

ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЗАХОЛАЖИВАНИЯ КРИОГЕННОГО ХРАНИЛИЩА ДЛЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Я. Э. Родькин, А. Б. Сулин

Университет ИТМО,
Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9

В данной статье представлено сравнительное аналитическое исследование процесса двухфазного и конвективного охлаждения криогенного хранилища сжиженного природного газа. Для моделирования нестационарного теплообмена в изоляционной конструкции хранилища используется метод Канторовича—Бубнова—Галеркина. Этот метод позволяет получить приближенные аналитические решения, описывающие температурные поля и динамику охлаждения. В рамках исследования получены зависимости изменения температурного напора на внутренней стенке резервуара при захолаживании метаном и воздухом от времени, а также построены графики изотерм в газовом пространстве резервуара при конвективном захолаживании воздухом.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, криогенное хранилище сжиженного природного газа, захолаживание, нестационарный теплообмен, конвективный теплообмен, аналитическое моделирование.

Введение

Сжиженный природный газ (СПГ) является важным энергетическим ресурсом, который требует применения специальных технологий для его транспортировки и хранения. Одной из ключевых задач является контроль температурного режима в криогенных хранилищах, что позволяет минимизировать потери продукта и избегать потенциальных аварий.

В рамках подготовки криогенного хранилища к эксплуатации в ходе пуска наладочных работ производятся процессы инертизации — вытеснения воздуха из объема резервуара в целях исключения возможности образования взрывоопасной смеси; замещения — замена нейтрального газа (азота) метаном; захолаживания — охлаждения конструкции емкости хранения до температуры 143 К [1, 2].

Захолаживание позволяет уменьшить количество регазифицируемого газа при загрузке [3] и хранении [4], исключить возникновение низкотемпературных напряжений в элементах конструкции [5], а также снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций в период эксплуатации [6].

Существующая методика подготовительных работ подразумевает пошаговое осуществление процессов. Инертизация и замещение азота метаном проводятся при температуре окружающей среды, а затем выполняется равномерное захолаживание путем распыления СПГ внутри емкости, при соблюдении скорости охлаждения 8–10 К/ч с постепенным замедлением скорости охлаждения до 3–5 К/ч при приближении к 143 К [7]. Превышение установленных скоростных параметров охлаждения может привести к критическим низкотемпературным напряжениям в металлических элементах системы, запаздыванию охлаждения изоляции [8] и аккумулярованию ею тепловой энергии [9].

В целях энергетических затрат на захолаживание предлагается осуществлять конвективное охлаждение многослойной стенки [9] воздухом и азотом взамен классически используемого СПГ (рис. 1).

Использование воздуха в качестве рабочего агента при захолаживании обладает рядом преимуществ в сравнение с традиционным СПГ:

- отсутствует необходимость ожигать хлад-агент перед распылением внутри хранилища, что влечет снижение энергетических затрат на подготовку хладагента;
- снижение разницы температур между хлад-агентом и стенкой хранилища и, как следствие, исключение случаев локальных очагов пленочного кипения криоагента;
- снижение экономических затрат ввиду применения общедоступного воздуха в качестве рабочего вещества вместо метана.

В целях обоснования используемой методики захолаживания необходимо провести моделирование процесса конвективного охлаждения внутреннего газового пространства и многослойной стенки хранилища.

В основе расчета используется комбинированный метод Канторовича—Бубнова—Галеркина, который позволяет получать приближенные аналитические решения для сложных задач теплообмена. Построение расчетной модели позволит исследовать температурные поля и динамику охлаждения, а также оценить влияние различных параметров на эффективность этого процесса.

Описание расчетной модели процесса захолаживания криогенного хранилища СПГ

Одним из основных требований к протеканию процесса предварительного охлаждения храни-

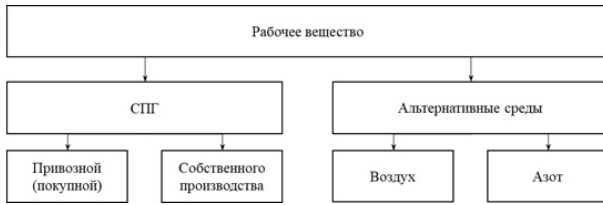


Рис. 1. Рабочие вещества для процесса заохлаживания криогенных резервуаров для СПГ
Fig. 1. Working substances for the process of cooling cryogenic tanks for liquefied natural gas (LNG)

лища является плавное изменение температуры. Скорость изменения температуры способствует минимизации термических напряжений в корпусе резервуара, а также более равномерному и полному охлаждению теплоизоляции хранилища, что способствует ее оптимальной работе по предохранению криопродукта от нагревания его тепловым потоком, проникающим из окружающей среды.

