

Оригинальная статья / Original article

УДК 621.59:621.643

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-95-108>

Исследование процесса захолаживания криогенных трубопроводов жидким водородом для оптимизации огневых испытаний ракетных двигателей

О.В. Калядин^{1✉}, А.В. Сергеев¹, А.А. Гребенников¹, К.Г. Королев¹,
М.А. Авдеев¹, А.Ю. Лопатин¹

¹ Воронежский государственный технический университет
ул. 20-летия Октября, д. 84, г. Воронеж 394006, Российская Федерация

✉ e-mail: kaljadin@gmail.com

Резюме

Цель. Разработка математической модели, адекватно описывающей нестационарный процесс захолаживания длинных криогенных магистралей жидким водородом и позволяющей определять оптимальные режимные параметры, обеспечивающие минимальный расход хладагента при подготовке к огневым испытаниям жидкостных ракетных двигателей.

Методы. В качестве объекта моделирования использовался трубопровод в экранно-вакуумной изоляции, выполненный из стали 12Х18Н10Т, общей протяженностью 272,5 м, с диаметром проходного сечения 96 мм и толщиной стенки 2 мм. Суммарная масса запорного оборудования, размещенного на магистрали, составляет 246 кг. В трубопровод под избыточным давлением 0,2 МПа подается жидкий переохлажденный водород, имеющий температуру на входе 19 К. Температура окружающей среды составляет 293 К.

Результаты. В данной работе предложена модель охлаждения длинных изолированных трубопроводов при протекании по ним жидкого водорода, позволяющая определять параметры потока в различные моменты времени и оценивать время выхода магистрали в рабочий режим. На основе предложенной модели был разработан автоматизированный алгоритм расчета процесса охлаждения длинного трубопровода криогенными компонентами, позволяющий получать данные для построения температурных полей стенок трубопровода и потока транспортируемого криопродукта в различные моменты времени, а также определять время выхода магистрали в рабочий режим и момент наступления стационарного течения однофазного потока. Результаты проведенного расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Заключение. Используя данную модель при различных начальных и граничных условиях, можно отработать оптимальный режим протекания реальных физических процессов и добиться минимальных потерь криогенных компонент при минимальных временных затратах при подготовке стендовых систем к огневым испытаниям как одного из этапов производственного цикла ЖРД в машиностроении.

Ключевые слова: жидкий водород; математическая модель; длинный трубопровод.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Исследование процесса захолаживания криогенных трубопроводов жидким водородом для оптимизации огневых испытаний ракетных двигателей / О.В. Калядин, А.В. Сергеев, А.А. Гребенников, К.Г. Королев, М.А. Авдеев, А.Ю. Лопатин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 4. С. 95–108. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-95-108>.

Поступила в редакцию 10.11.2025

Подписана в печать 02.12.2025

Опубликована 25.12.2025

Investigation of the process of cooling cryogenic pipelines with liquid hydrogen to optimize firing tests of rocket engines

Oleg V. Kalyadin^{1✉}, Alexander V. Sergeev¹, Anton A. Grebennikov¹,
Konstantin G. Korolev¹, Mikhail A. Avdeev¹, Artem Yu. Lopatin¹

¹ Voronezh State Technical University
20-letiya Oktyabrya Str. 84, Voronezh 394006, Russian Federation

✉ e-mail: ms.chuhaeva@mail.ru

Abstract

Purpose. Development of a mathematical model that adequately describes the non-stationary process of cooling long cryogenic pipelines with liquid hydrogen and makes it possible to determine optimal operating parameters that ensure minimal refrigerant consumption in preparation for firing tests of liquid rocket engines.

Methods. A vacuum-insulated pipe made of cryogenic steel with a total length of 272.5 m, with a bore diameter of 96 mm and a wall thickness of 2 mm was used as the modeling object. The total weight of the shut-off equipment located on the main line is 246 kg. Liquid supercooled hydrogen with an inlet temperature of 19 K is supplied to the pipeline under an excess pressure of 0.2 MPa. The ambient temperature is 293 K.

Results. In this paper, we propose a model for cooling long insulated pipelines when liquid water flows through them, which makes it possible to determine the flow parameters at various points in time and estimate the time when the main line enters operating mode. Based on the proposed model, an automated algorithm was developed for calculating the cooling process of a long pipeline with cryogenic components, which makes it possible to obtain data for constructing the temperature fields of the pipeline walls and the flow of transported cryoproducts at various time points, as well as to determine the time when the main line enters operation and the moment of the onset of a stationary single-phase flow. The results of the calculation are in good agreement with the experimental data.

Conclusion. Using this model under various initial and boundary conditions, it is possible to work out the optimal mode of real physical processes and achieve minimal losses of cryogenic components with minimal time spent in preparing bench systems for fire tests, as one of the stages of the production cycle of liquid propellants in mechanical engineering.

Keywords: liquid hydrogen; mathematical model; long pipeline.

Conflict of interest: The Authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Kalyadin O.V., Sergeev A.V., Grebennikov A.A., Korolev K.G., Avdeev M.A., Lopatin A.Yu. Investigation of the process of cooling cryogenic pipelines with liquid hydrogen to optimize firing tests of rocket engines. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(4):95-108. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-4-95-108>.

Received 10.11.2025

Accepted 02.12.2025

Published 25.12.2025

Введение

Современное производство жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) характеризуется исключительно высокими требованиями к надежности и, как следствие, к тщательности их экспериментальной отработки.

