

Выбор оптимального теплоизоляционного покрытия трубопроводов сжиженного природного газа

Введение

В настоящее время, в связи с происходящими геополитическими изменениями, осуществляется значительная трансформация производственно-сбытовой инфраструктуры сетевого природного и сжиженного природного газов. По данным из открытых источников, в 2021 году мировой спрос на СПГ составил 383 млн тонн. На сегодняшний день Россия находится на шестом месте в списке стран-производителей СПГ с общим объёмом экспорта 24,9 млрд м³ и имеет более 8% от общего мирового экспорта. Так, за девять месяцев 2022 года производство СПГ в России достигло 24,1 млн тонн, что на 11,9% превышает аналогичные показатели 2021 года.

Вместе с тем замена западных поставщиков оборудования и технологий для производства сжиженного газа, по объективным причинам, в ближайшие один-два года может несколько замедлить развитие российских СПГ-проектов, но в перспективе к 2030 году планируется занять 15–20% мирового рынка, до 65 млн тонн к 2024-му и до 140 млн тонн — к 2035 году [1]. Все эти планы отражены в «Долгосрочной программе развития производства сжиженного природного газа в Российской Федерации», предполагающей расширение использования российских технологий сжижения природного газа и оборудования, развитие средне- и крупнотоннажных производств, создание СПГ-кластеров и газохимических производств [2].

Как показывает анализ СПГ-проектов, затраты на трубопроводную транспортировку СПГ (совместно с добычей) составляют до 15–20% стоимости производственно-сбытовой цепи, поэтому тема повышения эффективности и надёжности транспортировки газа становится особенно актуальной.

Целью работы является анализ конструктивных особенностей и материалов криогенных трубопроводов для транс-

портировки СПГ, применяемых для них теплоизоляционных материалов и их характеристик, напрямую оказывающих влияние на процесс перекачки газа.

Материалы и методы

Определение типа и толщины оптимального слоя тепловой изоляции трубопроводов является одной из часто решаемых задач при технико-экономическом обосновании эффективности принимаемых конструктивных и проектных решений [3]. Как правило, с увеличением толщины тепловой изоляции снижаются тепловые потери трубопровода в окружающую среду, но увеличиваются затраты в его сооружение

Как показывает анализ СПГ-проектов, затраты на трубопроводную транспортировку СПГ (совместно с добычей) составляют до 15–20% стоимости производственно-сбытовой цепи, поэтому тема повышения эффективности и надёжности транспортировки газа становится особенно актуальной

и эксплуатацию. Поскольку температура перекачиваемого сжиженного природного газа намного ниже температуры среды, окружающей трубопровод с изоляцией, к СПГ через них непрерывно подводится тепло, даже несмотря на применение эффективной теплоизоляции.

Актуальной задачей является сведение данных теплопритоков к минимуму [4–6]. Потери СПГ за счёт теплопритоков зависят от различных параметров, линейно возрастающих во времени, в том числе: термодинамические характеристики газа, геометрические характеристики трубопроводных коммуникаций, типа и толщины слоя изоляции трубопровода, температуры окружающей среды.

Рецензия эксперта на статью получена 16.01.2023 [The expert review of the article was received on January 16, 2023]

УДК 621.644.07:679.743.2. Научная специальность: 2.1.3 (05.23.03).

Выбор оптимального теплоизоляционного покрытия трубопроводов сжиженного природного газа

О. Н. Медведева, д.т.н., доцент, профессор; **С. Д. Перевалов**, аспирант, кафедра «Теплогазоснабжение и нефтегазовое дело», [Саратовский государственный технический университет \(СГТУ\)](#)

В статье представлено обоснование типа и толщины изоляционного материала для снижения потерь сжиженного природного газа (СПГ) при его транспортировке по трубопроводам. По результатам анализа выбраны эффективные изоляционные материалы, определена оптимальная толщина изоляции, обеспечивающая требуемый уровень потерь на испарение газа. Для нахождения оптимальной толщины тепловой изоляции использовался метод вариантных расчётов.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, криогенный трубопровод, тепловая изоляция, оптимальная толщина.