В связи с тем, что толщина стенки много меньше геометрических размеров хранилища, поиск решения можно осуществлять путем рассмотрения модели многослойной, бесконечной, плоской стенки.

Криогенная емкость представляет собой атмосферный резервуар, внутренняя мембрана которого выполнена из никельсодержащей стали ($Ni > 9\%$), отделенной от внешнего бетонного слоя теплоизоляционным материалом (рис. 2). Для повышения надежности и обеспечения безопасной эксплуатации в конструкции днища и стенок предусматривается вторичная мембрана в структуре теплоизоляции [10], позволяющая исключить утечку из криогенного резервуара.

Теплофизические свойства материала каждого из слоев многослойной стенки толщиной δ характеризуются величинами $\lambda(T)$, $c(T)$, $\rho(T)$, $a(T)$. Охлаждение внутренней стенки хранилища происходит путем подачи газообразного флюида с температурой T_r . Охлаждение конструкции продолжается до тех пор, пока температура внутренней стенки хранилища от T_0 не достигнет $T_{зак}$.

Аналитическое описание задачи для многослойной стенки представляется в следующем виде [11–12]:

$$\lambda_i(\rho) \frac{\partial T_i(\rho, Fo)}{\partial Fo} = \frac{a_i(\rho)}{a} \left\{ \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\lambda_i(\rho) \frac{\partial T_i(\rho, Fo)}{\partial \rho} \right] + \frac{a_i(\rho)}{a} (\sum \delta)^2 q_i(\rho, Fo) \right\} + \quad (1)$$

$$(Fo > 0; \rho_{i-1} < \rho < \rho_i; i = \overline{1, m}; \rho_0 = 0; \rho_m = 1); \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_i(0, Fo)}{\partial \rho} - Bi_1 [T_i(0, Fo) - T_{вн}(Fo)] = 0; \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_i(\rho_i, Fo)}{\partial \rho} &= \frac{\partial T_{i+1}(\rho_i, Fo)}{\partial \rho} \\ \lambda_i \frac{\partial T_i(\rho_i, Fo)}{\partial \rho} &= \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(\rho_i, Fo)}{\partial \rho} \end{aligned} \right\} (i = \overline{1, m-1}); \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_i(\rho, 0)}{\partial \rho} = \frac{\partial T_{0i}(\rho)}{\partial \rho}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_m(1, Fo)}{\partial \rho} - Bi_2 [T_{oc}(0, Fo) - T_m(1, Fo)] = 0, \quad (6)$$

где $\rho = x/\sum\delta$ — относительная координата; m — число слоев в конструкции стенки; a — наимень-

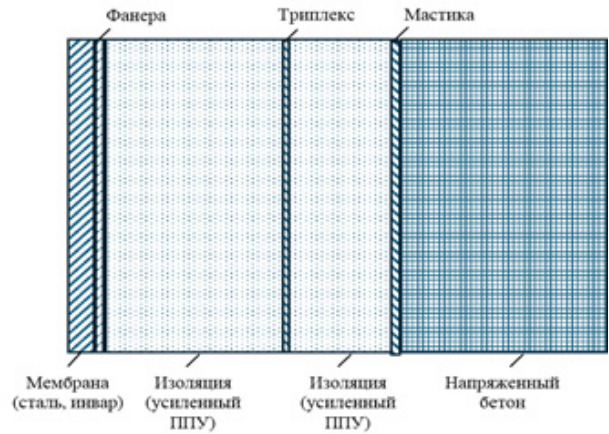


Рис. 2. Строение стенки криогенного хранилища СПГ
Fig. 2. Structure of the wall of a cryogenic LNG storage facility

ший из коэффициентов теплопроводности a_i ($i = \overline{1, m}$); $T_{вн}$, T_{oc} — температуры внутренней и окружающей среды; $Bi_1 = \alpha_1 \sum \delta / \lambda$, $Bi_2 = \alpha_2 (\sum \delta) / \lambda$ — критерий Био; $Fo = \alpha t / (\sum \delta)^2$ — критерий Фурье.