Одними из этапов машиностроительного цикла являются различные виды испытаний изделия, которые позволяют оценить прочностные характеристики, тепло

физические процессы, гидравлику и герметичность, надежность и ресурс. Испытания – это сложный измерительный, технологический процесс, интегрированный в производство. Проведение огневых испытаний является обязательным и наиболее ресурсоемким этапом в цикле производства ЖРД. Согласно экспертным оценкам, подтвержденным практикой ведущих предприятий двигателестроения, доля затрат на проведение огневых испытаний

может достигать 20–35% от общей стоимости производства двигателя. В общей структуре этих затрат можно выделить прямые (капитальные 40–60% и операционные 30–50%) и косвенные (накладные 10–20%) расходы¹. При этом величина операционных затрат на криогенное топливо определяется в том числе длительностью проведения испытаний и может составлять до 5% от общих расходов на огневые испытания, что в абсолютных значениях измеряется сотнями миллионов рублей [1].

Значительную часть этих затрат составляют расходы на криогенные компоненты топлива, подготовку и проведение испытаний. Ключевой операцией в цикле подготовки водородосодержащих ЖРД к огневым испытаниям является процесс захолаживания протяженных криогенных трубопроводов и магистралей подачи жидкого водорода. Данный процесс необходим для приведения элементов системы в термодинамически стабильное состояние, исключающее вскипание компонента при запуске двигателя. Также непредсказуемые флюктуации потока при охлаждении трубопроводов жидким водородом создают экстремальные нагрузки на сам трубопровод и требуют эффективных методов управления процессом охлаждения². Однако существующие, зачастую консервативные, регламенты захолаживания приводят к значительным и неоптимизированным потерям дорогостоящего жидкого водорода, который сбрасывается в атмосферу через системы слива и сброса давления [2]. Как показали исследования NASA³, эмпирические зависимости для

кипения при охлаждении трубопроводов жидкими криоагентами требуют серьёзного уточнения [3]. В международной практике (в частности, в работах NASA) в последние годы активно развиваются полуэмпирические корреляции и численные модели процессов захолаживания криогенных линий, включая случаи двухфазного течения и нестационарного теплообмена. В отечественной школе накоплен фундаментальный задел по гидродинамике газожидкостных систем и криогенным системам, используемый как базис для инженерных расчётов протяжённых магистралей. Настоящая работа развивает прикладной инженерный подход к оценке интегральных характеристик процесса (время захолаживания, температурные поля) для задач оптимизации режимов подготовки испытательных стендов. В связи с этим за последние годы активно разрабатываются новые модели и корреляции.

Таким образом, задача разработки математической модели, адекватно описывающей нестационарный процесс захолаживания длинных криогенных трубопроводов, является не только научно-технической, но и прямой экономической задачей. Эффективное управление этим процессом позволит существенно снизить материальные затраты на каждом цикле испытаний.

В представленной работе предложена математическая модель, описывающая процесс захолаживания длинных криогенных трубопроводов жидким водородом. Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной модели для:

¹ NASA's Management of the Artemis Missions (IG-22-003) // NASA OIG: [site]. 2022. URL: <https://oig.nasa.gov/office-of-inspector-general-oig/ig-22-003/> (дата обращения: 07.11.2025).

² Cryogenic heat transfer by a nanoporous surface: patent US 10209017B2. Appl. 29.07.2014; publ. 19.02.2019.

³ Universal two-phase convection heat transfer correlations for cryogenic pipe chilldown / S.R. Darr, M.E. Taliaferro, J.W. Hartwig, H. Wang, B.H. Huang, J.N. Chung // NASA Technical Reports Server. 2023.

- разработки оптимальных технологических регламентов захолаживания испытательных стендов и систем;
- снижения прямых материальных затрат на приобретение жидкого водорода;
- сокращения времени подготовки к проведению огневых испытаний.

В результате это способствует снижению совокупной стоимости огневых испытаний и производства ЖРД в целом.

Материалы и методы

Перед достижением криогенными продуктами заданных расходных и температурных параметров осуществляется стадия охлаждения магистралей. Данный процесс может проводиться с использованием как жидкой, так и газообразной фазы хладагента. Критериями выбора фазового состояния служат: функциональное назначение системы, требования к длительности и динамике переходных режимов, а также допустимые уровни термических напряжений в конструктивных элементах. В системах, работающих с жидкими криогенными компонентами, охлаждение, как правило, выполняется непосредственно этими продуктами [4]. На стадии охлаждения стенок трубопроводов наблюдается активное парообразование, что объясняется значительным превышением начальной температуры стенок (близкой к температуре окружающей среды) не только над температурой насыщения T_s , но и над предельной температурой перегрева T_{pp} , определяющей верхнюю границу существования жидкости. Таким образом, при высокой температуре стенок криогенная жидкость в пристеночной области не может находиться в стабильном жидком состоянии и практически мгновенно испаряется.

