

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАПРАВОЧНОГО ТРУБОПРОВОДА СПГ ОТ ВЫБОРА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

А. М. Андреев, А. Ю. Баранов, Е. В. Соколова,  
Т. А. Малышева, Л. В. Иванов

Университет ИТМО,  
Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Сокращение технологических потерь природного газа в процессе производства, транспортирования и хранения имеет важнейшее энергетическое и экологическое значение. Потери природного газа являются объектом активной критики представителей «зеленой энергетики». Следует разрабатывать и популяризировать новые технологические решения, направленные на снижение косвенного влияния на экологию, связанного с производством и использованием сжиженного природного газа (СПГ), демонстрировать готовность специалистов этой отрасли энергетики учитывать современные социальные предпочтения. В статье представлен численный анализ энергоэффективности одного из этапов крупнотоннажного производства СПГ — выдача СПГ из накопительной емкости в танкер-газовоз по криогенному трубопроводу. Рассмотрена математическая модель теплового ограждения трубопровода, выполнена оценка потерь продукционного криопродукта от тепловой инерции материалов трубопровода. Дана оценка работоспособности схем, рекомендуемых для утилизации паров СПГ.

**Ключевые слова:** сжиженный природный газ, теплопритоки, трубопровод, теплоизоляция, перекоденсация паров, теплоотводящая способность.

## Введение

В научной литературе много внимания уделяется энергоэффективности технологических процессов крупнотоннажного получения СПГ [1, 2]. Наряду с повышением энергоэффективности циклов ожижения природного газа (ПГ) большое внимание уделяется снижению уровня потерь СПГ, вызванных притоком теплоты из окружающей среды [3–5]. Продукционный СПГ до отгрузки в транспортное средство до 3–4 суток накапливается и хранится в технологических емкостях предприятия [6, 7], а затем за короткий промежуток времени транспортируется из накопительной емкости в транспортную. В зависимости от выбора конструктивных и технологических решений на этом этапе потери СПГ за счет подвода теплоты из окружающей среды могут быть существенными.

Перевод природного газа из газообразного состояния в жидкое связан с существенными удельными затратами энергии (0,85 кВт·час/кг), сокращение нерациональных потерь готовой продукции снижает эксплуатационные затраты и повышает конкурентоспособность готовой продукции. Однако последнее время еще большее значение приобретает косвенный экологический ущерб, который наносится окружающей среде (ОС) в рамках производства СПГ. В этом контексте борьба за сокращение потерь СПГ от испарения становится более острой проблемой, требующей решения.

В технологической цепи производства СПГ, предназначенного для экспорта морским транспортом, существует, по крайней мере, два блока, напрямую не связанные с процессом ожижения ПГ,

но также существенно влияющие на технико-экономические показатели процесса получения СПГ в целом. К таким узлам следует отнести: накопительные емкости, число которых в разных проектах СПГ-заводов составляет от двух до четырех, а общий объем хранения — порядка 200 000 м<sup>3</sup> и трубопроводы, по которым СПГ доставляется от накопительных емкостей к заправочным терминалам.

Энергоэффективность хранилищ СПГ, как стационарных, так и мобильных, является предметом многочисленных исследований [1–7]. Гораздо меньше внимания уделяется процессам транспортирования СПГ из накопительного резервуара в транспортный.

Объектом исследования в данной статье является трубопровод подачи СПГ в заправочный терминал. Такой интерес к процессу транспортирования продукционного СПГ можно объяснить тем, что процессы нестационарного переноса теплоты из ОС к потоку через теплое ограждение таких трубопроводов недостаточно изучены. Этот тезис можно подтвердить примером протяженности заправочных трубопроводов на нескольких реализованных в России СПГ-проектах, таких как «Сахалин-СПГ», «Ямал-СПГ», «Криогаз-Высоцк» и проектируемый завод «Балтийский СПГ».

Несмотря на то, что все эти проекты реализуются в совершенно различных географических условиях, длина трубопроводов транспортирования СПГ из накопительной емкости в заправочный терминал во всех случаях неоправданно велика. Это может быть косвенно объяснено для проектов, которые проектируются или реализуются в мелководье Финского залива. Но два других завода СПГ лишены

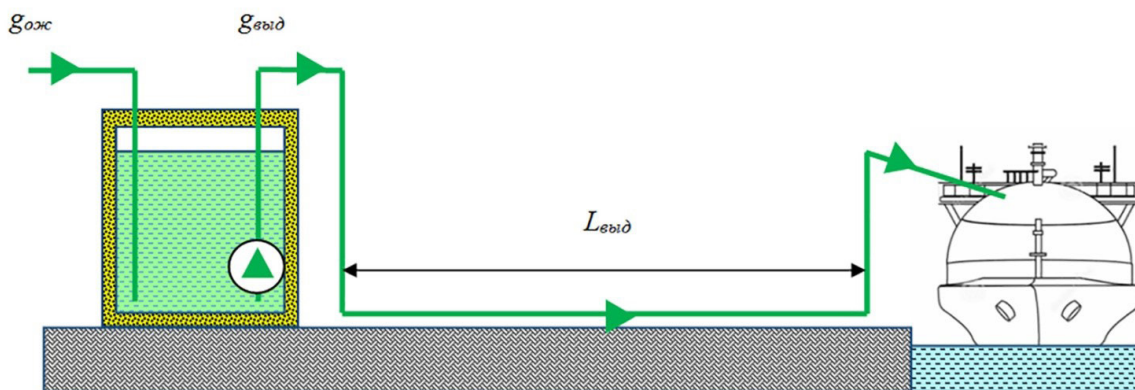


Рис. 1. Выдача СПГ в танкер-газовоз  
Fig. 1. LNG transfer to a LNG carrier vessel

таких гидрологических ограничений, однако, протяженность трубопроводов подачи СПГ в терминал составляет не менее 800 метров. При реализации проекта «Криогаз-СПГ» длина трубопровода подачи СПГ в заправочный терминал составила 3500 м [8]. При этом инженерно-технический состав предприятия в многочисленных интервью СМИ преподносит протяженность криогенного трубопровода как очевидное достижение «ни у кого в мире нет такого протяженного трубопровода».

Для специалистов в области криогенной техники очевидно, что при проектировании криогенного трубопровода важнейшим параметром является его минимальная протяженность, что обеспечивает минимальные энергетические потери, связанные с прогревом жидкости из-за теплопритока и гидравлические потери, а также затраты на его периодическое захлаживание. Использование криогенного трубопровода длиной 3,5 км в современном предприятии является ярким примером непонимания негативного влияния энергоэффективности данного элемента технологической цепи на технико-экономические показатели предприятия в целом.

