040/3600 \approx 5$ ч. В этом случае общее время охлаждения бака от нормальной температуры до температуры жидкого водорода составит всего 7 ч. Такой подход позволит

произвести захлаживание бака и последующие статические испытания в одну рабочую смену.

Таким образом, выполненные расчеты показали, что охлаждение крупногабаритных изделий газообразным гелием до температуры 20 К является осуществимой задачей.

Далее был проведен расчет захлаживания кислородного (метанового) бака с использованием газообразного азота по схеме, показанной на Рисунке 2.

Предположительно, в баке будут происходить следующие процессы: жидкий азот, попадая внутрь через верхнее отверстие бака, дробится об среду, отдельные капли начинают нагреваться и переходить в газообразное состояние. Таким образом, до низа бака доходит капельно-газовая смесь. Достигая стенок внизу бака смесь еще больше нагревается и начинает выталкиваться вверх за счет новых порций холодного азота и сил конвекции. Поднимаясь вверх пары азота охлаждают стенку и выходят через отверстие Ø100 мм в верхнем днище бака.

Бак имел следующие параметры: Ø4,1 м, высота бака с днищами ~ 5 м. Снаружи бак был покрыт теплоизоляцией ППУ-17 со средней толщиной 44 мм.

Считается, что процесс захлаживания стенки зависит от температуры азота на линии насыщения и высоты столба жидкого азота.

Таким образом, получается система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих тепловое состояние конструкции:

1. Для изотермических узлов алюминиевой конструкции:

$$C(T_i^{Al}) \cdot \rho(T_i^{Al}) \cdot \delta_{Al} \frac{\partial T_i^{Al}(\tau)}{\Delta \tau} = -\alpha_k^{вн}(T) \cdot (T_i^{Al} - T_r^i) + \frac{\lambda(T_i^{Al})}{h_{Al}} (T_{i+1}^{Al} - T_i^{Al}) + \frac{\lambda_{тзп}(T_i^{тзп})}{h_{тзп}} (T_i^{тзп} - T_i^{Al}); T_i^{Al}(0) = 20 \text{ К};$$

$$\alpha_k^{вн} = \frac{Nu_d \lambda_N}{d}.$$

Число Нуссельта находится из выражения:

$$Nu_l = 0,025 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left(1 + \left(\frac{d}{l}\right)^{0,7}\right).$$

2. Для изотермических узлов теплозащитного покрытия:

$$C(T_i^{тзп}) \cdot \rho(T_i^{тзп}) \cdot \delta_{He} \frac{\partial T_i^{тзп}}{\Delta \tau} = -\frac{\lambda_{тзп}(T_i^{тзп})}{h_{тзп}} (T_i^{тзп} - T_i^{Al}) + \varepsilon_i \sigma (T_i^{тзп4} - T_{ср}^4) - \alpha_k^{св} (T_i^{тзп} - T_{ср}).$$

3. Для изотермических узлов азота необходимо решить систему уравнений сохранения массы и энергии:

$$\frac{dV_{\Pi}^N}{d\tau} = \frac{G_{вх} - G_{вых} - \left(\frac{V_{\Pi}^N}{R^N T_i^N} \frac{dp_{\Pi}^N}{dT} - \frac{p_{\Pi}^N V_{\Pi}^N}{R^N T_i^{N2}} \right) \frac{dT_i^N}{d\tau}}{\rho_{\Pi}^N + \rho_{ж}^N};$$

$$\frac{dT_i^N}{d\tau} = \frac{G_{вх} C_{ж} T_{вх}^N - G_{вых} C_{\Pi} T_{вых}^N + w + T_i^N \frac{dV_{\Pi}^N}{d\tau} [C_{ж} \rho_{ж}^N + C_{\Pi} \rho_{\Pi}^N]}{C_{ж} \rho_{ж}^N (V - V_{\Pi}^N) + T_i^N \rho_{\Pi}^N V_{\Pi}^N \frac{dC_{\Pi}}{dT} + \left(\frac{C_{\Pi} T_i^N V_{\Pi}^N}{R^N T_i^N} \frac{dp_{\Pi}^N}{dT} + \frac{p_{\Pi}^N V_{\Pi}^N C_{\Pi} T_i^N}{R^N T_i^{N2}} \right)};$$

$$w = r_N \frac{\partial m_{\Pi}^N T_i^N}{\partial \tau} + \alpha_k^{вн} (T_i^{Al} - T_i^N) S_6.$$