Особенности тепловых и гидродинамических процессов в период охлаждения, а также невозможность обеспечения на выходе требуемых параметров продукта позволяют выделить эту стадию в

отдельный этап в общем цикле эксплуатации криогенных трубопроводов [5]. На структуру потока в трубах влияет целый ряд факторов [6]: скорость потока, расходное и истинное паросодержание, относительная плотность фаз, вязкость жидкости, диаметр трубы, смачиваемость стенок жидкостью, пространственная ориентация трубы и др. [7]

При подаче криогенных жидкостей в теплые магистрали их стенки устойчиво блокируются паровой пленкой, т. е. реализуется пленочное кипение. С понижением температуры стенок ниже температуры предельного перегрева T_{pp} создаются предпосылки для кризиса пленочного кипения, т. е. так называемого второго кризиса, а также для замены его сначала переходным, а затем пузырьковым кипением, которое, в свою очередь, вырождается в конвективный теплообмен при приближении температуры стенки трубы к температуре насыщения. В процессе охлаждения трубопроводов кипение криогенных жидкостей происходит при различных режимах течения парожидкостной смеси [8]. В случае пленочного кипения в пристеночной зоне формируется паровая пленка, а соответствующие режимы движения двухфазного потока называют обращёнными. Наиболее типичными для условий охлаждения являются обращённые стержневой, снарядный и дисперсный режимы. Когда температура стенки снижается до уровня, обеспечивающего её смачивание жидкостью, обращённые режимы сменяются обычными, для которых характерно присутствие жидкой фазы у стенки. Охлаждение и заполнение протяжённых криогенных магистралей сопровождается колебаниями расхода и давления, вызванными активным парообразованием.

Экспериментальные исследования [9] показывают, что при течении недогретой жидкости паровая пленка имеет столь малую толщину, что практически не оказы-

вает значительного сопротивления движению жидкой струи. Более того, наличие паровой прослойки способствует снижению касательных напряжений благодаря тому, что вязкость пара на порядок ниже вязкости жидкости. По мере продвижения по трубопроводу жидкость нагревается, что приводит к росту давления и снижению скорости заполнения. При достаточной протяжённости магистрали головная часть жидкости на определённом участке достигает температуры насыщения, соответствующей давлению в резервуаре, и поступление жидкости в трубопровод прекращается. Одновременно нагрев жидкости и увеличение паросодержания приводят к разрушению стержневой структуры потока.

При достижении жидкостью состояния насыщения (когда температура жидкости достигает температуры кипения T_s при данном давлении) практически весь тепловой поток от стенок расходуется на испарение. Скорость генерации пара и, как следствие, давление в трубопроводе продолжают возрастать, даже после прекращения подачи новой порции жидкости. Давление в магистрали может в 1,5–2 раза и более превышать давление на входе. В дальнейшем по мере испарения оставшейся жидкости, отвода пара и частичного возврата жидкости в сосуд интенсивность парообразования снижается, и через некоторое время создаются условия для поступления следующей порции хладагента. Это поступление вызывает менее значительный рост давления, поскольку в трубопроводе сохраняется повышенное давление и остаётся часть жидкости. В течение всего периода охлаждения и заполнения протяжённых магистралей наблюдаются колебания расхода и давления, ам-

плитуда которых существенно меньше, чем в первом цикле¹.

Анализ экспериментальных данных показывает, что стационарный расход жидкости наступает практически одновременно с охлаждением стенки. Жидкость на выходе из трубопровода появляется несколько раньше, чем труба полностью охладится, и некоторое время из трубопровода выходит парожидкостная смесь.

Весь период охлаждения τ можно условно разделить на два этапа: первый этап τ_1 – от начала подачи жидкости до появления парожидкостной смеси на выходе и второй этап τ_2 – от момента появления парожидкостной смеси на выходе до полной реализации теплового ресурса стенки и установления стационарного расхода. Соотношение между продолжительностью отдельных этапов и общим временем охлаждения (как и между длиной зоны испарения и общей длиной трубопровода) может быть самое разное. В соответствии с соотношением длительности отдельных стадий охлаждения трубопроводы можно классифицировать на три типа: длинные, средние и короткие. Для длинных трубопроводов характерно, что момент появления жидкости на выходе практически совпадает с временем полного охлаждения, а их протяжённость существенно превышает длину зоны испарения, т. е. $\tau \approx \tau_1, l_i \ll l$. В средних трубопроводах продолжительность отдельных этапов соизмерима. Зона испарения в таких магистралях в начальный период охлаждения несколько меньше общей длины, но по мере снижения температуры стенок увеличивается и через некоторое время может превзойти длину трубопровода, т. е.

1. Способ объемного тушения пожара и устройство для его реализации: патент 2253492 / Каришин В.В., Зарецкий Р.Ю.

№ 20041013641/12; заявл. 21.01.2004; опубл. 10.06.2005, Бюл. № 16.

$\tau \approx \tau_1 + \tau_2$, $l_u \approx l$. В коротких трубопроводах время появления жидкости на выходе пренебрежимо мало по сравнению с полным временем охлаждения $\tau \approx \tau_2$ и $l_u > l$; длина таких трубопроводов с самого начала недостаточна для полного испарения жидкости [1].

Ключевым параметром, влияющим на соотношение длительности этапов охлаждения и общего времени процесса, является относительная длина трубопровода l/D . Согласно анализу экспериментальных данных, полученных для азота и кислорода, к длинным трубопроводам относятся магистрали длиной более $(1,5-2) \cdot 10^3$ калибров, а к коротким – менее $0,5 \cdot 10^3$ калибров [1].

В практике создания крупных криогенных систем длина основных магистралей превышает несколько тысяч калибров и охлаждение длинных трубопроводов представляет наибольший практический интерес.

В начальный момент транспортировки стенки трубопровода имеют температуру, существенно превышающую температуру насыщения криогенных жидкостей, что приводит к частичному или полному их испарению на выходе из магистрали. Особенности теплового и гидродинамического режимов в период охлаждения, а также невозможность поддержания требуемых выходных параметров продукта обосабливают эту стадию от общего цикла эксплуатации криогенных трубопроводов.