«Ямал-СПГ», построенный в портовой зоне, и «Сахалин-СПГ» обладают трубопроводами большой протяженности. Фото- и видеоматериалы об этих проектах позволяют высказать обоснованное сомнение в том, что сложившаяся на практике длина трубопровода является минимально возможной.

В Университете ИТМО реализуется НИР № 620151 «Выбор и обоснование технологий изменения теплофизических параметров сжиженного природного газа для сокращения потерь от испарения при его накоплении, хранении и транспортировании», в рамках которой ведется поиск новых технологических решений, направленных на повышение энергоэффективности производства и транспортирования СПГ. Одним из потенциальных потребителей научно-технической информации, создаваемой в рамках проекта, является завод «Балтийский СПГ», работы по проектированию которого были возобновлены в 2020 году. Творческий коллектив проекта № 620151 использует завод «Балтийский СПГ» в качестве модельного объекта для формирования условий однозначности численных моделей отдельных элементов цепи производства СПГ, так как в 2017 году во время работы стратегической сессии по планированию создания и развития кластера «СПГ. ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ» руководство завода передало участникам

сессии подробную информацию о структуре, составе и характеристиках всех элементов [8].

Трубопроводы для подачи СПГ из накопительной емкости в заправочный терминал занимают уникальное положение среди криогенных жидкостных систем, если по протяженности они сопоставимы с заправочными системами космодромов, где удаление хранилища с жидким криопродуктом от стартовой площадки было оправдано соображениями безопасности, то по пропускной способности и по продолжительности непрерывной эксплуатации аналогов в современной технике у СПГ трубопроводов нет. Соответственно, при их разработке и эксплуатации крайне затруднительно воспользоваться опытом, накопленным в смежных областях низкотемпературных технологий. Основная технологическая задача трубопровода состоит в том, чтобы за относительно короткий промежуток времени, по действующим в настоящий день правилам не более 24 часов, переместить из накопительных емкостей в судно-газовоз (рис. 1) порцию СПГ объемом до 200 тыс. м<sup>3</sup>. Эта акция осуществляется периодически с интервалами порядка трех суток, что также не характерно для большинства криогенных систем. Ввиду сочетания ряда временных и расходных параметров использовать при проектировании трубопровода СПГ стандартные решения крайне затруднительно, поэтому в рамках указанного выше проекта для оценки эффективности инженерно-технологических решений использован метод математического моделирования транспортирования криогенных жидкостей, отработанный в рамках научно-исследовательской деятельности университета ИТМО.

#### Математическая модель трубопровода СПГ

Трубопровод можно представить в виде двух взаимодействующих элементов: канала подачи СПГ и внешней (теплоизолирующей) конструкции. Механизм переноса теплоты во внешней конструкции зависит от выбора схемы теплоизоляции и может носить частный характер в каждом эксперименте. Перенос теплоты из окружающей среды описывается аналитическими зависимостями, полученными на базе численного решения уравнения энергии. Построение математической модели теплового ограждения будет рассмотрено позднее.

Перенос теплоты в потоке смеси жидкой и паровой фаз описан с использованием более сложного

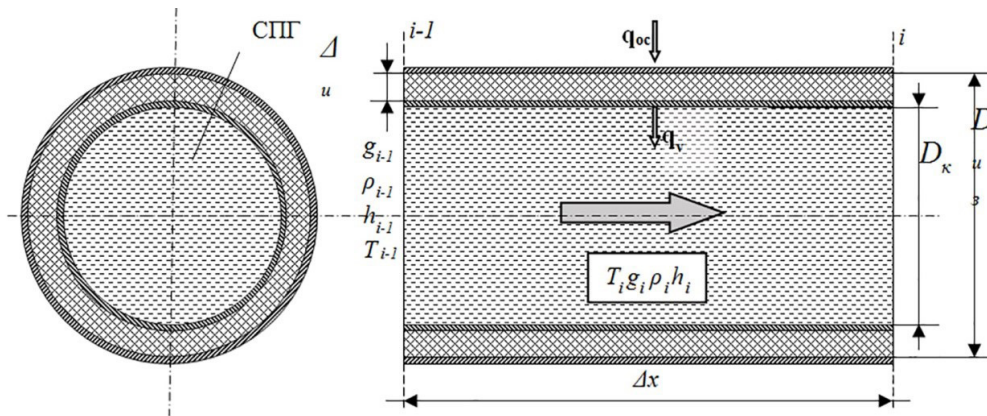


Рис. 2. Схема материальных и тепловых потоков через элементарный объем канала подачи СПГ  
Fig. 2. Scheme of material and heat flows through the elementary volume of the LNG supply channel

математического аппарата. Перенос теплоты в канале подачи СПГ осуществляется не теплопроводностью, а за счет конвекции и фазового перехода потока СПГ.

Аналитическую базу для построения математических моделей и для описания подобных процессов создает система дифференциальных уравнений (1–3) конвективного теплообмена [9], которая включает в себя уравнение энергии:

$$\begin{aligned} \rho \cdot \frac{\partial h}{\partial \tau} = & - \left( \frac{\partial q_{\lambda x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{\lambda y}}{\partial y} + \frac{\partial q_{\lambda z}}{\partial z} \right) - \\ & - \rho \cdot \left( W_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + W_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} + W_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \\ & - \rho \cdot h \cdot \left( \frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} \right) + q_v. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \cdot W_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot W_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot W_z)}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Уравнение движения:

$$\begin{aligned} \rho \cdot \frac{\partial W_x}{\partial \tau} = & \rho \cdot g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \\ & + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 \cdot W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \cdot W_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \cdot W_x}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

В полной трехмерной записи система уравнений позволяет моделировать практически любые процессы переноса теплоты и массы, однако для намеченных исследований рационально использовать одномерную форму этих уравнений. Это допущение обосновано формой и размерами канала подачи СПГ: длина объекта на три порядка больше диаметра, т.е. основные изменения будут распределены вдоль горизонтальной оси X. С учетом этого систему уравнений можно существенно упростить.

Процесс переноса теплоты описывается на большом числе элементарных участков канала подачи СПГ (рис. 2).

Поток СПГ поступает в объем от участка  $i-1$ , с расходом  $g_{i-1}$ , температурой  $T_{i-1}$ , плотностью  $\rho_{i-1}$ , энтальпией  $h_{i-1}$ . В общем случае поток состоит из паровой и жидкой фракций. Соотношение фракций описывается степенью сухости потока  $x_{i-1}$ . На  $i$ -ом участке к потоку СПГ подводится поток теплоты из окружающей среды.