В соответствии с предложенным методом расчета решение принимает вид [12]:

$$T_m(\rho, Fo) = \Phi_i(\rho) + f_i(Fo) \varphi_{i1}(\rho) = \sum_{k=1}^n f_k(Fo) \varphi_{ki}(\rho), \quad (i = \overline{1, m}), \quad (7)$$

где $f_k(Fo)$, $k = \overline{1, n}$ — неизвестные функции времени; $\varphi_k(\rho)$ — координатные функции, удовлетворяющие однородным граничным условиям и однородным условиям сопряжения; $\Phi_i(\rho)$ — функции, удовлетворяющие неоднородным условиям сопряжения. Неизвестные функции времени $f_k(Fo)$ находятся путем составления невязки ко всем координатным функциям и решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка [4].

$$\sum_{k=1}^n [N_{jk} f'_k(Fo) + M_{jk} f_k(Fo)] + N_j + M_j [T'_{c1}(Fo) + T'_{c2}(Fo) + q_i(Fo)] = 0, \quad (8)$$

$$(j = \overline{1, n}),$$

где

$$N_{jk} = - \sum_{i=1}^m \int_{\rho_{i-1}}^{\rho_i} \lambda_i(\rho) \varphi_{jk}(\rho) \varphi_{ij}(\rho) d\rho, \quad (9)$$

$$M_{jk} = - \sum_{i=1}^m \int_{\rho_{i-1}}^{\rho_i} \left\{ \frac{a_i (\sum \delta)^2}{a} q_i(\rho, Fo) + \left[\lambda_i(\rho) \frac{\partial \Phi_i(\rho)}{\partial \rho} \right] \right\} \varphi_{ij}(\rho) d\rho, \quad (10)$$

$$M_j = - \sum_{i=1}^m \int_{\rho_{i-1}}^{\rho_i} \varphi_{ij}(\rho) d\rho, \quad (i = \overline{1, m}, j, k = \overline{1, n}). \quad (11)$$

Преимущество предложенной методики расчета заключается в возможности адаптивности к геометрии и материалам многослойной стенки с переменными во времени теплофизическими свойствами. Введение локальных систем координат позволяет значительно упростить расчетную модель и сократить время обработки результатов без по-

Таблица 1. Исходные данные
Table 1. Initial data

Наименование	Обозначение	Величина
Толщина стенки внутренней емкости (мембраны)	δ_1	0,01 м
Толщина изоляционного слоя	$\delta_{из}$	0,4 м
Толщина стенки внешнего резервуара	δ_2	1 м
Плотность внутренней мембраны	ρ_1	7900 кг/м ³
Плотность изоляции	$\rho_{из}$	70 кг/м ³
Плотность бетона	ρ_2	2100 кг/м ³
Коэффициент теплопроводности бетонного слоя	λ_2	1,8 Вт/м·К
Начальная температура внутри резервуара	t_0	273 К
Конечная температура внутри резервуара	$t_{зак}$	143 К
Коэффициент теплоотдачи от внешней стенки к окружающей среде	α_2	9,4 т/м ² ·К

Таблица 2. Теплофизические свойства воздуха
Table 2. Thermophysical properties of air

Температура, К	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость c_p , кДж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Кинематическая вязкость, (м ² /с) × 10 ⁻⁶	Объемный коэффициент теплового расширения, (1/К) × 10 ⁻³	Критерий Прандтля
123	2,793	1,026	0,0116	3,08	8,21	0,76
173	1,98	1,009	0,016	5,95	5,82	0,74
223	1,534	1,005	0,0204	9,55	4,51	0,725
273	1,293	1,005	0,0243	13,3	3,67	0,715
293	1,205	1,005	0,0257	15,11	3,43	0,713

Таблица 3. Теплофизические свойства металла внутренней мембраны
Table 3. Thermophysical properties of the inner membrane metal

Температура, К	Удельная теплоемкость c_p , кДж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
120	0,274	21
140	0,313	23,1
160	0,343	24,6
180	0,367	25,9
200	0,389	27

тери точности. Математическое моделирование по комбинированному методу Канторовича – Бубнова – Галеркина позволяет получать результаты, коррелирующие с экспериментальными исследованиями [12].

Применение метода к поставленной задаче

В этом исследовании рассматривается применение комбинированного метода Канторовича – Бубнова – Галеркина для обоснования целесообразности перехода к воздушному охлаждению крупнотоннажного хранилища СПГ. Исходные данные для расчета представлены в табл. 1.

Для решения поставленной задачи на основе табличных значений были получены аппроксимирующие полиномы для определения теплофизических свойств воздуха (табл. 2), как рабочего агента, металла, из которого изготовлена первичная мембрана (табл. 3), и ограждающей изоляции [13].

$$\rho_B = -2 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 2 \cdot 0,0002^{-6} \cdot T^2 - 0,059T + 7,5134$$

$$c_{PB} = 3 \cdot 10^{-11} \cdot T^4 - 3 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 - 1 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 4 \cdot 10^{-6} \cdot T + 1,005$$

$$\lambda_B = -6 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 0,0001 \cdot T - 0,0009$$

$$v_B = 1 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0,0308 \cdot T - 2,1856$$

$$\beta_B = 1 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0,0862 \cdot T + 16,636$$

$$P_{TB} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0,0007 \cdot T + 0,8319$$