Выражение для конвективного потока:

$$q_{\text{конв}}(T) = \alpha_{\text{ж}}(T) \cdot (T_{\text{Al}} - T_{\text{ж}}), \text{ если } T \leq T_{\text{нас}}$$

$$q_{\text{конв}}(T) = \alpha_{\text{п}}(T) \cdot (T_{\text{Al}} - T_{\text{п}}), \text{ если } T \geq T_{\text{нас}}, \text{ где}$$

h – энтальпия; r – теплота парообразования азота; $V_{\text{п}}$ – объем паровой фазы, $V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot H}{4 \cdot N}$, где $N=1\dots 7$ – количество узлов; $\rho_{\text{п}}$ – плотность паровой фазы; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкой фазы; $\alpha_{\text{ж}}$ – коэффициент теплоотдачи для жидкого азота; $\alpha_{\text{п}}$ – коэффициент теплоотдачи для газообразного азота (пара); $T_{\text{ж}}$ – температура жидкого азота; $T_{\text{п}}$ – температура газообразного азота (пара); $T_{\text{нас}}$ – температура насыщения для жидкого азота; T – текущая температура азота в баке; c_n – теплоемкость паровой фазы жидкого азота; $S_{\text{б}}$ – площадь поверхности бака.

Значения массового расхода азота при входе в бак и при выходе из бака находятся из выражений:

$$G_{\text{вх}} = F_{\text{вх}} \sqrt{2 \cdot \rho_{\text{N}_2} \cdot (p_{\text{вх}} - p_{\text{б}})},$$

где $F_{\text{вх}}$ – площадь входного отверстия, $p_{\text{вх}}$ – давление входного потока жидкого азота, $p_{\text{б}}$ – давление среды в баке.

Массовый расход газообразного азота на выходе из бака:

$$G_{\text{вых}} = \frac{F_{\text{вых}} \cdot p_{\text{б}}}{R \cdot T_{p_{\text{max}}}} f\left(\gamma, \frac{p_0}{p_{\text{б}}}\right),$$

где $f\left(\gamma, \frac{p_0}{p}\right)$ находится по формуле (1), $F_{\text{вых}}$ – площадь выходного отверстия, γ – показатель адиабаты азота, R – универсальная газовая постоянная, $p_{\text{б}}$ – давление в баке.

4. Для изотермических узлов силового кольца, сделанного из стали:

$$C_p(T_i^{\text{St}}) \cdot \rho(T_i^{\text{St}}) \cdot \delta_{\text{st}} \frac{\partial T_i^{\text{St}}}{\Delta \tau} = \frac{\lambda(T_i^{\text{St}})}{h_{\text{Al}}} (T_{i+1}^{\text{St}} - T_i^{\text{St}}) + \frac{\lambda(T_i^{\text{St}})}{h_{\text{Al}}} (T_i^{\text{St}} - T_i^{\text{Al}}) + \varepsilon_i \sigma (T_i^{\text{St}^4} - T_{\text{ср}}^4) - \alpha_{\text{к}}^{\text{сб}} (T_i^{\text{St}} - T_{\text{ср}}).$$

Результаты расчета показаны на Рисунке 9.

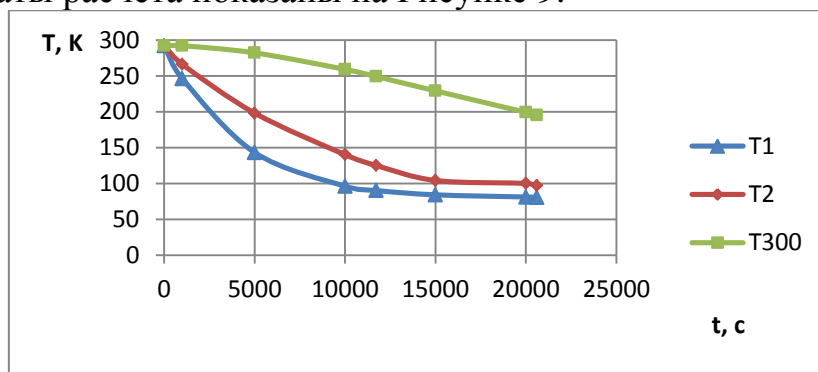


Рисунок 9. Зависимость от времени температуры стенки бака (T1), стыка бака с оснасткой (T2) и на расстояние 300 мм от стыка (T300)

Таким образом, время захлаживания стенки бака до температуры 80 К составит порядка 21000 с (~ 6 ч), до температуры 90 К (температура жидкого кислорода) составит порядка 11725 с (~ 3,5 ч), до температуры 112 К (температура жидкого метана) составит порядка 7600 с (~ 2,2 ч).