Учитывая то, что трубы большого диаметра имеют существенную толщину стенки, которая выравнивает тепловые потоки по периметру трубы канала подачи СПГ, принимаем допущение, что теплота из окружающей среды равномерно распределена по всему объему  $i$ -го элементарного участка канала. Теплота из окружающей среды подводится от обечайки канала подачи СПГ. Тепловой поток к единице объема канала определяется из выражения:

$$q_v = \frac{\alpha^* \cdot \pi \cdot D_k \cdot (T_w - T_i)}{V_i}, \quad (4)$$

где  $V_i = 0,25 \cdot \pi \cdot D_k^2 \cdot \Delta x$ ,  $T_w$  — температура стенки канала на  $i$ -ом участке;  $\alpha^*$  — эффективный коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности канала подачи СПГ.

С учетом принятых допущений запись уравнения энергии и неразрывности для моделируемого объема принимает более простой вид.

Уравнение энергии связывает изменение энтальпии потока в элементарном участке канала с переносом теплоты вдоль координаты X, а также поступлением теплоты от распределенных источников теплоты:

$$\rho \cdot \frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{\partial q_{\lambda x}}{\partial x} - \rho \cdot W_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} - \rho \cdot h \cdot \frac{\partial W_x}{\partial x} + q_v. \quad (5)$$

Уравнение неразрывности (сплошности) описывает материальный баланс элементарного участка при известных значениях давления, температуры и плотности потока:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \cdot W)}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

Физические условия переноса теплоты в канале подачи СПГ позволяют упростить запись уравнения

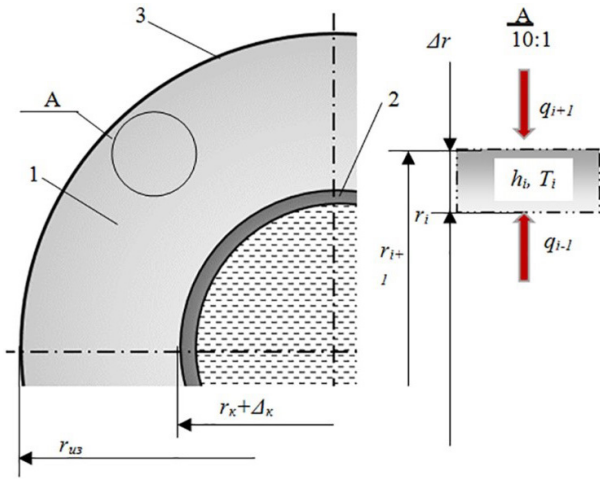


Рис. 3. Модель теплового ограждения трубопровода подачи СПГ  
Fig. 3. LNG pipeline thermal insulation model

энергии. Основная доля теплоты передается в процессе кипения СПГ, поэтому переносом теплоты теплопроводностью можно пренебречь:

$$\frac{\partial q_{\lambda x}}{\partial x} \approx 0. \quad (7)$$

Уравнение энергии приобретает вид:

$$\rho \cdot \frac{\partial h}{\partial \tau} = -\rho \cdot W_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} - \rho \cdot h \cdot \frac{\partial W_x}{\partial x} + q_v. \quad (8)$$

В общем случае изменение энтальпии потока СПГ зависит от интенсивности переноса массы и теплоты вдоль оси X, изменением плотности криоагента в объеме элементарного участка, влиянием распределенных источников теплоты. Для упрощения разработки программных продуктов можно представить уравнение (8) в виде теплового баланса единицы объема канала подачи СПГ:

$$\rho \cdot \frac{\partial h}{\partial \tau} = q_w + q_p + q_v. \quad (9)$$

Изменение энтальпии потока является результатом взаимодействия переноса теплоты конвекцией  $q_w$ , подвода теплоты из-за накопления массы  $q_p$ , поступлением теплоты распределенных источников  $q_v$ :

$$q_w = -\rho \cdot W_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x}. \quad (10)$$

Детализация математической модели позволяет создавать программные блоки, которые можно подключать или отключать в соответствии с алгоритмом работы канала подачи СПГ.

Подвод теплоты в процессе накопления массы:

$$q_p = -\rho \cdot h \cdot \frac{\partial W_x}{\partial x}. \quad (11)$$

Уравнение неразрывности сводит материальный баланс:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = -\frac{\partial(\rho \cdot W_x)}{\partial x}. \quad (12)$$

Перенос теплоты, потоком можно записать с использованием конечных разностей ( $\Delta h$ ,  $\Delta x$ ).

$$q_{w-x} = -\rho \cdot \left( W_x \cdot \frac{\Delta h}{\Delta x} \right) = -\rho \cdot \left( W_x \cdot \frac{h_i - h_{i-1}}{\Delta x} \right), \quad (13)$$

где  $h_{i-1}$ ,  $h_i$  — энтальпия потока на границах участка.

Интенсивность подвода теплоты при изменении плотности газа в объеме:

$$q_{p-x} = -\rho \cdot h_i \cdot \frac{\Delta W_x}{\Delta x} = -\rho \cdot h_i \cdot \frac{W_i - W_{i-1}}{\Delta x}, \quad (14)$$

где  $W_{i-1}$ ,  $W_i$  — скорость потока на границах участка.

Замена производных конечными разностями позволяет привести выражение (9) к виду:

$$\rho \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = q_w + q_p + q_v. \quad (15)$$

Решая уравнение (15) относительно нового значения энтальпии потока, получим:

$$h^i = h + \frac{(q_w + q_p + q_v) \cdot \Delta \tau}{\rho}. \quad (16)$$

### Распределенный подвод теплоты через теплое ограждение трубопровода подачи СПГ

Учитывая то, что продолжительность низкотемпературной кампании составляет не более 30% от общей продолжительности эксплуатации трубопровода, существенную роль в переносе теплоты из ОС играет теплоаккумулирующая способность изоляционных материалов. Для описания влияния физических свойств теплового ограждения на энергоэффективность работы трубопровода математическая модель дополнена дифференциальным уравнением энергии для объекта цилиндрической формы:

$$\rho \cdot \frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{\partial q}{\partial r} + q_v. \quad (17)$$

Для построения математической модели изоляции использована физическая модель теплового ограждения (рис. 3).

На рис. 3 приведен сектор теплового ограждения и геометрическая модель фрагмента элементарного цилиндра, на которые разбивается теплое ограждение при переходе от производных к конечным разностям. Теплоизолирующий материал 1 с внутренней стороны ограничен трубой канала подачи СПГ 2, а с наружной стороны внешним кожухом 3. Кожух защищает теплоизолятор от контакта с атмосферным воздухом и используется для вентиляции тепловой изоляции инертным газом.