Для дальнейших вычислений были получены аппроксимирующие полиномы теплофизических свойств металла от температуры:

$$c_{pCT} = -4 \cdot 10^{-10} \cdot T^4 + 3 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 - 9 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 0,0144 \cdot T - 0,5445$$

$$\lambda_B = -2 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 0,1471 \cdot T + 6,8212$$

Теплопроводность изоляции принимается согласно [14]:

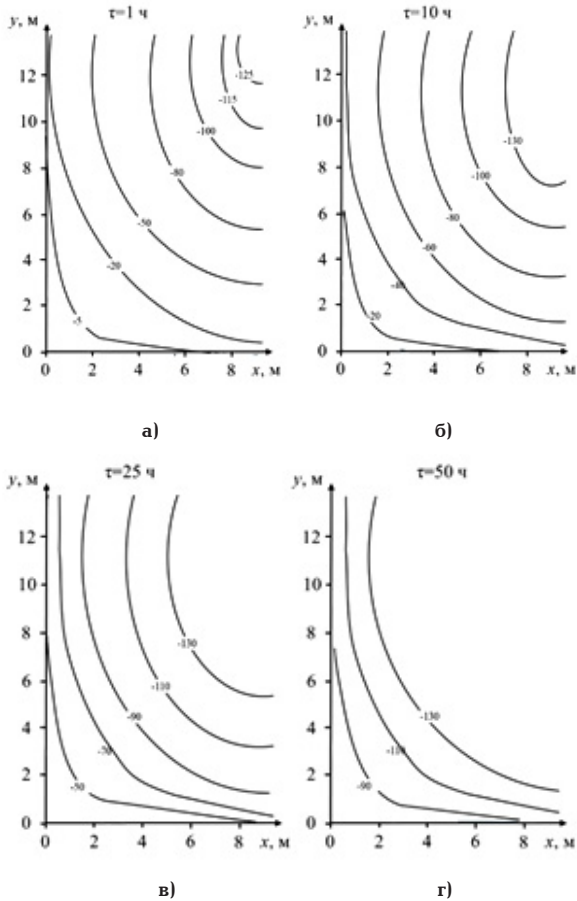


Рис. 3. Графики изотерм в газовом пространстве резервуара при захлаживании альтернативным методом при а) $\tau = 1$ ч; б) $\tau = 10$ ч; в) $\tau = 25$ ч; г) $\tau = 50$ ч
 Fig. 3. Isotherm graphs in the gas space of the tank during convective cooling at: а) $\tau = 1$ h; б) $\tau = 10$ h; в) $\tau = 25$ h; г) $\tau = 50$ h

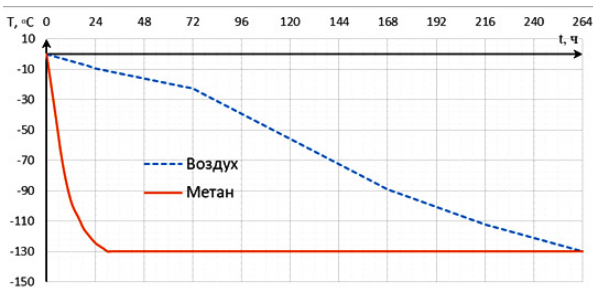


Рис. 4. Изменение температуры на внутренней стенке резервуара при захлаживании метаном и воздухом от времени
 Fig. 4. Change in temperature on the inner wall of the tank during cooling with methane and air over time

$$\lambda_{из} = \frac{0,008 \cdot T^2 + 0,1 \cdot T + 38}{1000}$$

Теплопроводность бетона принимается постоянной ввиду малого градиента температур внутри слоя.

Анализ результатов

В ходе исследования выполнен расчет охлаждения газового пространства криогенного резервуара СПГ. Согласно полученным результатам расче-

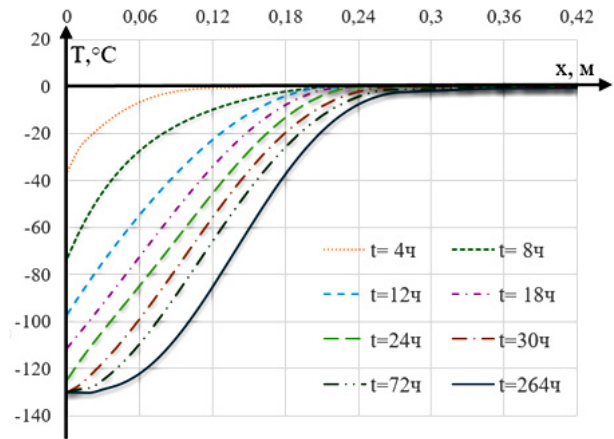


Рис. 5. Распределение температурного поля внутри многослойной стенки при захлаживании СПГ
 Fig. 5. Distribution of the temperature field inside the multilayer wall during LNG cooling