В третьей главе приводится обзор экспериментов, в которых проводились исследования захлаживания баков газообразным азотом различными методами, а именно: парами жидкого азота, парами жидкого азота путем сброса давления, азотной капельно-газовой смесью. Эксперименты показали, что наиболее эффективным методом захлаживания с точки зрения равномерности и скорости является метод захлаживания азотной капельно-газовой смесью, который и предлагается использовать при наземной экспериментальной отработке прочности кислородных и метановых баков.

Приводится описание экспериментального апробирования метода захлаживания баков парами жидкого азота. Захлаживанию были подвергнуты имитатор топливного бака РН сверхтяжелого класса и имитатор бака РН тяжелого класса. Подача азота осуществлялась как снизу бака, так и сверху для определения оптимального варианта.

При испытаниях имитатора бака диаметром 0,8 м подача азота осуществлялась только снизу. Распределение температуры вдоль обечайки представлено на Рисунке 10.

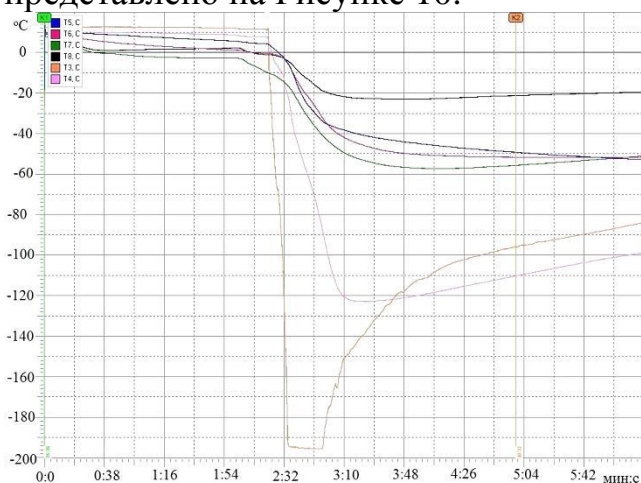


Рисунок 10. Зависимость температуры стенки маломасштабного имитатора бака от времени в процессе захлаживания

При частичном отрыве верхнего днища температура внешней стенки бака у верхнего днища опустилась от плюс 10 °C до минус 196 °C примерно за 12 с (самая нижняя кривая). Скорее всего это связано с кратковременным прохождением жидкого азота вдоль обечайки бака. Более низкая температура у верхнего днища объясняется следующим: при разгерметизации бака жидкостно-капельная азотная смесь с большой скоростью поднялась вверх и ударилась о препятствие — плоское верхнее днище, во время удара

произошло дробление жидкости на мелкие капли, которые, попав в район верхнего шпангоута, быстро его охладил до температуры жидкого азота.

Вполне вероятно, что в данный момент могло произойти пленочное кипение жидкого азота на стенке, которое, обладает очень интенсивной теплоотдачей. Разница показаний термопар по высоте бака составила 170 °C.

Дальнейшие исследования (схема по Рисунку 1) проводились на баке диаметром 4,1 м. Распределение температуры вдоль обечайки представлено на Рисунке 11. Разница показаний термопар по высоте бака составила около 70 °C.

Далее был исследован процесс захлаживания обечайки путем резкого сброса давления паров жидкого азота. Отличие от предыдущего способа заключалось в том, что изначально захлаживание бака происходило с закрытым вентилем дренажа, а затем по достижении определенного уровня внутреннего давления, созданного парами азота, дренажный вентиль резко

открывался. При этом наблюдалось более интенсивное охлаждение стенок бака по сравнению с охлаждением естественной конвекцией парами жидкого азота (Рисунок 12).