Таблица 1. Характеристика трубопроводов с различной толщиной изоляции  
Table 1. Characteristics of pipelines with different insulation thickness

Характеристика	Толщина изоляции, мм						
	200	250	300	350	400	450	500
Наружный диаметр трубы, мм	1220	1220	1220	1220	1220	1220	1220
Диаметр изоляции, мм	1620	1720	1820	1920	2020	2120	2220
Диаметр кожуха, мм	1622	1722	1822	1922	2022	2122	2222
Вес трубы, $G_{tr}$ , кг/м	285	285	285	285	285	285	285
Объем изоляции, $V_{iz}$ , м <sup>3</sup> /м	0,9	1,2	1,4	1,7	2	2,4	2,7
Масса изоляции, $G_{tr}$ , кг/м	35,7	46,2	57,3	69	81,4	94,4	108
Площадь кожуха, $F$ , м <sup>2</sup> /м	5,1	5,4	5,7	6	6,3	6,7	7
Вес кожуха, $G_{tj}$ , кг/м	20,2	21,5	22,7	24	25,2	26,5	27,7

При переходе к конечным разностям выражение (17) приобретает вид:

$$\rho \cdot \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = \frac{\Delta q}{\Delta r} + q_v, \quad (18)$$

где  $\Delta q = q_{i+1} - q_{i-1}$ .

Подвод теплоты от смежных участков определяется разностью температур:

$$q_{i+1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (T_{i+1} - T_i)}{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)};$$

$$q_{i-1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (T_{i-1} - T_i)}{\ln\left(\frac{r_i}{r_{i-1}}\right)}. \quad (19)$$

Выражение для вычисления энтальпии элементарного участка на новом временном слое:

$$h'_i = h_i + \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = \frac{q_{i+1} + q_{i-1}}{\rho \cdot \Delta r} + q_v. \quad (20)$$

С использованием математических моделей канала подачи СПГ и его теплового ограждения было разработано и верифицировано соответствующее программное обеспечение, включающее базу данных о теплофизических свойствах СПГ, состав которого соответствует газу, подаваемому по трубопроводу «Северный поток-1»: 85% — метан, 3% — пропан, 2% — этан. С помощью этой математической модели были проведены численные исследования по моделированию переноса теплоты при реализации технологического цикла трубопровода подачи СПГ, снабженного газозаполненной изоляцией. Выбор именно газозаполненной изоляции (пенополиуритан, пеностекло, минеральная вата, каменная вата) не имеет альтернативы, хоть и проигрывает вакуумной теплоизоляции по показателям энергоэффективности (показатель теплопроводности для газонаполненных типов изоляции варьируется от 0,03...0,06 Вт/м·К), так как по предварительным оценкам диаметр трубы подачи криоагента превышает 1 метр, что делает невозможным изготовление вакуумной изоляции для трубопровода такого диаметра и протяженностью более одно-

го километра. Для проведенных расчётов был выбран вариант газонаполненной теплоизоляции типа каменная вата с показателем теплопроводности 0,06 Вт/м·К.

### Исследование процесса первичного захлаживания трубопровода

Алгоритм работы криогенного трубопровода подачи СПГ в транспортные суда состоит из двух активных и одного пассивного режима. Отгрузка СПГ осуществляется партиями по  $200 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup> и продолжается не более 24 часов. Для заводов с производительностью  $10 \cdot 10^6$  тонн СПГ в год время накопления порции в  $200 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup> составляет около 78 часов. Соответственно, очередной режим выдачи СПГ может быть начат не ранее чем через 54 часа после отгрузки предыдущего танкера. Более двух суток трубопровод подачи СПГ будет находиться в пассивном режиме отогрева, и, чтобы возобновить подачу продукции, необходимо восстановить температуру трубы канала подачи СПГ и тепловой изоляции. Для этого необходимо провести процесс захлаживания. Из-за высокой металлоемкости в конструкции канала подачи СПГ и высокой теплоаккумулирующей способности теплоизоляционного материала трубопровод обладает большой тепловой инерцией. Дополнительную тепловую инерцию придаёт масса теплоизоляции, увеличивая количество криоагента на захлаживание и снижая энергоэффективность. Не стоит забывать о том, что тепловая инерция вакуумной изоляции зависит только от металлоемкости конструкции трубопровода подачи, поскольку теплоизолирующая полость не имеет веса и теплоемкости, и в случае с меньшими диаметрами трубопроводов использование вакуумной теплоизоляции имеет больший смысл с точки зрения энергоэффективности. Подача СПГ по неохлажденному трубопроводу в танкер приведет к существенному увеличению потерь СПГ от испаряемости и увеличит продолжительность простоя танкера у причала. Рационально проводить предварительное захлаживание канала подачи СПГ до прибытия танкера. Из доступных публикаций неясно, как утилизируются пары СПГ, образовавшиеся в канале из-за подвода теплоты.

Традиционные схемы выжигания паров СПГ в факеле (который используется при транспортировке малыми транспортными средствами) в данном случае неприемлемо, потому что приведет к существенным потерям готовой продукции. Сле-

Таблица 2. Время переохлаждения трубы канала подачи СПГ с разной толщиной теплового ограждения до минимального температурного уровня  
 Table 2. The time for subcooling of the LNG supply channel pipe with different thickness of thermal insulation to minimum temperature level

Параметры	Толщина изоляции, мм						
	200	250	300	350	400	450	500
Температура, К	112,03	112,02	112,02	112,02	112,02	112,02	112,02
Время, час	1,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33

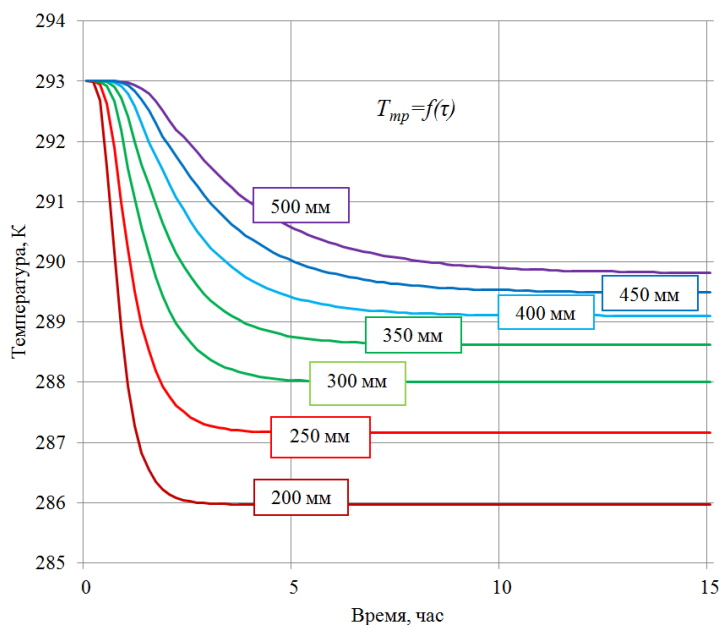


Рис. 4. График изменения температуры наружной поверхности защитного кожуха при разной толщине изоляции  
 Fig. 4. Temperature curve for the outer surface of the thermal insulation casing at different insulation thickness

дует помнить, что пары СПГ имеют температуру, близкую к состоянию насыщения, и обладают высокой теплопроводящей способностью, которую рационально утилизировать тем или иным образом.