UDC 621.644.07:679.743.2. The number of scientific specialty: 2.1.3 (05.23.03).

Selection of the optimal thermal insulation coating of liquefied natural gas pipelines

O. N. Medvedeva, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor; **S. D. Perevalov**, postgraduate student, the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business, [Yuri Gagarin State Technical University of Saratov \(SSTU\)](#)

The article presents the rationale for the type and thickness of the insulating material to reduce the loss of liquefied natural gas (LNG) during its transportation through pipelines. Based on the results of the analysis, effective insulating materials were selected, the optimal thickness of the insulation was determined, providing the required level of losses for gas evaporation. To find the optimal thickness of thermal insulation, the method of variant calculations was used.

Key words: liquefied natural gas, cryogenic pipeline, thermal insulation, optimal thickness.

На сегодняшний день в РФ основополагающим нормативным документом, устанавливающим требования по проектированию тепловой изоляции оборудования и трубопроводов, является [СП 61.13330.2012 \[7\]](#), в котором представлены уравнения стационарной теплопередачи через многослойные цилиндрические стенки с допущением об одномерности температурного поля в слое тепловой изоляции.

Основные требования, предъявляемые к теплоизоляционным материалам, используемым в криогенной технике [8–11]: низкое значение коэффициента теплопроводности; отсутствие химического взаимодействия с перевозимым СПГ, с элементами и материалами цистерны; малая гигроскопичность и плотность; удобство монтажа; надёжность эксплуатации; прочность на сжатие и др.

Для каждого конкретного случая выбор типа изоляции определяется рядом дополнительных факторов, например, допустимой величиной испарения газа, температурой перевозимого СПГ, размером изоляционной конструкции и сложностью её конфигурации, стоимостью изоляционного материала и др. Кроме того, нецелесообразно использовать эффективную, но дорогую изоляцию.

Конструкция тепловой изоляции для трубопроводов в том числе должна иметь оптимальное соотношение между стоимостью теплоизоляционного слоя и стоимостью тепловых потерь через изоляцию в течение расчётного срока службы или обеспечить нормированную плотность потока, в соответствии с требованиями [СП 60.13330.2012 \[7\]](#), и требуемые параметры технологического режима перекачки сжиженного газа.

Теплоизоляционные материалы, используемые в криогенной технике, условно подразделяют на волокнистые, порошкообразные (зернистые) и пористые (ячеистые) [12]. Широко применение для тепловой защиты криогенных ёмкостей получили экранно-вакуумная и вакуумно-порошковая (волокнистая) термоизоляции, которые имеют низкий коэффициент теплопроводности, как при атмосферном давлении, так и в условиях вакуума. Применение глубокого вакуума как изоляции исключает перенос теплоты за счёт конвекции и теплопроводности газа [12, 13].

Отечественные производители используют для защиты криогенного оборудования перлитно-вакуумную и многослойную экранно-вакуумную изоляцию. Вспененный перлитовый песок — гравий алюмосиликатных вулканических пород, подвергшийся тепловому удару при высокой температуре, — имеет низкую стои-



мость. В качестве его недостатков следует отметить повышенную хрупкость частиц, увеличенный расход материала, снижение газопроницаемости и повышение влажности изоляции в процессе уплотнения. В многослойной экранно-вакуумной изоляции изоляционные слои, чередующиеся с отражающими плёнками, помещаются в вакуумную полость между ёмкостью и наружным кожухом. Используется в основном для защиты криогенных резервуаров и цистерн и имеет сложную технологию создания вакуума в изоляционной полости. К современной невакуумной изоляции относят гидрофобные ма-

Основные требования, предъявляемые к теплоизоляции для криогенной техники: низкое значение коэффициента теплопроводности; отсутствие химического взаимодействия; малая гигроскопичность и плотность; удобство монтажа; надёжность; прочность на сжатие и др.

териалы, например, вспененный каучук и криогель. Последний имеет низкую теплопроводность, малый вес и не горюч.

Обзор современных изоляционных материалов, используемых в криогенных системах, позволил выбрать для последующего сравнительного расчёта эластомерные вспененные материалы различных производителей (табл. 1 и 2).