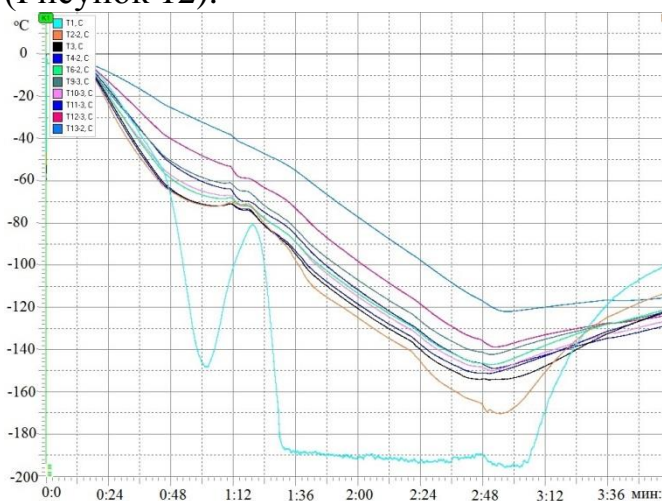


Рисунок 11. Зависимость температуры стенки бака от времени в процессе захлаживания парами жидкого азота

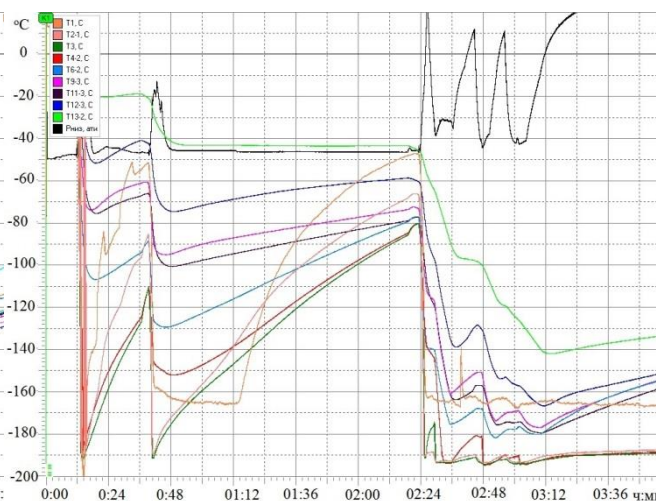


Рисунок 12. Зависимость температуры стенки бака от времени в процессе его захлаживания парами жидкого азота путем сброса давления

Также были проведены исследовательские испытания, в которых захлаживание заключалось в фонтанировании капельно-газовой смеси, истекающей из отверстия в верхней части бака на внутреннюю поверхность бака. При этом оказалось, что скорость захлаживания бака возросла примерно в 2 – 3 раза при меньших затратах азота (Рисунок 13).

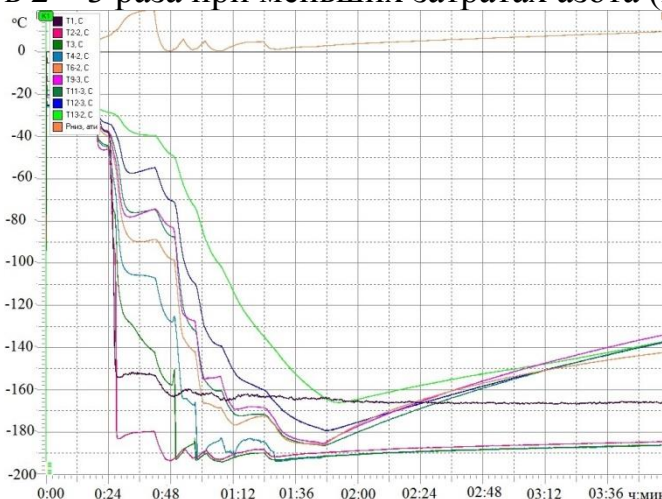


Рисунок 13. Зависимость температуры стенки бака от времени в процессе захлаживания парами жидкого азота со стороны верхнего днища