В научной литературе по профилю исследований удалось обнаружить статью [10], в которой рассмотрен процесс утилизации образовавшихся паров при разгрузке танкера в приемном СПГ терминале. Нельзя не отметить, что предложенная схема не поясняет целый ряд вопросов. В частности, пары СПГ одновременно поступают в трех направлениях: в приемную накопительную емкость, в блок переконденсации паров и в линию топливного газа. На практике это невозможно, так как для подачи в паровое пространство накопительной емкости этот поток имеет слишком высокую температуру, так как перегревается при повышении давления в побудителе расхода и возвратной магистрали. Для подачи в линию топливного газа этот поток напротив имеет слишком низкую температуру, его необходимо перегреть за счет подвода внешней теплоты. Оценить пригодность паров СПГ для переконденсации можно только после оценки его температуры на выходе из возвратной магистрали. Запланированный эксперимент по моделированию процесса захлаживания канала подачи СПГ и отгрузке СПГ потребителю поможет оценить еще один важный аспект — количество образующихся паров СПГ.

В табл. 1 приведены конструктивные характеристики трубопровода, образованного на базе трубы 1200 мм при разной толщине изоляции. В зависимости от толщины слоя изоляции будет меняться внешний диаметр конструкции.

Наибольшую погонную массу в данной конструкции имеет труба канала подачи СПГ. Масса теплоизоляции значительно меньше и составляет чуть более 100 кг на погонный метр, причем в варианте с максимальной толщиной теплового ограждения. Однако именно материал тепловой изоляции оказывает основное влияние на энергетические показатели системы, так как теплоемкость теплоизоляционных материалов существенно выше, чем теплоемкость стали.

Из-за низкой теплопроводности теплоизоляционного материала время выравнивания поля температур по всей толщине изоляции достаточно велико, поэтому в течение длительного периода подвод теплоты от конструкции к криогенной жидкости превышает приток теплоты через наружную поверхность теплоизоляционного кожуха. Речь идет не о том, чтобы определить время выхода на установившийся режим, а выбрать некоторый момент, после которого трубопровод можно использовать для подачи СПГ и в последующем предварительно заправку танкера неким подготовительным периодом. Определить продолжительность периода захлажи-

Таблица 3. Минимальная температура наружного кожуха трубопровода подачи СПГ в заправочный терминал  
 Table 3. Minimum temperature for the thermal insulation casing of the LNG supply pipeline to the filling terminal

Параметры	Толщина изоляции, мм						
	200	250	300	350	400	450	500
Температура, К	285,97	287,16	288,00	288,62	289,10	289,49	289,81
Время, час	3,67	5,00	6,50	9,00	12,67	14,00	15,67

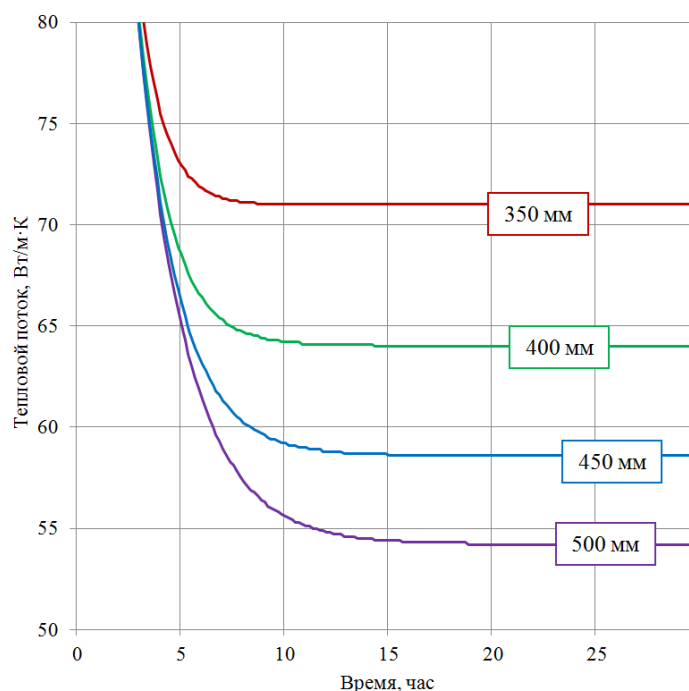


Рис. 5. Удельный тепловой поток от внутренней поверхности канала подачи СПГ при разной толщине слоя тепловой изоляции  
 Fig. 5. Specific heat flow from the inner surface of the LNG supply channel with different thickness of the thermal insulation layer

вания по температуре внутренней поверхности трубы не представляется возможным, так как время переохлаждения трубы до уровня близкого к температуре СПГ почти не зависит от толщины теплового ограждения (табл. 2).

Судить о том, что теплоизоляционная конструкция трубопровода вышла на установившийся температурный режим, можно по температуре поверхности кожуха тепловой изоляции (рис. 4). В зависимости от выбранной толщины изоляции время установления температуры на минимальном уровне составило от 3 до 16 часов (табл. 3). Однако, как показывает исследование распределения поля температур по толщине изоляции, даже спустя 30 часов профиль температуры по толщине изоляции имеет характер выпуклой кривой, что говорит о незавершенности процесса переохлаждения теплоизоляционного материала.

Температура поверхности внешнего кожуха теплового ограждения дает более точное представление о продолжительности периода перехода в установившийся температурный режим, который обеспечивает минимальный, для данной теплоизо-

ляционной конструкции, уровень подвода теплоты к криоагенту. Если исходить из данных таблицы, продолжительность периода захлаживания составляет от 3,7 до 15,7 час.

Наиболее информативным представляется график интенсивности подвода теплоты к СПГ через один погонный метр трубопровода (рис. 5). Для изоляционных конструкций толщиной от 350 до 500 мм удельный поток теплоты составляет от 54 до 71 Вт/м. Исходя из того, что графики имеют достаточно стабильную структуру, можно ограничить время первичного захлаживания трубопровода 10 часами.

Технологическая задача криогенного трубопровода подачи СПГ состоит в перемещении объема СПГ в количестве 200 000 м<sup>3</sup> (88 400 тонн) в течение 24 часов, процесс подачи повторяется через 54 часа, из которых 10 часов занимает процесс восстановления температуры теплового ограждения.