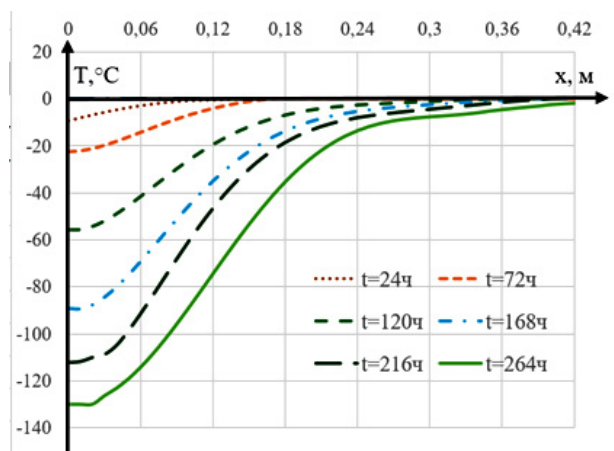


Рис. 6. Распределение температурного поля внутри многослойной стенки при захлаживании воздухом
 Fig. 6. Distribution of the temperature field inside a multilayer wall during air cooling

та, полное захлаживание газового объема резервуара завершается при $\tau = 72$ ч. Графики изотерм температурного поля в газовом пространстве в зависимости от времени представлены на рис. 3.

Кроме этого, по результатам расчета поставленной задачи установлено, что время, необходимое для захлаживания внутренней мембраны до необходимой температуры, равной -130 °С, путем воздушного конвективного охлаждения в 8,8 раза больше, чем при охлаждении метаном (264 часа и 30 часов соответственно) (рис. 4). Также стоит отметить изменение характера охлаждения альтернативным методом при $\tau = 72$ ч, что обусловлено достижением равномерного распределения температурного поля в газовом пространстве резервуара.

Относительно низкие коэффициенты конвективной теплопередачи, достижимые при использовании окружающего воздуха, особенно при небольшой разнице температур, приводят к значительно более низкой скорости охлаждения по сравнению с традиционным методом охлаждения с использованием СПГ [15].

На рис. 5 и рис. 6 представлены результаты расчета распределения температурного поля внутри многослойной стенки при захлаживании традици-

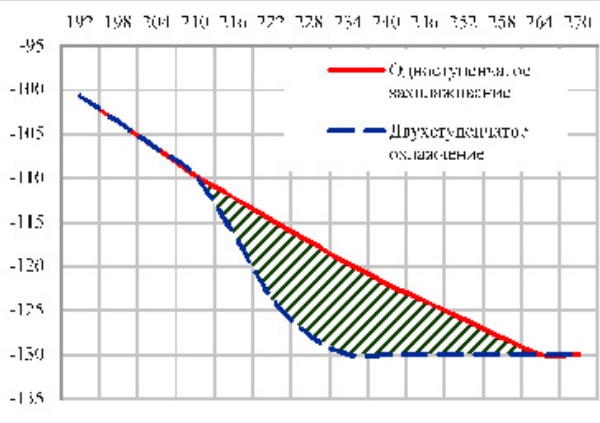


Рис. 7. График изменения температурного поля на внутренней стенке резервуара при 1- и 2-ступенчатом захлаживании

Fig. 7. Graph of the change in the temperature field on the inner wall of the tank during 1- and 2-stage cooling

онным (метаном) и альтернативными методами (воздухом) соответственно.

Из полученных результатов можно сделать вывод: смена рабочего агента, несмотря на увеличение общего времени процесса, позволяет достичь более равномерного охлаждения многослойной стенки.

Однако по завершении воздушного охлаждения в рамках подготовки к наполнению криогенного хранилища необходимо осуществить его инертизацию. В связи с этим в целях повышения энергоэффективности процесса и снижения времени комплексной подготовки криогенного хранилища к эксплуатации предлагается в процессе захлаживания в момент времени $\tau_{см}$ заместить рабочий агент с воздуха на азот.