При подаче криогенных жидкостей по нагретым магистралям, сопровождающейся испарением, распределение температуры в стенке и характеристики потока находятся решением системы уравнений, описывающих изменение параметров на участках с однофазным и двухфазным течением. Получение точного решения сопряжено со значительными трудностями,

поскольку характер взаимодействия и взаимного движения жидкой и газовой фаз значительно сложнее и разнообразнее по сравнению с гомогенными потоками. Дискретные объемы каждой из фаз – пузыри и капли – содержат достаточно большое число молекул, и внутри любого объема движение среды может быть определено обычными дифференциальными уравнениями: сплошности, движения и энергии. Однако в двухфазных потоках, помимо внешних границ, обусловленных стенками канала, имеются внутренние поверхности раздела фаз, которые переменны во времени и пространстве. На поверхности раздела возникают силовые и тепловые взаимодействия, и поэтому совместное рассмотрение уравнений гидродинамики каждой из фаз необходимо дополнить уравнениями, отражающими механическое и тепловое взаимодействие фаз на границах раздела. Одна из особенностей двухфазных течений заключается в многообразии и сложности характера форм движения двухфазных потоков. С практической точки зрения, помимо определения потерь жидкости, не менее интересной задачей является оценка времени полного охлаждения криогенных магистралей и установление стационарного расхода продукта.

Для расчета времени охлаждения магистралей необходимо решить систему дифференциальных уравнений неразрывности, движения и энергии потока, а также теплопроводности для стенок с различными граничными условиями на внутренней и наружной поверхностях трубы. В том случае, когда охлаждение трубопровода осуществляется однофазным потоком, в качестве исходных уравнений используются следующие выражения:

– уравнение неразрывности потока

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho W)}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

– уравнение движения

$$-\frac{\partial R}{\partial z} - \frac{4\sigma}{d_{\text{вн}}} = \rho \frac{\partial W}{\partial \tau} + \rho W \frac{\partial W}{\partial z}; \quad (2)$$

– уравнение энергии

$$\rho \frac{\partial i}{\partial \tau} + \rho W \frac{\partial i}{\partial z} = \frac{4q}{d_{\text{вн}}}; \quad (3)$$

– уравнения теплопроводности для стенок трубы:

$$\frac{\partial T_w}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_w}{\partial R} \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \right); \quad (4)$$

$$\lambda_w \frac{\partial T_w(R_{\text{вн}}\tau)}{\partial R} = q_{\text{вн}} = a(T_w(R_{\text{вн}}\tau) - T); \quad (5)$$

$$-\lambda_w \frac{\partial T_w(R_{\text{внеш}}\tau)}{\partial R} = q_{\text{внеш}}, \quad (6)$$

где $q_{\text{вн}}$ и $q_{\text{внеш}}$ – плотности тепловых потоков на внутренней и наружной поверхности трубы; $R_{\text{вн}}$ и $R_{\text{внеш}}$ – внутренний и наружный радиусы трубы; T_w и T – температура стенки и потока.

При описании процесса охлаждения тонкостенных изолированных магистралей потоком криогенной жидкости с частичным или полным испарением сохраняется форма записи уравнения теплопроводности для стенок трубы (4) – (6), но изменяются уравнения неразрывности (7), движения (8) и энергии для потока (9) в связи с образованием парожидкостной смеси:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} ((1-\varphi)\rho_{\text{ж}} + \varphi\rho_{\text{р}}) + \frac{\partial}{\partial z} + ((1-\varphi)\rho_{\text{ж}}W_{\text{ж}} + \varphi\rho_{\text{р}}W_{\text{р}}) = 0; \quad (7)$$

$$g((1-\varphi)\rho_{\text{ж}} + \varphi\rho_{\text{р}}) - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{4\sigma}{D} = \\ = (1-\varphi)\rho_{\text{ж}} \frac{\partial W_{\text{ж}}}{\partial \tau} + \varphi\rho_{\text{р}} \frac{\partial W_{\text{р}}}{\partial \tau} + \\ + (1-\varphi)\rho_{\text{ж}}W_{\text{ж}} \frac{\partial W_{\text{ж}}}{\partial \tau} + \varphi\rho_{\text{р}}W_{\text{р}} \frac{\partial W_{\text{р}}}{\partial \tau} + \\ + (W_{\text{р}} - W_{\text{ж}}) \left(\frac{\partial}{\partial \tau} (\varphi\rho_{\text{р}}) + \frac{\partial}{\partial z} (\varphi\rho_{\text{р}})W_{\text{р}} \right); \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} ((1-\varphi)\rho_{\text{ж}}i_{\text{ж}} + \varphi\rho_{\text{р}}i_{\text{р}}) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} ((1-\varphi)\rho_{\text{ж}}i_{\text{ж}}W_{\text{ж}} - \varphi\rho_{\text{р}}i_{\text{р}}W_{\text{р}}) = \frac{4q}{d_{\text{вн}}}, \quad (9)$$

где φ – объемное паросодержание потока (на участке испарения $0 < \varphi < 1$, на участке газового течения $\varphi = 1$); q – плотность теплового потока на внутренней поверхности трубы; C – касательное напряжение на стенке.