Учитывая полученные результаты, численный эксперимент был продолжен с увеличением диапазона выбора толщины тепловой изоляции до 1000 мм. Моделирование работы трубопроводов с различной

Таблица 4. Величина удельного подвода теплоты через единицу длины канала подачи СПГ в первых пяти технологических циклах (МДж/м) и при разной толщине теплового ограждения  
 Table 4. Specific heat supply through a unit length of the LNG supply channel during the first five technological cycles (MJ/m) and at different thickness of the thermal insulation

Номер цикла	Режим	Толщина изоляции, мм			
		250	500	750	1000
1	Захолаживание	22,94	22,85	22,87	22,89
	Подача	8,00	4,83	4,05	3,87
2	Захолаживание	11,38	7,39	5,70	4,82
	Подача	9,04	5,41	4,16	3,50
3	Захолаживание	11,38	7,39	5,70	4,77
	Подача	9,04	5,41	4,15	3,50
4	Захолаживание	11,38	7,39	5,70	4,77
	Подача	9,04	5,41	4,15	3,50
5	Захолаживание	11,38	7,39	5,70	4,77
	Подача	9,04	5,41	4,15	3,50

Таблица 5. Характеристика энергоэффективности теплового ограждения канала подачи СПГ в заправочный терминал длиной 1500 м  
 Table 5. Characteristics of the energy efficiency of the thermal insulation for the LNG supply channel to the filling terminal with a length of 1500 m

Показатели	Толщина изоляции, мм			
	250	500	750	1000
Подвод теплоты за один цикл, ГДж	30,6	19,2	14,8	12,4
Затраты СПГ на захолаживание, кг	33471	21735	16765	14029
Масса СПГ испарившегося во время заправки танкера, кг	26588	15912	12206	10294
Потери СПГ от подвода теплоты из ОС, кг	60059	37647	28971	24324
Масса СПГ, поданная в танкер за один цикл, кг	$88,4 \cdot 10^6$	$88,4 \cdot 10^6$	$88,4 \cdot 10^6$	$88,4 \cdot 10^6$
Относительные потери СПГ при заправке, %	0,027	0,032	0,042	0,067

толщиной ограждения в течение пяти технологических циклов позволило оценить величину подвода теплоты и время перехода цикла в установившийся режим. Результаты приведены в табл. 4.

Из данных табл. 4 видно, что величина подвода теплоты из ОС для каждого варианта исполнения изоляции не изменяется, начиная с третьего технологического цикла. При этом экстенсивный метод снижения подвода теплоты из ОС очевидно неэффективен. Увеличение толщины теплового ограждения от 250 до 1000 мм не сопровождается пропорциональным снижением подвода теплоты через изоляцию. В пятом технологическом цикле подвод теплоты в варианте с минимальной толщиной изоляции оказался в 2,47 раза больше, чем в варианте с толщиной изоляции в 4 раза больше.

Причиной относительно низкой эффективности увеличения толщины теплового ограждения может быть недостаточная продолжительность низкотемпературного этапа технологического цикла, из-за которой в средней части теплового ограждения сохраняется участок с нелинейным распределением температуры. Наличие такого участка увеличивает

эффективную теплоаккумулирующую способность теплового ограждения, которая создает условия для реактивного переноса теплоты. Понятие реактивного переноса теплоты введено по аналогии с реактивным переносом электричества, которое также основано на аккумулярующей способности цепи и колебании потенциала.

Задачу снижения величины реактивного переноса теплоты через изоляцию нельзя решить путем уменьшения толщины теплового ограждения, как это сделано, например, в случае оптимизации конструкции теплового ограждения кабины установок для общего криотерапевтического воздействия (WBC) [11]. Несмотря на то, что физическая картина переноса теплоты через теплое ограждение кабины для WBC идентична по структуре технологическому циклу канала подачи СПГ, хронологические различия в процессах переноса теплоты слишком велики. В системах WBC [12] уменьшение толщины теплового ограждения от 100 до 50 мм существенно улучшило показатели энергоэффективности кабины пациента прежде всего за счет снижения доли реактивного переноса теплоты через



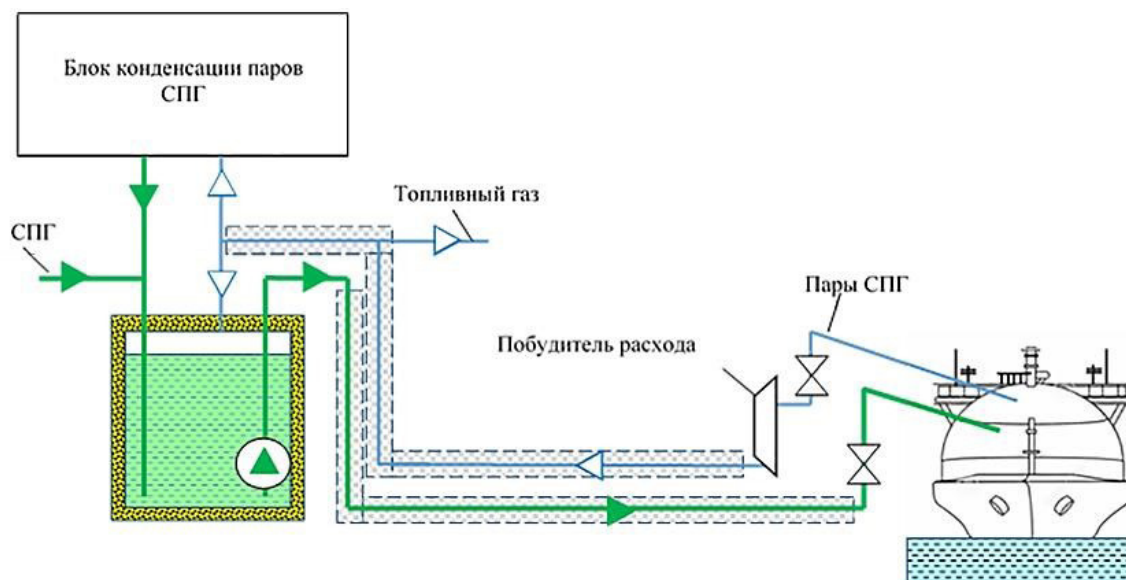


Рис. 6. Схема утилизации паров природного газа  
Fig. 6. BOG disposal scheme

теплоизолирующую конструкцию. В случае теплового ограждения канала подачи СПГ в заправочный терминал наблюдается иная картина (см. табл. 4): по мере уменьшения толщины теплового ограждения подвод теплоты из ОС существенно возрастает, что противоречит поставленной задаче исследований.