Для проведения расчета приняты аппроксимирующие полиномы теплофизических свойств азота от температуры, в соответствии с [16], (прим. T , °C):

$$\rho_{N_2} = 4,364 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 3,398 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,219$$

$$c_{pN_2} = 3,814 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 0,021 \cdot T + 1,041$$

$$\lambda_{N_2} = -3,77 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 7,5 \cdot 10^{-5} \cdot T + 0,024$$

$$v_{N_2} = 8,223 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 + 9,09 \cdot 10^{-8} \cdot T + 1,336 \cdot 10^{-5}$$

Для интенсификации процесса захлаживания целесообразно осуществлять переход от однофазного (газ-газ) охлаждения к двухфазному (жидкость-газ) путем подачи жидкого азота с помощью насосов в нижнюю часть хранилища. Во временной отрезок смены способа подачи рабочего агента в хранилище расчет процесса сводится к квазистационарным исчислениям [17].

Сравнительный график изменения температурного напора внутри многослойной стенки при одноступенчатом и двухступенчатом захлаживании представлен на рис. 7.

Оптимизация технологического процесса путем введения второй ступени охлаждения и смены рабочего агента способствует сокращению времени осуществления процесса захлаживания на 30,1 ч ($\tau_{заж2} = 233,9$ ч) и обеспечению одновременного азотирования хранилища. Общее время подготовки криогенного хранилища (с учетом инертизации) сокращается на 102,1 ч (4,25 сут).

Применение комбинированного метода Канторовича и Бубнова–Галеркина составляет аналитический инструмент для решения основных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих теплообмен в теплозащитном ограждении.

Метод Бубнова–Галеркина использует набор базисных функций для точного приближения пространственного распределения температуры внутри ограждения, что позволяет учитывать сложные температурные градиенты.

Построенная расчетная модель процесса захлаживания криогенного хранилища для сжиженного природного газа позволяет более точно предсказывать характеристики эффективного захлаживания. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструкции хранилищ и повышения их эксплуатационных характеристик.

По результатам расчета были сделаны следующие выводы. Одноступенчатое конвективное воздушное охлаждение представляет собой простое и экономичное решение для непрерывного медленного охлаждения резервуаров для СПГ. Однако у него есть ряд ключевых недостатков:

- конвективное воздушное охлаждение характеризуется относительно более низкими скоростями теплопередачи по сравнению с другими методами, особенно при уменьшении разницы температур между резервуаром и воздухом;

- достижение криогенных температур при одноступенчатом воздушном охлаждении приводит к значительному увеличению времени охлаждения.

Двухступенчатое захлаживание в виде синергии конвективного воздушного охлаждения и охлаждения жидким азотом позволяет сократить общее время охлаждения по сравнению с одноступенчатым воздушным охлаждением и одновременно обеспечить инертизацию хранилища.

Список источников

1. Jinshu L., Song X., Deng J. [et al.]. Numerical prediction of temperature field for cargo containment system (CCS) of LNG carriers during pre-cooling operations // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. Vol. 29. P. 382–391. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.01.009.
2. Haddar M., Hammami M., Baccar M. Numerical parametric study of a cooling system for an LNG storage tank // Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles. 2019. Vol. 74. 21. DOI: 10.2516/ogst/2018097.
3. Shin K., Son S., Moon J. [et al.]. Dynamic modeling and predictive control of boil-off gas generation during LNG loading // Computers & Chemical Engineering. 2022. Vol. 160. 107698. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107698.
4. Rodkin Y. E., Sulin A. B., Ryabova T. V. Increasing energy efficiency of LNG transportation and storage processes // Oil and gas engineering (OGE-2022). 2023. DOI: 10.1063/5.0141930.
5. Родькин Я. Э., Зайцев А. В., Сулин А. Б. Пути снижения потерь СПГ при транспортировке и хранении // Вестник Международной академии холода. 2023. № 4. С. 44–50. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-44-50. EDN: NLSOEZ.
6. Qadrdan M., Abeysekera M., Wu J. [et al.]. Fundamentals of Natural Gas Networks // The Future of Gas Networks. Springer: Cham, 2020. P. 5–22. DOI: 10.1007/978-3-319-66784-3_2.
7. Zhu K., Li Y., Ma Y. [et al.]. Influence of filling methods on the cool down performance and induced thermal stress distribution in cryogenic tank // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 141. P. 1009–1019. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.030.