Однако система уравнений остается незамкнутой, и для ее решения необходимы дополнительные экспериментальные зависимости, отражающие взаимосвязь объемного паросодержания, скоростей каждой из фаз, касательных напряжений на стенке, температуры паровой фазы и стенок, интенсивности теплоотдачи от стенок к продукту. Такие зависимости получены только для некоторых частных случаев и не имеют универсального характера из-за сложной природы двухфазных потоков. Отсутствие замыкающих закономерностей достаточно общего характера делает невозможным решение системы исходных уравнений. Например, расчёты охлаждения магистралей в программном комплексе GFSSP (NASA) качественно воспроизводят динамику изменения температуры стенки, но могут заметно расходиться с измеренной температурой потока без специальной калибровки модели [10]. В связи с этим методы определения характеристик процесса охлаждения трубопроводов при подаче в них криогенных жидкостей основаны на экспериментальных исследованиях и получении на их основе полуэмпирических и эмпирических соотношений.

В рамках настоящего исследования для приближённого решения поставленной задачи была использована гомогенная модель [11]. Основные ее допущения состоят в предположении равенства линейных скоростей пара и жидкости, термодинамического равновесия фаз, применимости к двухфазному течению зависимостей,

полученных для определения коэффициента трения однофазного потока [12]. Это позволяет представить двухфазный поток в виде квазиоднородной среды, удельный объём в каждом сечении которой определяется массовым паросодержанием и удельными объёмами каждой из фаз, т. е.

$$\bar{V}_{\text{см}} = \bar{V}_{\text{ж}}(1-\varphi) + \bar{V}_{\text{г}}\varphi. \quad (10)$$

В этом случае в качестве расчетной может быть использована система уравнений (1)–(6).

Также принимается, что массовая скорость потока известна, теплопроводность стенки равна нулю в направлении движения и бесконечно велика в направлении нормали. Кроме того, рассматривается идеальная теплоизоляция внешней поверхности, исключающая приток тепла из окружающей среды. Данные упрощения (имеющие обоснование с инженерной точки зрения) позволяют значительно упростить исходную систему уравнений и её решение.

С учетом вышесказанного и принимая во внимание, что $di = c_p dT$, преобразуем систему (1)–(6) к виду

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{4\alpha(T_w - T)}{\rho_r c_{pr} d_{bh}}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial \tau} + \frac{\alpha(T_w - T)}{\rho_w c_{pw} \delta} = 0. \quad (12)$$

В качестве граничных условий задается распределение температуры в газе и стенке в начальный момент времени и температура газа на входе: $T(0, z) = f(z)$; $T_w(0, z) = \varphi(z)$; $T(\tau, 0) = \psi(\tau)$.

Входящий в систему коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda_{\delta_r}}{d_{bh}} \text{Nu}, \quad (13)$$

где число Нуссельта с учетом гомогенной модели потока [13]:

$$\text{Nu} = 0,0065 Re^{0,8} \left(\frac{c_{pr} \cdot (T_0 - T_{bx})}{r} \right)^{-1/6}. \quad (14)$$

Система дифференциальных уравнений первого порядка в частных производных при произвольных граничных и начальных условиях может быть решена численными или аналитическими методами. Применение последних возможно, когда система уравнений и граничные условия являются линейными или хотя бы допускают линеаризацию.

Полученные в результате решения системы функциональные зависимости характеризуют распределение температур стенки и потока для любого момента времени в каждом сечении трубопровода. Используя их, можно оценивать время захолаживания как произвольного участка магистрали, так и всего трубопровода в целом. Кроме того, полученные зависимости, построенные для различных моментов времени, могут быть использованы для вычисления текущего значения средней температуры стенки

$$T_{ws} = \frac{1}{L_{3ax}} \int_0^{L_{3ax}} T_w(z) dz, \quad (15)$$

и построения кривых изменения средней температуры $T_{ws}(\tau)$ и теплового ресурса стенок $Q_w(\tau)$ в любом сечении при различных начальных условиях

$$Q_w(\tau) = (T_{ws}(\tau) - T) c_{pw}(T_{ws}) \rho_w \delta. \quad (16)$$

Предложенная модель ориентирована на расчёт теплообмена на прямых участках магистралей. Влияние местных гидравлических сопротивлений (изгибы, запорная арматура) в явном виде не моделируется. Для практического применения модели к конкретным трубопроводам сложной конфигурации влияние таких элементов может быть учтено через корректировку (калибровку) эквивалентного коэффициента гидравлического сопротивления на основе натурных или эталонных данных.

Результаты и их обсуждение

На основе предложенной модели был разработан автоматизированный алгоритм расчета процесса охлаждения длинного трубопровода криогенными компонентами при подготовке стеновых систем к огневым испытаниям [14]. В качестве объекта моделирования был взят трубопровод в экранно-вакуумной изоляции, выполненный из стали 12Х18Н10Т общей протяженностью 272,5 м, с диаметром проходного сечения 96 мм и толщиной стенки 2 мм. Суммарная масса запорного оборудования, размещенного на магистрали, составляет 246 кг. В трубопровод под избыточным давлением 0,2 МПа пода-

ется жидкий переохлажденный водород [15], имеющий температуру на входе 19 К. Температура окружающей среды составляет 293 К.

В ходе расчётов установлены закономерности изменения температуры как жидкого водорода, так и стенки трубопровода вдоль его длины в различные моменты времени. Эти зависимости для ряда характерных сечений и временных точек представлены на рисунках 1–2. Визуализация результатов обеспечивает наглядный анализ динамики захолаживания и позволяет оценить время, требуемое для достижения трубопроводом полностью охлаждённого состояния.