В соответствии с принятой тактикой организации исследований в табл. 5 приведены энергетические показатели, рассчитанные для канала подачи СПГ в заправочный терминал завода проекта «Балтийский СПГ». Проектная длина этого трубопровода составляет 1500 м [1].

В зависимости от выбора толщины теплового ограждения за один технологический цикл от подвода теплоты из ОС меняется от 24 до 60 тонн СПГ и образуется соответствующее количество насыщенного пара, энтальпия которого на 582 кДж/кг меньше энтальпии природного газа при температуре ОС. Необходимо разработать технологические решения, способные предупредить испарение СПГ в канале доставки, обеспечить энергоэффективную утилизацию насыщенных паров и возврат их в накопительную емкость.

Основой утилизационной технологии может быть схема, приведенная на рис. 6. Для полного подавления парообразования в канале подачи СПГ последний следует снабдить системой криостатирования на основе газового, например, азотного цикла, который обеспечит постоянство температурного режима и отвод теплопритоков их ОС.

Программное обеспечение численного эксперимента по моделированию нестационарного переноса теплоты в трубопроводе подачи СПГ в заправочный терминал позволяет выполнить намеченные исследования.

#### Список источников

1. Migliore C., Tubilleja C., Vesovic V. Weathering prediction model for stored liquefied natural gas (LNG) // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015. Vol. 26. P. 570–580. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.06.056.

2. Zakaria M. S., Osman K., Saadun M. N. A. [et al.]. Computational Simulation of Boil-Off Gas Formation inside Liquefied Natural Gas Tank Using Evaporation Model in ANSYS Fluent // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 393. P. 839–844. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.393.839.

3. Zakaria M. S., Osman K., Musa M. N. Boil-Off Gas Formation inside Large Scale Liquefied Natural Gas (LNG) Tank Based on Specific Parameters // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vols. 229–231. P. 690–694. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.229-231.690.

4. Adom E., Islam S. Z., Ji X. Modelling of Boil-Off Gas in LNG Tanks: A Case Study // *International Journal of Engineering and Technology*. 2010. Vol. 2 (4). P. 292–296.

5. Pellegrini L. A., Molioli S., Brignoli F. [et al.]. LNG Technology: The Weathering in Above-Ground Storage Tanks // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014. Vol. 53, Issue 10. P. 3931–3937. DOI: 10.1021/ie404128d.

6. He T., Karimi I. A., Ju Y. Review on the design and optimization of natural gas liquefaction processes for onshore and offshore applications // *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. Vol. 132. P. 89–114. DOI: 10.1016/j.cherd.2018.01.002.

7. Miana M., del Hoyo R., Rodrigblvarez V. [et al.]. Calculation models for prediction of Liquefied Natural Gas (LNG) ageing during ship transportation // *Applied Energy*. 2010. Vol. 87, Issue 5. P. 1687–1700. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.10.023.

8. Густов С. В., Петров Г. Д., Харченко В. Г. Направления деятельности участников Кластера СПГ в области оборудования и технологий производства сжиженного природного газа // СПГ. Оборудование и технологии: стратегическая сессия по планированию создания и развития промышленного кластера, 14–15 сент. 2017 г. Санкт-Петербург, 2017.

9. Rohsenow W. M., Hartnett J. P., Ganic E. N. Handbook of heat transfer fundamentals. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Co, 1985. 1440 p.

10. Mokhatab S., Mak J. Y., Valappil J. V. [et al.]. Handbook of Liquefied Natural Gas. 1st ed. Houston, Texas: Gulf Professional Publishing, 2013. 514 p.

11. Vasilenok A. V., Baranov A. Y., Malysheva T. A. [et al.]. The cost of liquid nitrogen for WBC sessions // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 826, no. 1. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/826/1/012014.

12. Баранов А. Ю., Василенок А. В., Соколова Е. В. [и др.]. Теплофизические основы производства эффективной аппаратуры для общего криотерапевтического воздействия // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45, № 3. С. 39–57. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-39-57.

**АНДРЕЕВ Анатолий Михайлович**, аспирант факультета энергетики и экотехнологий, инженер мегафакультета биотехнологий и низкотемпературных систем.

SPIN-код: 8544-7567

AuthorID (РИНЦ): 1092126

ORCID: 0000-0003-2463-5599

AuthorID (SCOPUS): 57216965537

Адрес для переписки: tolia.andreev@gmail.com

**БАРАНОВ Александр Юрьевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор факультета низкотемпературной энергетики.

SPIN-код: 1591-4442

AuthorID (РИНЦ): 268734

ORCID: 0000-0002-9263-8153

AuthorID (SCOPUS): 57191032604

ResearcherID: D-9808-2017

Адрес для переписки: abaranov@itmo.ru

**СОКОЛОВА Екатерина Владимировна**, кандидат технических наук, старший преподаватель факультета низкотемпературной энергетики.

SPIN-код: 9397-9168

AuthorID (РИНЦ): 706136

ORCID: 0000-0002-5127-9959

AuthorID (SCOPUS): 57211860395

ResearcherID: AAK-7604-2021

Адрес для переписки: evlogvinenko@itmo.ru

**МАЛЫШЕВА Татьяна Алексеевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент факультета низкотемпературной энергетики.

SPIN-код: 3641-7286

AuthorID (РИНЦ): 533414

ORCID: 0000-0001-5392-4846

AuthorID (SCOPUS): 57191042146

ResearcherID: P-3157-2016

Адрес для переписки: tamalysheva@itmo.ru

**ИВАНОВ Лев Владимирович**, аспирант факультета энергетики и экотехнологий, инженер-исследователь мегафакультета биотехнологий и низкотемпературных систем.

SPIN-код: 3491-9440

AuthorID (РИНЦ): 977804

ORCID: 0000-0002-6916-7154

AuthorID (SCOPUS): 57216964617

#### Для цитирования

Андреев А. М., Баранов А. Ю., Соколова Е. В., Малышева Т. А., Иванов Л. В. Исследование энергоэффективности запорного трубопровода СПГ от выбора теплоизоляционной конструкции // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2021. Т. 5, № 2. С. 25–36. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-25-36.

Статья поступила в редакцию 21.03.2021 г.