8. Kulitsa M., Wood D. Boil-off gas balanced method of cool down for liquefied natural gas tanks at sea // *Advances in Geo-Energy Research*. Vol. 4. P. 199–206. 2020. DOI: 10.26804/ager.2020.02.08.
9. Zhu K., Li C., Ma Y. [et al.]. Experimental study on cool down characteristics and thermal stress of cryogenic tank during LN2 filling process // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 130. P. 951–961. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.079.
10. Hedayat A., Cartagena W., Majumdar A., LeClair A. C. Modeling and analysis of chill and fill processes for the cryogenic storage and transfer engineering development unit tank // *Cryogenics*. 2016. Vol. 74. P. 106–112. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2015.11.003.
11. Аверин Б. В., Кудинов И. В., Котова Е. В., Еремин А. В. Обобщенные функции в нелинейных задачах теплопроводности для многослойных конструкций // *Теплофизика высоких температур*. 2013. Т. 51, № 6. С. 912. DOI: 10.7868/S004036441305013X. EDN: REKCXD.
12. Модели термомеханики с конечной и бесконечной скоростью распространения теплоты: моногр. / Под ред. В. А. Кудинова. Москва: Проспект, 2020. 224 с. ISBN 978-5-392-29251-6. DOI: 10.31085/9785392292516-2019-224.
13. Li W., Shao Q. Q., Liang J. Numerical study on oil temperature field during long storage in large floating roof tank // *International journal of heat and mass transfer*. 2019. Vol. 130. P. 175–186. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.024.
14. Sures Kumar A., Nikhil P. S., Nallaperumal A. M. Cryogenic characterisation of polyurethane foam for thermal insulation of cryogenic tanks of launch vehicles // *Indian Journal of Cryogenics*. 2022. P. 97–98.
15. Roh S., Son G., Song G., Bae J. Numerical study of transient natural convection in a pressurized LNG storage tank // *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 52. P. 209–220. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.021.
16. Азимов А. Мир азота. Москва: Медиа, 2016. 160 с.
17. Kumar R., Kumar A. Das. Numerical study of boiling of Liquid Nitrogen on a liquid-liquid contact plane. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2102.02423.
-
- РОДЬКИН Яков Эдуардович**, аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург. ORCID: 0000-0003-0301-0151
Адрес для переписки: rodyakov1997@niuitmo.ru
- СУЛИН Александр Борисович**, доктор технических наук, профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, г. Санкт-Петербург.
SPIN-код: 5540-5765
AuthorID (РИНЦ): 445299
ORCID: 0000-0002-4580-6070
AuthorID (SCOPUS): 6507491881
ResearcherID: W-4842-2017
Адрес для переписки: absulin@itmo.ru
-
- Для цитирования**
- Родькин Я. Э., Сулин А. Б. Построение расчетной модели процесса захлаживания криогенного хранилища для сжиженного природного газа // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2025. Т. 9, № 1. С. 56–63. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-56-63. EDN: USLHRM.
- Статья поступила в редакцию 22.01.2025 г.**
© Я. Э. Родькин, А. Б. Сулин

CONSTRUCTION OF A COMPUTATIONAL MODEL FOR THE PROCESS OF COOLING DOWN A CRYOGENIC STORAGE FACILITY FOR LIQUEFIED NATURAL GAS

Ya. E. Rodkin, A. B. Sulin

ITMO University, Russia, Saint Petersburg, Lomonosov Str., 9, 191002

As part of the preparation of the cryogenic storage facility for operation, the following processes are performed during commissioning: inerting — displacing air from the tank volume in order to exclude the possibility of forming an explosive mixture; substitution — replacing neutral gas (nitrogen) with methane; chilling — cooling the storage tank structure to a temperature of 143 K. Chilling allows to reduce the amount of regasified gas during loading and storage, eliminate the occurrence of low-temperature stresses in the structural elements, and reduce the likelihood of emergency situations during operation. This article presents a comparative analytical study of the process of two-phase and convective cooling of a cryogenic storage facility for liquefied natural gas. The Kantorovich–Bubnov–Galerkin method is used to model non-stationary heat exchange in the storage facility's insulating structure. This method allows to obtain approximate analytical solutions describing temperature fields and cooling dynamics. As part of the study, dependencies of the change in temperature pressure on the inner wall of the tank during cooling with methane and air over time are obtained, and graphs of isotherms in the gas space of the tank during convective cooling with air were constructed.

Keywords: liquefied natural gas, cryogenic storage of liquefied natural gas, cooling, non-stationary heat exchange, convective heat exchange, analytical modeling.