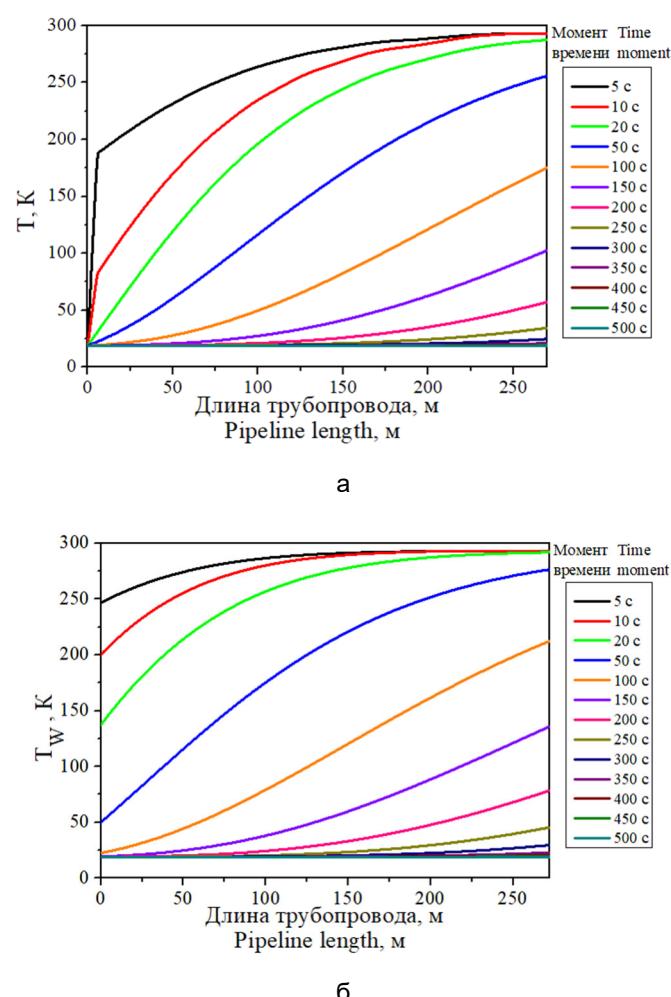


Рис. 1. Распределение температуры потока (а) и стенки (б) по длине трубопровода в различные моменты времени

Fig. 1. Temperature distribution of the flow (a) and the wall (б) along the pipeline length at different times

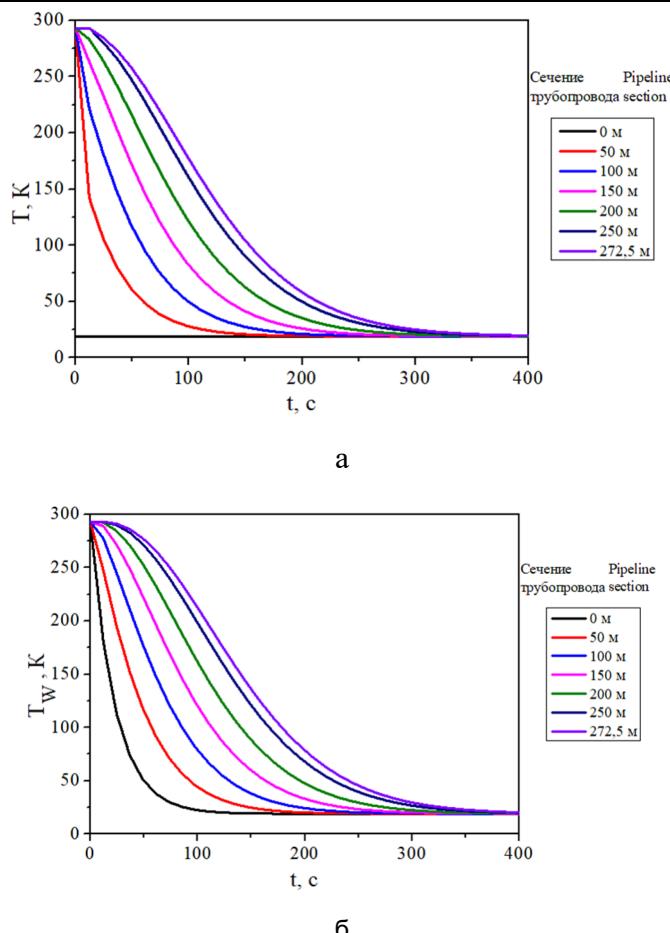


Рис. 2. Временная зависимость температуры потока (а) и стенки (б) в различных сечениях трубопровода

Fig. 2. Time dependence of the flow (a) and wall (b) temperature at different pipeline cross-sections

Используя построенные для различных моментов времени температурные поля по длине охлаждаемых труб (см. рис. 2) $T_w = T_w(z)$, можно вычислить текущее значение средней температуры стенки по

формуле (15). На рисунке 3 представлена временная зависимость средней температуры стенки по длине трубы $T_{ws}(\tau)$. Она наглядно иллюстрирует процесс захолаживания трубопровода в целом.