© А. М. Андреев, А. Ю. Баранов, Е. В. Соколова, Т. А. Малышева, Л. В. Иванов

# RESEARCH OF THE ENERGY EFFICIENCY OF AN LNG FILLING PIPELINE FROM THE CHOICE OF A THERMAL INSULATION STRUCTURE

A. M. Andreev, A. Yu. Baranov, E. V. Sokolova,  
T. A. Malysheva, L. V. Ivanov

ITMO University,  
Russia, Saint Petersburg, Kronverksky Ave., 49, 197101

**Reduction of technological losses of natural gas during production, transportation and storage is of major energy and environmental importance. Losses of natural gas are the target for active criticism by «green energy» representatives. It is necessary to develop and popularize the new technological solutions aimed at reducing the indirect impact on the environment associated with the production and use of liquefied natural gas, to demonstrate the readiness of specialists of this energy sector to take into account modern social preferences. The article presents the numerical analysis of the energy efficiency for one of the stages of large-scale LNG production, namely, the LNG delivery from a storage tank to a LNG carrier vessel via a cryogenic pipeline. The mathematical model of the thermal enclosure of the pipeline has been considered, and the production cryoproduct losses due to thermal inertia of pipeline materials have been estimated. The performance of the schemes recommended for utilization of LNG vapors has been evaluated.**

**Keywords:** liquefied natural gas, heat inflows, pipeline, thermal insulation, vapor re-liquefaction, heat removal capacity.

## References

1. Migliore C., Tubilleja C., Vesovic V. Weathering prediction model for stored liquefied natural gas (LNG) // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015. Vol. 26. P. 570–580. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.06.056. (In Engl.).
2. Zakaria M. S., Osman K., Saadun M. N. A. [et al.]. Computational Simulation of Boil-Off Gas Formation inside Liquefied Natural Gas Tank Using Evaporation Model in ANSYS Fluent // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 393. P. 839–844. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.393.839. (In Engl.).
3. Zakaria M. S., Osman K., Musa M. N. Boil-Off Gas Formation inside Large Scale Liquefied Natural Gas (LNG) Tank Based on Specific Parameters // *Applied Mechanics and Materials*. 2012. Vols. 229–231. P. 690–694. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.229-231.690. (In Engl.).
4. Adom E., Islam S. Z., Ji X. Modelling of Boil-Off Gas in LNG Tanks: A Case Study // *International Journal of Engineering and Technology*. 2010. Vol. 2 (4). P. 292–296. (In Engl.).
5. Pellegrini L. A., Moioli S., Brignoli F. [et al.]. LNG Technology: The Weathering in Above-Ground Storage Tanks // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2014. Vol. 53, Issue 10. P. 3931–3937. DOI: 10.1021/ie404128d. (In Engl.).
6. He T., Karimi I. A., Ju Y. Review on the design and optimization of natural gas liquefaction processes for onshore and offshore applications // *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. Vol. 132. P. 89–114. DOI: 10.1016/j.cherd.2018.01.002. (In Engl.).
7. Miana M., del Hoyo R., Rodrigólvarez V. [et al.]. Calculation models for prediction of Liquefied Natural Gas (LNG) ageing during ship transportation // *Applied Energy*. 2010. Vol. 87, Issue 5. P. 1687–1700. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.10.023. (In Engl.).
8. Gustov S. V., Petrov G. D., Kharchenko V. G. Napravleniya deyatel'nosti uchastnikov Klastera SPG v oblasti oborudovaniya i tekhnologiy proizvodstva szhizhennogo prirodnogo gaza [Cluster members in the field of equipment and technologies for the production of liquefied natural gas] // *SPG. Oborudovaniye i tekhnologii*. St. Petersburg, 2017. (In Russ.).
9. Rohsenow W. M., Hartnett J. P., Ganic E. N. Handbook of heat transfer fundamentals. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Book Co, 1985. 1440 p. (In Engl.).
10. Mokhtab S., Mak J. Y., Valappil J. V. [et al.]. Handbook of Liquefied Natural Gas. 1st ed. Houston, Texas: Gulf Professional Publishing, 2013. 514 p. (In Engl.).
11. Vasilenok A. V., Baranov A. Y., Malysheva T. A. [et al.]. The cost of liquid nitrogen for WBC sessions // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 826, no. 1. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/826/1/012014. (In Engl.).
12. Baranov A. Yu., Vasilenok A. V., Sokolova E. V. [et al.]. Teplofizicheskiye osnovy proizvodstva effektivnoy apparatury dlya obshchego krioterapevticheskogo vozdeystviya [Thermophysical bases of production of effective equipment for general cryotherapeutic exposure] // *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*. 2018. Vol. 45, no. 3. P. 39–57. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-39-57. (In Russ.).

**ANDREEV Anatoliy Mikhailovich**, Graduate Student of Energy and Ecotechnology Faculty, Engineer of Biotechnology and Cryogenic Systems School.  
SPIN-code: 8544-7567  
AuthorID (RSCI): 1092126  
ORCID: 0000-0003-2463-5599  
AuthorID (SCOPUS): 57216965537  
Correspondence address: tolia.andreev@gmail.com



**BARANOV Aleksander Yurievich**, Doctor of Technical Sciences, Professor of Low-Temperature Energy Faculty.  
SPIN-code: 1591-4442  
AuthorID (RSCI): 268734  
ORCID: 0000-0002-9263-8153  
AuthorID (SCOPUS): 57191032604  
ResearcherID: D-9808-2017  
Correspondence address: abaranov@itmo.ru

**SOKOLOVA Ekaterina Vladimirovna**, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Low-Temperature Energy Faculty.  
SPIN-code: 9397-9168  
AuthorID (RSCI): 706136  
ORCID: 0000-0002-5127-9959  
AuthorID (SCOPUS): 57211860395  
ResearcherID: AAK-7604-2021  
Correspondence address: evlogvinenko@itmo.ru

**MALYSHEVA Tatiana Alekseevna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Low-Temperature Energy Faculty.  
SPIN-code: 3641-7286  
AuthorID (RSCI): 533414  
ORCID: 0000-0001-5392-4846

AuthorID (SCOPUS): 57191042146  
ResearcherID: P-3157-2016  
Correspondence address: tamalysheva@itmo.ru  
**IVANOV Lev Vladimirovich**, Graduate Student, Energy and Ecotechnology Faculty, Research Engineer of Biotechnology and Cryogenic Systems School.  
SPIN-code: 3491-9440  
AuthorID (RSCI): 977804  
ORCID: 0000-0002-6916-7154  
AuthorID (SCOPUS): 57216964617

#### For citations

Andreev A. M., Baranov A. Yu., Sokolova E. V., Malysheva T. A., Ivanov L. V. Research of the energy efficiency of an LNG filling pipeline from the choice of a thermal insulation structure // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2021. Vol. 5, no. 2. P. 25–36. DOI: 10.25206/2588-0373-2021-5-2-25-36.

Received March 21, 2021.

© A. M. Andreev, A. Yu. Baranov, E. V. Sokolova,  
T. A. Malysheva, L. V. Ivanov