На основе существующих методов расчёта теплопритока через слой изоляционного материала и стенку трубопровода был выполнен расчёт необходимой толщины изоляции для достижения требуемого теплового эффекта по заданному объёму потерь от испарения перекачиваемого СПГ в сутки. Анализ современных методик расчёта теплопритока через поверхность корпуса резервуара СПГ позволяет сделать вывод, что все предлагаемые методики основываются на законах теплопроводности Фурье и Ньютона — Рихмана. Тепловой поток через многослойные цилиндрические поверхности на основании закона Фурье определяется уравнением следующего вида:

$$q_i = \frac{2\pi(t_i - t_{i+1})}{\frac{1}{\lambda_i} \ln\left(\frac{d_{i+1}}{d_i}\right)}, \quad (1)$$

где λ_i — коэффициент теплопроводности i -го слоя n -слойной стенки, Вт/(м·К); Δi — толщина i -го слоя n -слойной стенки, м; t_i — температура i -го слоя n -слойной стенки, К; d_i — диаметр i -го слоя n -слойной стенки, м.

✶ Характеристики сравниваемых вариантов тепловой изоляции трубопроводов СПГ табл. 1

Тип покрытия	Основные характеристики
Криогенные системы Armaflex	Многослойная изоляция из эластомерных вспененных материалов, например каучука, выдерживает температуру до -196°C . Снижает риск коррозии под изоляцией, используется в качестве первого слоя в криогенных системах. Выпускается в виде трубной и рулонной изоляции, а также антиабразивной фольги как дополнительного слоя. Коэффициент теплопроводности в зависимости от средней температуры, по данным производителя, определяется по формуле: $\lambda(t_{cp}) = 0,04 + 9 \times 10^{-7} t_{cp} + 1,5 \times 10^{-9} t_{cp}^2$. Сохраняет эластичность при сверхнизких температурах, обеспечивает продольное сжатие и расширение изоляции без использования дополнительных слоёв пароизоляции. Толщина изоляции — 25 мм
Аэрогель Cryogel™Z	Эластичный материал, устойчивый к сжимающим нагрузкам. Представляет холст из стекловолокна, насыщенный частицами аэрогеля (например, диоксида кремния) и покрытый пароизоляционным слоем алюминиевой фольги, дублированной полимерной плёнкой. Аэрогель на 95 % состоит из воздуха и равномерно распределяется по слою изоляции. Толщина изоляции — 5 и 10 мм
K-Flex ST	Гибкий полимерный материал на основе вспененного каучука с дополнительным защитным полимерным покрытием In Clad. Температура применения — от -200°C . Толщина от 3 до 50 мм
Aeroflex EPDM	Теплоизоляция из вспененного синтетического этиленпропилендиенового непolarного каучука с встроенными сопряжёнными углеводородами (EPDM) с закрытой ячеистой структурой. Эластичный материал, стоек к воздействию воды и ультрафиолета. Для температур ниже -110°C для предотвращения растрескивания изоляции, появления мостиков холода дополняется антиабразивным фрикционным паро- и газоизоляционным слоем. Выпускается в виде трубок, листов и рулонов. Температура применения — от -185°C

✶ Показатели сравниваемых вариантов тепловой изоляции трубопроводов СПГ табл. 2

Тип изоляционного покрытия	Стоимость изоляции, тыс. руб/м³	Коефф. теплопроводности (при 0°C), Вт/(м·К)
Вспененный синтетический каучук K-Flex ST	74,89	0,036
Трёхкомпонентный диеновый полимер Armaflex LTD	44,97	0,038
Аэрогель Cryogel™Z	184,00	0,013
Вспененный синтетический каучук Aeroflex EPDM	117,39	0,0354

Перенос теплоты между поверхностью стенки и жидкой (газообразной) средой согласно закону Ньютона — Рихмана для наружной (2) и внутренней (3) поверхностей определяется по уравнениям:

$$q_n = \alpha_n(t_n - t_i); \quad (2)$$

$$q_{вн} = \alpha_{вн}(t_{i+1} - t), \quad (3)$$

где $\alpha_{вн}$ и α_n — коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей стенок оболочки цистерны, Вт/(м²·°C); $t_{ж}$ — температура СПГ внутри цистерны, °C; t_n — температура окружающей среды, °C.