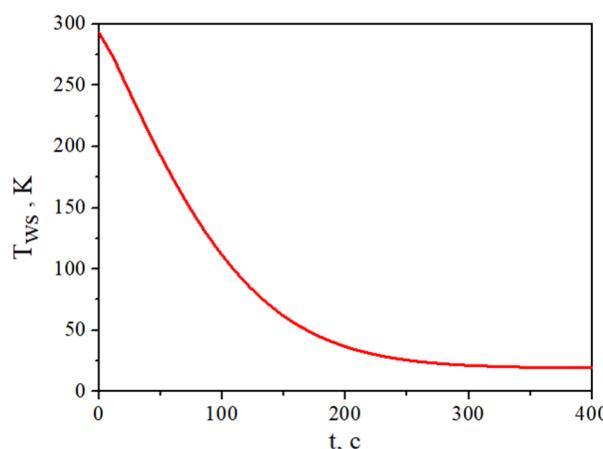


Рис. 3. Временная зависимость средней температуры стенки

Fig. 3. Time dependence of the average wall temperature

На основе полученных данных по формуле (16) были рассчитаны временные зависимости изменения теплового ресурса

стенки для всей магистрали и отдельных ее участков от входного сечения (5, 50, 150 м) (рис. 4).

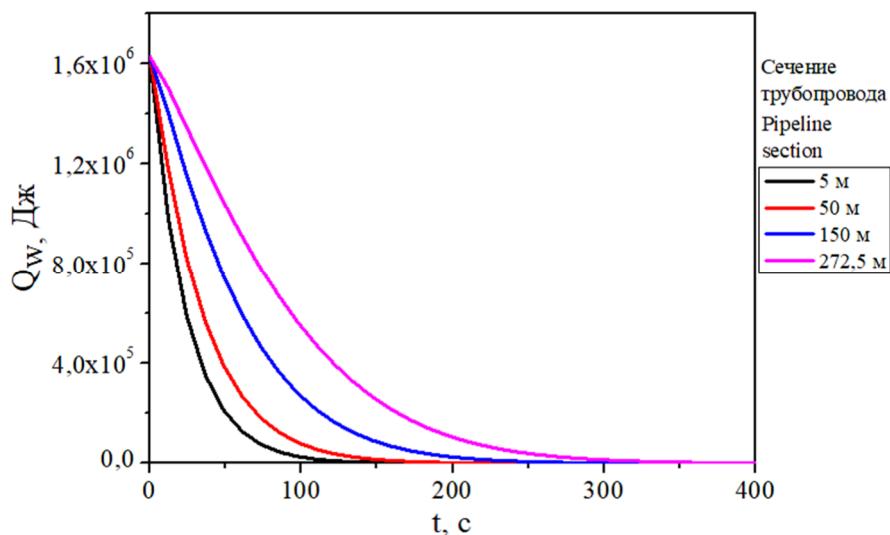


Рис. 4. Временная зависимость теплового ресурса стенки для различных участков трубопровода

Fig. 4. Time dependence of the wall thermal resource for different sections of the pipeline

Из приведенных рисунков видно, что расчетное время захолаживания магистрали составляет ~ 400 с, что хорошо согласуется с данными, полученными в результате экспериментов на действующих стендах испытательных комплексов.

Заключение

Таким образом, была предложена математическая модель захолаживания длинных трубопроводов криогенными компонентами при подготовке стеновых систем к огневым испытаниям. На основе этой модели был создан автоматизированный алгоритм расчета, позволяющий получать данные для построения температурных полей стенок трубопровода и потока транспортируемого криопродукта в различные моменты времени, а также определять время выхода магистрали в ра-

бочий режим и момент наступления стационарного течения однофазного потока. Поэтому разработанный алгоритм может быть интегрирован в систему управления испытательного стенда для автоматизации процесса захолаживания. Отметим, что современные стеновые комплексы уже внедряют автоматические системы, которые в реальном времени контролируют температуру и расход криогенного компонента. Используя данную модель при различных начальных и граничных условиях, можно отработать оптимальный режим протекания реальных физических процессов и добиться минимальных потерь криогенных компонент при минимальных временных затратах при подготовке стеновых систем к огневым испытаниям, как одного из этапов производственного цикла ЖРД в машиностроении.

Список литературы

1. Архаров А.М., Кунис И.Д. Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2006. 251 с.

2. Darr S.R., Hartwig J.W. Development of universal two-phase heat transfer correlations for cryogenic transfer line chilldown // Proceedings of the 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee: AIAA; 2017. <https://doi.org/10.2514/6/2017-0904>.
3. Hartwig J. W., Hu H., Styborski J., Chung J.N. Comparison of cryogenic flow boiling in liquid nitrogen and liquid hydrogen chilldown experiments // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 88. P. 662-673.
4. Юранев О.А. Исследование различных способов захолаживания криогенных топливных баков изделий ракетно-космической техники // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2018. № 3. С. 50-57.
5. Федюшин В.А. Разработка системы минимизации эксплуатационных потерь аргона в условиях кислородного цеха // Энергетика. Проблемы и перспективы развития: тезисы докладов 3-й Всероссийской студенческой научной конференции. Тамбов: ТГТУ, 2017. С. 137-138.
6. Кутателадзе С.С., Стыркович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. 296 с.
7. Гинзбург И.П. Прикладная гидрогазодинамика. Л.: Изд-во ЛГУ, 1958. 338 с.
8. Антиухов И.В. Исследование процессов теплообмена в криогенных магистралях ракетных двигателей // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020). М.: МАИ; 2020. С. 118-121.
9. Нестационарный теплообмен / В.К. Кошкин, Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С.А. Ярхо. М.: Машиностроение, 1973. 327 с.
10. Hartwig J., Vera J. Numerical modeling of the transient chilldown process of a cryogenic propellant transfer line // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 2016. Vol. 30, no. 2. P. 1-7.
11. Филин Н.В., Буланов А.Б. Жидкостные криогенные системы. Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1985. 246 с.
12. Беляков В.П. Криогенная техника и технология. М.: Энергоиздат, 1982. 272 с.
13. Вальциферов Ю.В., Полежаев В.И. Конвективный теплообмен в замкнутом осесимметричном сосуде с криволинейной образующей при наличии поверхности раздела фаз и фазовых переходов // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1975. № 6. С. 126-134.
14. Калядин О.В., Сергеев А.В. Разработка математической модели процесса захолаживания длинных трубопроводов для транспортировки жидкого водорода // Альтернативная и интеллектуальная энергетика: материалы II Международной научно-практической конференции. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2020. С. 208-209.
15. Моделирование технологических процессов переохлаждения криогенных жидкостей / А.А. Гребенников, О.В. Калядин, А.В. Сергеев, О.П. Свиридов, И.М. Голев, С.А. Курьянов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12, № 4. С. 85-91.