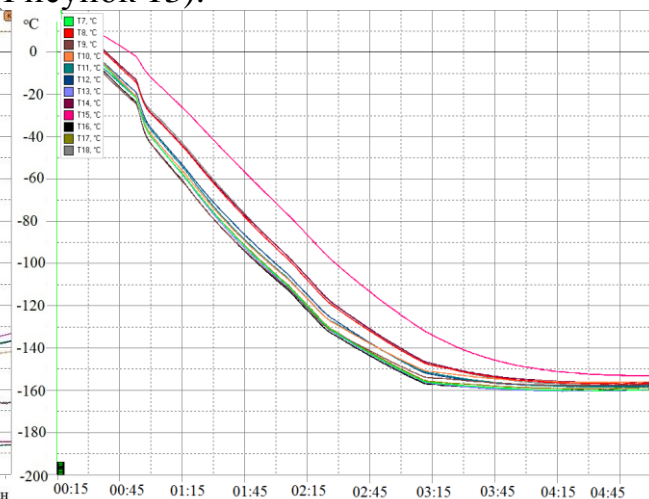


Рисунок 14. Зависимость температуры цилиндрической обечайки бака от времени в процессе захлаживания парами жидкого азота со стороны верхнего днища при имитации температуры жидкого метана

В четвертой главе приводится описание методики испытаний водородных и метановых баков на основе эффективных технологий

захолаживания крупногабаритных конструкций изделий РКТ. При проведении испытаний на прочность метановых баков предлагается использовать метод захолаживания азотной капельно-газовой смесью, а водородных баков – метод охлаждения холодным газообразным гелием, охлажденным в гелиевом рефрижераторе.

Приведена принципиальная схема гелиевой рефрижераторной установки, которую можно реализовать на предприятиях ракетно-космической отрасли для отработки прочности криогенных баков (Рисунок 15).

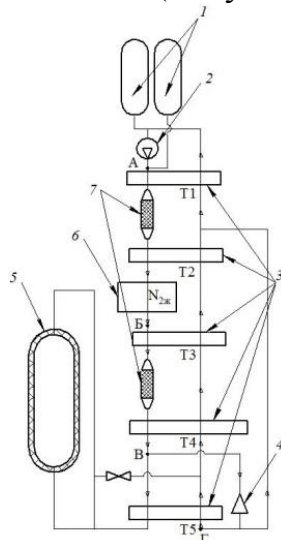


Рисунок 15. Принципиальная схема криогенной гелиевой системы
1 – ресивер, 2 – компрессор, 3 – теплообменник, 4 – турбодетандер, 5 – охлаждаемая емкость с теплоизоляцией, 6 – азотная ванна, 7 – адсорбер

Даны рекомендации по использованию измерительных средств при проведении криогенно-статических испытаний. Приведена схема измерительной системы.

В конце главы предложены способы защиты испытательного оборудования и боксов от пагубного воздействия низких температур и динамического воздействия, которое может возникнуть при разрушении баков.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена задача по разработке методов захолаживания газообразными хладагентами криогенных топливных баков ракет космического назначения для повышения их конструктивно-массового совершенства путем задания истинного напряженно-деформированного состояния при испытаниях. Достоверность и практическая ценность разработанных методов захолаживания подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями и разработанными на их основе нормативными документами.

1. Проанализированы существующие методы охлаждения конструкций жидкими и газообразными хладагентами. Сформулированы предложения по использованию того или иного метода при отработке криогенно-статической прочности конкретных классов изделий РКТ.

2. Разработаны методы, минимизирующие затраты на обеспечение точной имитации эксплуатационной температуры криогенных топливных баков

ракет-носителей и разгонных блоков при их прочностных испытаниях, а именно: метод захлаживания с использованием газообразного гелия; метод захлаживания азотной капельно-газовой смесью; метод захлаживания парами жидкого азота путем сброса давления.

3. Разработана физико-математическая модель теплового состояния криогенных баков для предложенных методов захлаживания при их прочностных испытаниях с учетом протекания нестационарных процессов. Результаты расчетов показали, что охлаждение топливных баков газообразным хладагентом является реализуемой на практике технологией с продолжительностью захлаживания, сопоставимой с продолжительностью захлаживания традиционным методом заливкой жидкого азота.

4. Экспериментально доказана эффективность захлаживания баков азотной капельно-газовой смесью, а также парами жидкого азота путем сброса давления с точки зрения снижения затрат и времени подготовки к испытаниям по сравнению с традиционным подходом. Эксперименты показали, что погрешность имитации эксплуатационных температур не превышает 4 °С, при этом затраты жидкого азота при применении разработанных методов до 20-ти раз ниже, чем при использовании традиционного метода – заливки жидкого азота. Методы рекомендуются к применению при отработке кислородных и метановых баков ракет космического назначения среднего и тяжелого классов.