Согласно алгоритму, представленному в [7], толщина теплоизоляции трубопровода составит:

$$\delta_{из} = \lambda_{из} \left[\frac{K(t_b - t_n)}{q_L} - R_n^L \right], \quad (4)$$

где t_b и t_n — температуры СПГ внутри изолируемого трубопровода и окружающей среды, соответственно, °C; K — коэффициент дополнительных теплопотерь трубопровода; $\lambda_{из}$ — коэффициент теплопроводности материала изоляции, Вт/(м·°C); R_n^L — линейное термическое сопротивление теплоотдаче цилиндрической стенки изолируемого трубопровода, (м·°C)/Вт.

Учитывая, что процесс является стационарным, принимаем интенсивность теплопритока постоянной. Тогда, согласно [14], определим массу испаряемого СПГ из соотношения:

$$M_{исп} r = q_L \tau F, \quad (5)$$

где r — удельная теплота испарения продукта, Дж/кг; F — площадь внутренней поверхности трубопровода, м²:

$$F = L \pi d_{вн}. \quad (6)$$

Для определения допустимых потерь на испарение необходимо знать массу перекачиваемого по трубопроводу СПГ в единицу времени. В данной статье для примера принимаем допустимые потери СПГ от испарения при перекачке по трубопроводам равными 0,15% от массы перекачиваемого СПГ.

Соответственно, получаем:

$$M_{исп} = \frac{M_{СПГ} 0,15}{100}, \quad (7)$$

где $M_{СПГ}$ — масса перекачиваемого СПГ в единицу времени, кг:

$$M_{СПГ} = 0,25 \pi d_n^2 v, \quad (8)$$

где v — скорость сжиженного газа в трубопроводе, м/с.

По формуле (9) вычисляем значение допустимого теплового потока:

$$q_L = \frac{0,0375 \pi d_n^2 v r}{\tau L d_{вн}}. \quad (9)$$

Полученное значение q_L используется для вычисления толщины изоляции по формуле (4).

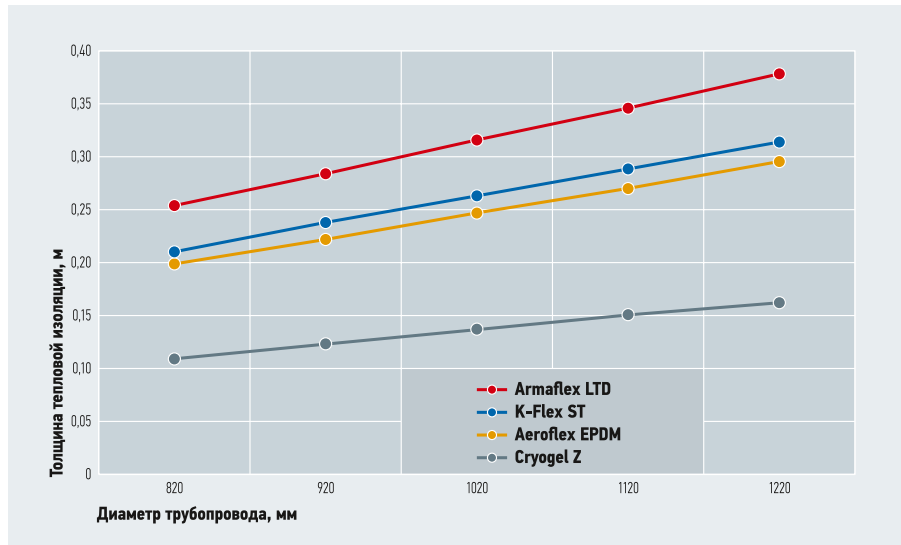


Рис. 1. К определению толщины тепловой изоляции

Стоимость нанесения теплоизоляции на трубопровод определяется по формуле:

$$A = V_{из} C, \quad (10)$$

где C — стоимость 1 м³ изоляции, руб/м³; $V_{из}$ — объём изоляции трубопровода, м³:

$$V_{из} = \frac{\pi (d_{вн} + \delta_{из})^2 - d_n^2}{4} L, \quad (11)$$

где L — протяжённость трубопровода, м.