References

1. Jinshu L., Song X., Deng J. [et al.]. Numerical prediction of temperature field for cargo containment system (CCS) of LNG carriers during pre-cooling operations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. Vol. 29. P. 382–391. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.01.009. (In Engl.).
2. Haddar M., Hammami M., Baccar M. Numerical parametric study of a cooling system for an LNG storage tank. *Oil & Gas Science and Technology — Rev. IFP Energies nouvelles*. 2019. Vol. 74. 21. DOI: 10.2516/ogst/2018097. (In Engl.).
3. Shin K., Son S., Moon J. [et al.]. Dynamic modeling and predictive control of boil-off gas generation during LNG loading. *Computers & Chemical Engineering*. 2022. Vol. 160. 107698. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2022.107698. (In Engl.).
4. Rodkin Ya. E., Sulin A. B., Ryabova T. V. Increasing energy efficiency of LNG transportation and storage processes. *Oil and gas engineering (OGE-2022)*. 2023. DOI: 10.1063/5.0141930. (In Engl.).
5. Rodkin Ya. E., Zaitsev A. V., Sulin A. B. Puti snizheniya poter' SPG pri transportirovke i hranenii [Decreasing LNG losses at handling and storage]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No. 4. P. 44–50. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-44-50. EDN: NLSOEZ. (In Russ.).
6. Qadrdan M., Abeysekera M., Wu J. [et al.]. Fundamentals of Natural Gas Networks. *The Future of Gas Networks*. Springer: Cham, 2020. P. 5–22. DOI: 10.1007/978-3-319-66784-3_2. (In Engl.).
7. Zhu K., Li Y., Ma Y. [et al.]. Influence of filling methods on the cool down performance and induced thermal stress distribution in cryogenic tank. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 141. P. 1009–1019. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.030. (In Engl.).
8. Kulitsa M., Wood D. Boil-off gas balanced method of cool down for liquefied natural gas tanks at sea. *Advances in Geo-Energy Research*. Vol. 4. P. 199–206. 2020. DOI: 10.26804/ager.2020.02.08. (In Engl.).
9. Zhu K., Li C., Ma Y. [et al.]. Experimental study on cool down characteristics and thermal stress of cryogenic tank during LN2 filling process. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 130. P. 951–961. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.079. (In Engl.).
10. Hedayat A., Cartagena W., Majumdar A., LeClair A. C. Modeling and analysis of chill and fill processes for the cryogenic storage and transfer engineering development unit tank. *Cryogenics*. 2016. Vol. 74. P. 106–112. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2015.11.003. (In Engl.).
11. Averin B. V., Kudinov I. V., Kotova E. V., Eremin A. B. Obobshchennyye funktsii v nelineynkh zadachakh teploprovodnosti dlya mnogoslonykh konstruksiy [Generalized functions in thermal conductivity problems for multilayered constructions]. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2013. Vol. 51, no. 6. P. 912. DOI: 10.7868/S004036441305013X. EDN: REKCXD. (In Russ.).
12. Modeli termomekhaniki s konechnoy i beskonechnoy skorost'yu rasprostraneniya teploty [Models of thermomechanics with finite and infinite heat propagation velocity] / Ed. by V. A. Kudinov. Moscow, 2020. 224 p. ISBN 978-5-392-29251-6. DOI: 10.31085/9785392292516-2019-224. (In Russ.).
13. Li W., Shao Q. Q., Liang J. Numerical study on oil temperature field during long storage in large floating roof tank. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 130. P. 175–186. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.024. (In Engl.).
14. Sures Kumar A., Nikhil P. S., Nallaperumal A. M. Cryogenic characterisation of polyurethane foam for thermal insulation of cryogenic tanks of launch vehicles. *Indian Journal of Cryogenics*. 2022. P. 97–98. (In Engl.).

15. Roh S., Son G., Song G., Bae J. Numerical study of transient natural convection in a pressurized LNG storage tank. *Applied Thermal Engineering*. 2013. Vol. 52. P. 209–220. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2012.11.021. (In Engl.).
16. Azimov A. Mir azota [World of Nitrogen]. Moscow: Media, 2016. 160 p. (In Russ.).
17. Kumar R., Kumar A. Das. Numerical study of boiling of Liquid Nitrogen on a liquid-liquid contact plane. 2021. DOI: 10.48550/arXiv.2102.02423. (In Engl.).

RODKIN Yakov Eduardovich, Graduate Student of the «Energy Efficient Engineering Systems» Educational Centre, ITMO University, Saint Petersburg.
ORCID: 0000-0003-0301-0151
Correspondence address: rodyakov1997@niuitmo.ru

SULIN Aleksander Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the «Energy Efficient Engineering

Systems» Educational Centre, ITMO University, Saint Petersburg.
SPIN-code: 5540-5765
AuthorID (RSCI): 445299
ORCID: 0000-0002-4580-6070
AuthorID (SCOPUS): 6507491881
ResearcherID: W-4842-2017
Correspondence address: absulin@itmo.ru

For citations

Rodkin Ya. E., Sulin A. B. Construction of a computational model for the process of cooling down a cryogenic storage facility for liquefied natural gas. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2025. Vol. 9, no. 1. P. 56–63. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-56-63. EDN: USLHRM.

Received January 22, 2025.
© Ya. E. Rodkin, A. B. Sulin