References

1. Arkharov A.M., Kunis I.D. Cryogenic refueling systems of launch rocket and space complexes. Moscow: MGTU im. Н.Е. Бауман; 2006. 251 p. (In Russ.)
2. Darr S.R., Hartwig J.W. Development of universal two-phase heat transfer correlations for cryogenic transfer line chilldown. Proceedings of the 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee: AIAA; 2017. <https://doi.org/10.2514/6/2017-0904>.
3. Hartwig J.W., Hu H., Styborski J., Chung J.N. Comparison of cryogenic flow boiling in liquid nitrogen and liquid hydrogen chilldown experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015;88:662-673.

4. Yuraney O.A. Research of various methods of cooling cryogenic fuel tanks of rocket and space technology products. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering.* 2018;(3):50-57. (In Russ.)
5. Fedyushin V.A. Development of a system for minimizing operational losses of argon in an oxygen shop. In: *Energetika. Problemy i perspektivy razvitiya: tezisy dokladov 3-i Vserossiiskoi studenteskoi nauchnoi konferentsii = Energy. Problems and development prospects: abstracts of the 3rd All-Russian Student Scientific Conference.* Tambov: TGTU; 2017. P. 137-138. (In Russ.)
6. Kutateladze S.S., Styrikovich M.A. Hydrodynamics of gas-liquid systems. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow: Energiya; 1976. 296 p. (In Russ.)
7. Ginzburg I.P. Applied hydro-gas dynamics. Leningrad: Izd-vo LGU; 1958. 338 p. (In Russ.)
8. Antyukhov I.V. Investigation of heat exchange processes in cryogenic mains of rocket engines. In: *Materialy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii po prikladnoi matematike i mekhanike v aerokosmicheskoi otrassli (AMMAI'2020) = Proceedings of the XIII International Conference on Applied Mathematics and Mechanics in the Aerospace Industry (AMMAI'2020).* Moscow: MAI; 2020. P. 118-121. (In Russ.)
9. Koshkin V.K., Kalinin E.K., Dreitser G.A., Yarkho S.A. Unsteady heat transfer. Moscow: Mashinostroenie; 1973. 327 p. (In Russ.)
10. Hartwig J., Vera J. Numerical modeling of the transient chilldown process of a cryogenic propellant transfer line. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer.* 2016;30(2):1-7.
11. Filin N.V., Bulanov A.B. Liquid cryogenic systems. Leningrad: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie; 1985. 246 p. (In Russ.)
12. Belyakov V.P. Cryogenic equipment and technology. Moscow: Energoizdat; 1982. 272 p. (In Russ.)
13. Val'tsiferov Yu.V., Polezhaev V.I. Convective heat transfer in a closed axisymmetric vessel with a curved generatrix in the presence of a phase interface and phase transitions. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Fluid and Gas Mechanics.* 1975;(6):126-134. (In Russ.)
14. Kalyadin O.V., Sergeev A.V. Development of a mathematical model of the process of cooling long pipelines for transportation of liquid hydrogen. In: *Al'ternativnaya i intellektual'naya energetika: materialy II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = AIE: materials of the 2nd International scientific and practical conference.* Voronezh: Voronezh. gos. tekhn. un-t; 2020. P. 208-209. (In Russ.)
15. Grebennikov A.A., Kalyadin O.V., Sergeev A.V., Sviridov O.P., Golev I.M., Kuryanov S.A. Modeling of technological processes of supercooling of cryogenic liquids. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University.* 2016;12(4):85-91. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the Authors

Калядин Олег Витальевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: kaljadin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0770-5025

Oleg V. Kalyadin, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: kalyadin@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0770-5025

Сергеев Александр Викторович, кандидат физико-математических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: sergeev-av@bk.ru, ORCID: 0000-0002-4417-1480

Гребенников Антон Александрович, кандидат физико-математических наук, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: anton18885@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-9783-0718

Королев Константин Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: korolev.kg@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0611-7296

Авдеев Михаил Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: miguel14@mail.ru, ORCID: 0009-0002-5493-6122

Лопатин Артем Юрьевич, аспирант, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: lopatin-ayu@mail.ru, ORCID: 0009-0009-0844-6473

Alexander V. Sergeev, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: sergeev-av@bk.ru, ORCID: 0000-0002-4417-1480

Anton A. Grebennikov, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: anton18885@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-9783-0718

Konstantin G. Korolev, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: korolev.kg@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0611-7296

Mikhail A. Avdeev, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: miguel14@mail.ru, ORCID: 0009-0002-5493-6122

Artem Yu. Lopatin, Postgraduate Student, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, e-mail: lopatin-ayu@mail.ru, ORCID: 0009-0009-0844-6473