Для нахождения оптимальной толщины тепловой изоляции использовался метод вариантных расчётов, согласно которому минимальным затратам соответствует оптимальная толщина изоляции.

Примем минимальную погрешность определения расчётных затрат $\Delta 3 = \pm 3\%$. Наличие погрешности $\Delta 3$ обуславливает зону наличия экономической неопределённости функции затрат, в пределах которой значения управляющего параметра будут равноэкономичными.

Исходные данные и результаты расчётов по сравниваемым вариантам тепловой изоляции представлены в табл. 3 и 4.

На основе данных табл. 3 выполнен расчёт необходимой толщины теплоизоляции различных брендов, результаты которого показаны на рис. 1.

Исходные данные для расчёта

табл. 3

Диаметр трубопровода, мм	820	920	1020	1120	1220
Толщина стенки трубы, мм	12	12	12	12	12
Расстояние между насосными станциями, км	110	110	110	110	110
Производительность трубопровода по СПГ, тыс. м ³ /сут.	279 224,76	313 782,27	348 339,79	382 897,3	382 897,31
Плотность СПГ, кг/м ³	500	500	500	500	500
Температура окружающего воздуха, К	273	273	273	273	273
Рабочая температура СПГ, К	163	163	163	163	163
Удельная теплота испарения СПГ, кДж/кг	515	515	515	515	515
Продолжительность времени подачи СПГ, ч	24	24	24	24	24
Коэффициент дополнительных теплопотерь трубопровода	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
Значение коэффициента теплоотдачи изоляции, Вт/(м ² ·°C)	26	26	26	26	26
Скорость СПГ в трубопроводе, м/с	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

Результаты расчёта

табл. 4

Диаметр трубопровода, мм	820	920	1020	1120	1220
Площадь внутренней поверхности трубы, м ²	279 224,755	313 782,274	348 339,793	382 897,313	417 454,832
Допустимые потери на испарение, кг/сут.	410 651,9014	516 918,1579	635 398,9266	766 094,208	909 004,07
Тепловой поток к трубопроводу, Вт/м	31,56	35,35	39,14	42,93	46,72