5. На основе полученных результатов, теоретических и экспериментальных данных разработаны методики захлаживания метанового, кислородного и водородного баков ракет космического назначения. Предложены меры защиты испытательных боксов и испытательного оборудования от разрушительного воздействия пониженных температур и хладагентов при проведении испытаний.

6. Результаты работы найдут применение при отработке криогенно-статической прочности конструкций в предприятиях ракетно-космической отрасли. Часть разработанных методов внедрено в АО «ЦНИИмаш». Выпущен стандарт организации «Имитация эксплуатационных температур и внутреннего давления при статических прочностных испытаниях сборок кислородных и метановых топливных баков ракет-носителей среднего и тяжелого классов».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Юранев О.А., Васюкова Д.А., Колоезный А.Э. Квалификация способов расчета захлаживания крупногабаритной испытательной сборки «криогенного» топливного бака РКН при свободной конвекции газообразного хладагента // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2015. № 7. С. 18-24. (0,44 п.л./0,16 п.л.)

2. Юранев О.А., Васюкова Д.А., Колоезный А.Э. Эффективный подход к проведению зачетных прочностных испытаний криогенных баков перспективных средств выведения // Авиакосмическая техника и технология. 2013. № 1. С. 23-25. (0,19 п.л./0,06 п.л.)

3. Юранев О.А., Васюкова Д.А., Колоезный А.Э. Использование криогенной гелиевой системы для имитации эксплуатационных температур при

испытаниях на прочность // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 2 (67). С. 179-186. (0,5 п.л./0,17 п.л.)

4. Юранев О.А. Исследования различных способов захлаживания криогенных топливных баков изделий ракетно-космической техники // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 3. С. 64-71. (0,5 п.л./0,5 п.л.)

5. Юранев О.А., Борщев Н.О. Теоретическая оценка времени захлаживания бака жидкого водорода при испытаниях // «Известия высших учебных заведений. Машиностроение». 2021. № 12 (741). С. 83-90. (0,5 п.л./0,25 п.л.)

6. Юранев, О.А., Васюкова Д.А., Колозезный А.Э. Расчетное обоснование использования криогенной гелиевой установки для имитации эксплуатационных температур при испытаниях на прочность криогенных топливных баков ракет космического назначения // Инновационный арсенал молодежи: труды третьей научно-технической конференции ФГУП «КБ «Арсенал». – СПб. 2012. С. 280-282. (0,19 п.л./0,06 п.л.)

7. Методологические основы научных исследований при обосновании направлений космической деятельности, облика перспективных космических комплексов и систем и их научно-технического сопровождения: В 5 томах. Т.5: Методология исследований прочности и динамики ракет-носителей и космических аппаратов / О.А. Юранев [и др.] М.: «Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2016. 376 с. (0,05 п.л./0,01 п.л.)

8. Юранев О.А. Эффективный подход к проведению зачетных прочностных испытаний криогенных баков перспективных средств выведения / О.А. Юранев [и др.] // Тезисы докладов Седьмого международного аэрокосмического конгресса IAC'12. Москва. 2012. С. 44. (0,06 п.л./0,02 п.л.)

9. Юранев О.А. Исследования различных способов захлаживания криогенных баков // Наука и технологии. Том 4. Материалы XXXVIII Всероссийской конференции, посвященной 75-летию Южно-Уральского государственного университета. М.: РАН, 2018. 49 с. (0,06 п.л./0,06 п.л.)

10. Юранев, О.А. Использование газообразных хладагентов для имитации эксплуатационных температур «криогенных» топливных баков РН с целью повышения эффективности экспериментальной отработки их прочности: Труды 64-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Аэрокосмические технологии / сост.: К.С. Слободчук, Ю.А. Борисов / Московский физико-технический институт. – Москва: МФТИ, 2021. 355 с.: ил. С. 121-122 (0,13 п.л./0,13 п.л.)

11. Юранев О.А., Белявский А.Е., Борщев Н.О. Оценка времени захлаживания криогенного бака азотной парожидкостной смесью // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 9 (750). С. 116-125. (0,6 п.л./0,2 п.л.)

12. Юранев О.А., Денискина А.Р., Борщев Н.О. Идентификация эффективных теплофизических характеристик по результатам экспериментов для криогенного уровня температур // Ученые записки ЦАГИ. 2023. № 1. Том LIV. С. 38-45. (0,5 п.л./0,2 п.л.)