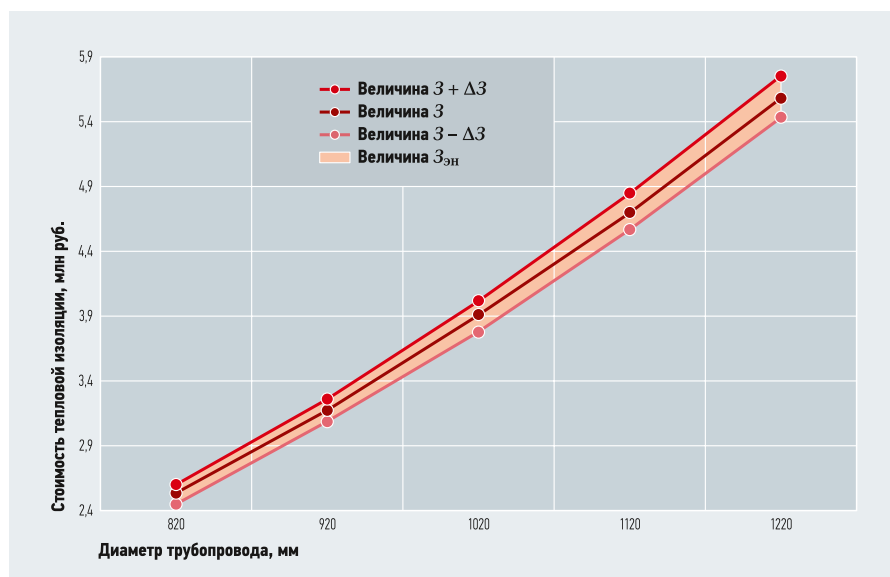


Рис. 2. Зона экономической неопределённости теплоизоляции K-Flex ST

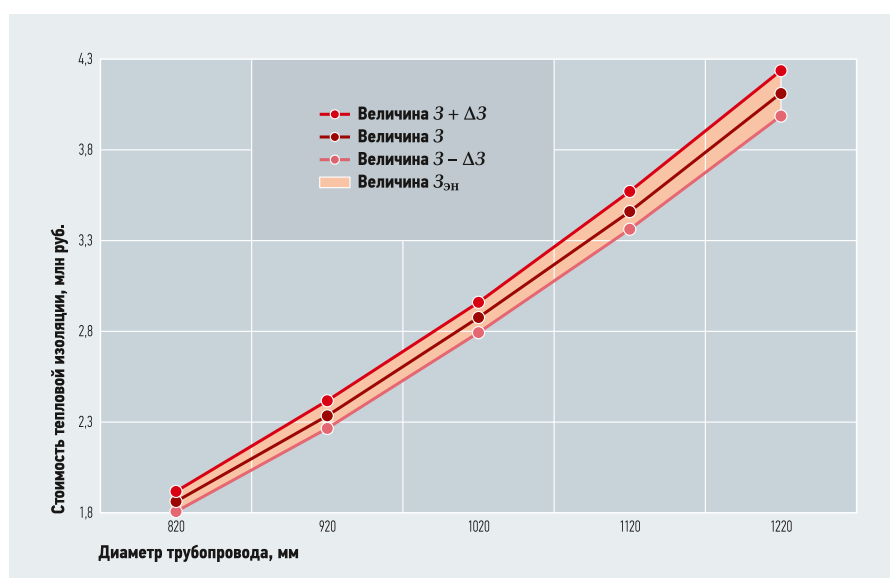


Рис. 3. Зона экономической неопределённости теплоизоляции Armaflex LTD

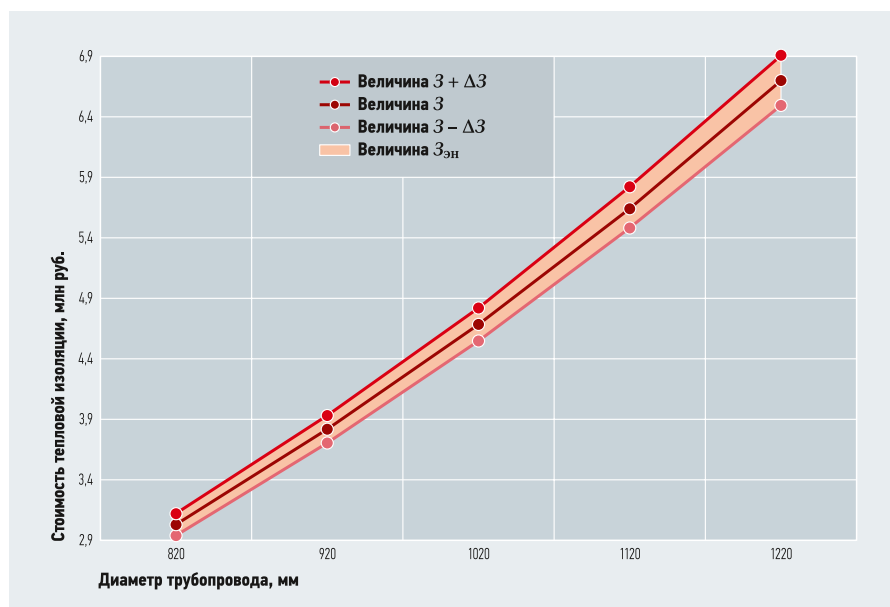


Рис. 4. Зона экономической неопределённости теплоизоляции Cryogel™Z

Графики зависимости зоны экономической неопределённости от диаметра трубопровода для каждого из сравниваемых утеплителей представлены на рис. 2–4.

Заключение

По результатам анализа методов расчёта теплопритока через изоляционные покрытия и стенку криогенного трубопровода выполнен расчёт необходимых толщин изоляционных материалов для достижения требуемого теплового эффекта с учётом заданного объёма потерь от испарения СПГ в сутки. Выбрано оптимальное изоляционное покрытие, удовлетворяющее допустимым потерям от испарения сжиженного природного газа, — это вспененный каучук Armaflex LTD.

Данное исследование выполнено в рамках гранта на получение стипендии Президента РФ для молодых учёных и аспирантов, осуществляющих перспективные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации экономики нашей страны (СП-4481.2021.1).

1. Анохин К. Российскому сжиженному природному газу прописали рост [Электр. текст]. «Коммерсант» от 17.06.2022. Web-source: kommersant.ru. Дата обращения: 01.11.2022.
2. Долгосрочная программа развития производства сжиженного природного газа в Российской Федерации / Утв. распоряжением Правительства РФ от 16.03.2021 №640-р.
3. Курицын Б.Н., Медведева О.Н. Технико-экономическая оптимизация систем теплоснабжения. — Саратов: СГТУ, 2011. 60 с.
4. Абдурашитов С.А., Тупиченков А.А. Трубопроводы для сжиженных газов. — М.: Недра, 1965. 215 с.
5. ГОСТ Р 58029-2017 / EN 14620-4:2006. Проектирование и производство на месте вертикальных цилиндрических стальных ёмкостей с плоским дном для хранения охлаждённых сжиженных газов с рабочей температурой от 0 °С до -165 °С. Ч. 4: Изоляционные компоненты / Дата введ.: 01.01.2020.
6. Усачёв А.П., Шурайц А.Л., Рулев А.В. Системные исследования комплексной защиты резервуаров и трубопроводов сжиженного углеводородного газа: монография. — Саратов: СГТУ, 2009. 212 с.
7. СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализ. ред. СНиП 41-03-2003 / Дата введ.: 01.01.2013.
8. Каганер М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. — М.: Машиностроение, 1966. 276 с.
9. Котляревский В.А., Шаталов А.А., Ханухов Х.М. Безопасность резервуаров и трубопроводов. — М.: Экономика и информатика, 2000. 552 с.
10. Пирогов С.Ю., Акулов Л.А., Ведерников М.В., Кириллов Н.Г. Природный газ. Метан: справочник. — СПб.: НПО «Профессионал», 2006. 847 с.
11. Полунин В.И. Пенополимеры в низкотемпературной изоляции. — М.: Энергоатомиздат, 1991. 192 с.
12. Баранов А.Ю., Соколова Е.В. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей. — СПб.: Университет ИТМО, 2017. 95 с.
13. Medvedeva O.N., Perevalov S.D. Selection of effective thermal insulation materials for a liquefied natural gas tanks. International Conference on Automatics and Energy (ICAEE 2021). October 7–8, 2021. Vladivostok, Russia. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2096.
14. Р 585–85. Рекомендации по проектированию газопроводов, транспортирующих охлаждённый газ. — М.: ВНИИСТ, 1985. 100 с.

References — see page 81.

Selection of the optimal thermal insulation coating of liquefied natural gas pipelines. Pp. 58–61.

Oksana N. Medvedeva, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor;
Sergey D. Perevalov, postgraduate student, the Department of Heat and Gas Supply and Oil and Gas Business, [Yuri Gagarin State Technical University of Saratov \(SSTU\)](#)

1. K. Anohin. *Rossijskomu szhizhennomu prirodnomu gazu propisali rost* [A growth was prescribed for Russian liquefied natural gas]. "Kommersant" dated June 17, 2022. Web-source: [kommersant.ru](#). Access date: November 1, 2022. [In Russian]
2. *Dolgosrochnaja programma razvitiya proizvodstva szhizhennogo prirodnogo gaza v Rossijskoj Federatsii* [Long-term program for the development of liquefied natural gas production in the Russian Federation]. *Utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 16.03.2021 №640-r* [Approved by Decree of the Government of the Russian Federation No. 640-r dated March 16, 2021]. [In Russian]
3. B.N. Kuricyn, O.N. Medvedeva. *Tekhniko-ekonomicheskaja optimizatsija sistem teplosnab-zhenija* [Technical and economic optimization of heat supply systems]. Saratov. SGTU [Saratov State Technical University]. 2011. 60 p. [In Russian]
4. S.A. Abdurashitov, A.A. Tupichenkov. *Truboprovody dlja szhizhennykh gazov* [Pipelines for liquefied gases]. Moscow. Nedra ["Bowels" Publishers]. 1965. 215 p. [In Russian]
5. *GOST R 58029–2017 [State Industry Standard of Russia No. 58029–2017] EN 14620–4:2006. Proektirovanie i proizvodstvo na meste vertikal'nykh tsilindricheskikh stal'nykh emkostej s ploskim dnom dlja hranenija ohlazhdennykh szhizhennykh gazov s rabochej temperaturoj ot 0°C do –165°C. Ch. 4: Izoljatsionnye komponenty* [Design and on-site production of vertical cylindrical steel tanks with a flat bottom for the storage of refrigerated liquefied gases with an operating temperature from 0°C to –165°C. Part 4: Insulating components]. Publ. date: January 1, 2020. [In Russian]
6. A.P. Usachev, A.L. Shuraj, A.V. Rulev. *Sistemnye issledovaniya kompleksnoj zashhity rezervuarov i truboprovodov szhizhennogo uglevodorodnogo gaza: monografija* [System studies of the complex protection of tanks and pipelines of liquefied hydrocarbon gas: A monography]. Saratov. SGTU [Saratov State Technical University]. 2009. 212 p. [In Russian]
7. *SP 61.13330.2012 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 61.13330.2012]. Teplovaja izoljatsija oborudovanija i truboprovodov. Aktualiz. red. SNiP 41-03–2003* [Thermal insulation of equipment and pipelines. Updated edition of Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 41-03–2003]. Publ. date: January 1, 2013. [In Russian]
8. M.G. Kaganer. *Teplovaja izoljatsija v tehnike nizkix temperature* [Thermal insulation in low temperature technology]. Moscow. Mashinostroenie ["Engineering Industry" Publishers]. 1966. 276 p. [In Russian]
9. V.A. Kotljarevskij, A.A. Shatalov, H.M. Hanuhov. *Bezopasnost' rezervuarov i truboprovodov* [Safety of tanks and pipelines]. Moscow. *Jekonomika i informatika* ["Economics and informatics" Magazine]. 2000. 552 p. [In Russian]
10. S.Ju. Pirogov, L.A. Akulov, M.V. Vedernikov, N.G. Kirillov. *Prirodnyj gaz. Metan: sprav.* [Natural gas. Methane: A reference book]. St. Petersburg. NPO "Professional" ["The professional" Research and Production Association]. 2006. 847 p. [In Russian]
11. V.L. Polunin. *Penopolimery v nizkotemperaturnoj izoljatsii* [Foam polymers in low-temperature insulation]. Moscow. *Jenergoatomizdat* [Publishing House of Energy and Nuclear Industry of the USSR ("Energoatomizdat" Publishers)]. 1991. 192 p. [In Russian]
12. A.Ju. Baranov, E.V. Sokolova. *Hranenie i transportirovka kriogennykh zhidkostej* [Storage and transportation of cryogenic liquids]. St. Petersburg. *Universitet ITMO* [St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2017. 95 p. [In Russian]
13. O.N. Medvedeva, S.D. Perevalov. Selection of effective thermal insulation materials for a liquefied natural gas tanks. International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021). October 7–8, 2021. Vladivostok, Russia. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2096.
14. *R 585–85* [Recommendations No. 585–85]. *Rekomendatsii po proektirovaniju gazoprovodov, transportirujushchih ohlazhdenyj gaz* [Recommendations for the design of gas pipelines transporting cooled gas. Moscow]. Moscow. VNIIST [All-Russian Research Institute for the Construction and Operation of Pipelines, Fuel and Energy Complex Facilities ("VNIIST", JSC)]. 1985. 100 p. [In Russian]