

УДК 621.6.05:621.642.3

Пути снижения потерь СПГ при транспортировке и хранении

Я. Э. РОДЬКИН¹, канд. техн. наук А. В. ЗАЙЦЕВ², д-р техн. наук А. Б. СУЛИН³

¹rod-yakov.grp@mail.ru, ²zai_@inbox.ru, ³miconta@rambler.ru

Университет ИТМО

В работе выполнен анализ зависимости потерь СПГ от конструкционных параметров резервуара (танка). Представлены методы повышения точности расчетов за счет учета внешних эксплуатационных условий термодинамической системы. Определены основные параметры погрузочных операций, такие как количество газа, необходимое для захлаживания резервуара, количество потерь СПГ во время заполнения, также получена зависимость роста давления при бездренажном хранении криожидкости в емкости. В работе представлен математический коэффициент, определяющий зависимость потерь СПГ от температуры окружающей среды. Проведена верификация математической модели, позволяющей с достаточной для инженерных расчетов точностью оценить потери криогенного топлива в резервуаре хранения для различных внешних условий.

Ключевые слова: СПГ, криогенная система, резервуар, танк, захлаживание, энергоэффективность.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 13.06.2023, одобрена после рецензирования 28.06.2023, принята к печати 14.07.2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-44-50

Язык статьи — русский

Для цитирования:

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

Decreasing LNG losses at handling and storage

Ia. E. RODKIN¹, Ph. D. A. V. ZAITSEV², D. Sc. A. B. SULIN³

¹rod-yakov.grp@mail.ru, ²zai_@inbox.ru, ³miconta@rambler.ru

ITMO University

The paper analyzes the dependence of LNG losses on the structural parameters of the tank. Methods of increasing the accuracy of calculations by considering the external operating conditions of the thermodynamic system are presented. The main parameters of loading operations are determined, such as the amount of gas needed to cool the tank, the amount of LNG losses during filling, and the dependence of pressure growth during drainage-free storage of cryofluid in the tank is also obtained. The paper presents a mathematical coefficient that determines the dependence of LNG losses depends on the ambient temperature. The verification of a mathematical model has been carried out, which makes it possible to estimate the loss of cryogenic fuel in a storage tank for various external conditions with sufficient accuracy for engineering calculations.

Keywords: LNG, cryogenic system, reservoir, tank, cooling, energy efficiency.

Article info:

Received 13/06/2023, approved after reviewing 28/06/2023, accepted 14/07/2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-44-50

Article in Russian

For citation:

Rodkin Ia. E., Zaitsev A. V., Sulin A. B. Decreasing LNG losses at handling and storage. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No 4. p. 44–50. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-44-50

Введение

Природный газ является важным энергоносителем в постнефтяную эпоху. Большие объемы разведанных запасов и высокая экологичность делают его главной опорой мировой энергетики [1, 2]. Однако в сложившихся политических условиях поставки трубопроводного газа в ближайшее время могут сократиться, в то время как потребности в нем продолжают расти [3, 4].

Сжиженный природный газ наравне с «зеленым» водородом является основой для перехода к экологически чистым источникам энергии [5]. Становление СПГ, как основного стабилизатора мирового энергодобавки [6], позволяет высоко оценивать перспективы данного рынка [7]. Производство СПГ по всему миру приобретает лавинообразный характер — растет количество мало- и крупнотоннажных установок ожижения, заключаются



Рис. 1. Способы сокращения потерь нефтепродуктов
Fig. 1. The ways of decreasing oil products losses

долгосрочные соглашения на поставки [4]. Согласно прогнозам, к 2035 г. более 40 % энергии будет обеспечиваться за счет СПГ при постоянном росте производства на уровне более 4 % в год.

В этой связи совершенствование процессов хранения и транспортирования данного вида топлива становится приоритетным в энергетической сфере нашей страны и мира в целом. Для изучения возможных вариантов снижения потерь СПГ при выполнении логистических операций следует обратиться к методам борьбы с потерями в резервуарах более сложных углеводородов (рис. 1).

Основными способами сокращения потерь являются окрашивание резервуаров красками с низкой впитывающей способностью [8], что позволяет снизить тепловую нагрузку на конструкцию, и сооружение понтонов или плавающих крыш, препятствующих испарению легких фракций [9]–[11].

Так же, как и в случае с нефтепродуктами, преобладающая доля потерь СПГ при хранении приходится на компенсацию теплоты, поступающей из окружающей среды. Согласно исследованию [12], количество суточных потерь может варьироваться от 0,012% до 0,12% по массе в сутки при 80 % и 10 % заполнении резервуара, соответственно.

Цель и объект исследования

Целью данного исследования является изучение способов снижения потерь СПГ при захлаживании резервуаров СПГ.

Поддержание криогенной температуры в емкости хранения или транспортировки довольно сложный процесс, прямо зависящий от внешних условий. В результате теплообмена с окружающей средой нарушается тепловое равновесие в криогенной емкости, что приводит к испарению более легких фаз и конденсации более тяжелых. Рост давления в паровой фазе приводит к росту потерь. Поиск решения для сокращения данных потерь является одним из способов повышения эффективности процессов хранения.

Перед загрузкой СПГ в резервуары для транспортировки требуется провести двухэтапное захлаживание: предварительное охлаждение стальной конструкции до температуры 143 К, а затем постепенное снижение температуры до 111 К с параллельным наполнением резервуара.

Предварительное охлаждение помогает избежать дополнительных низкотемпературных напряжений в корпусных конструкциях танка. Данный процесс осуществляется путем подачи части СПГ на специальные системы охлаждения и дальнейшего его распыления внутри емкости. Капли СПГ в контакте с более теплыми элементами конструкции испаряются, тем самым отводя энергию от стенок танка [1].

В работе рассматриваются резервуары объемом 200 м³ и 1000 м³ с вакуумно-перлитной (далее — ВПИ) и пенополиуретановой изоляцией (далее — ППУ) (табл. 1).

Таблица 1

Сравнительные характеристики порошково-вакуумной и пенополиуретановой изоляции

Table 1

Characteristics of vacuum-powder and polyurethane insulation

Параметр	ВПИ	ППУ
Плотность, ρ	65–70 кг/м ³	34–35 кг/м ³
Толщина слоя изоляции, δ	250–300 мм	300–350 мм
Коэффициент теплопроводности, λ	0,035 Вт/(м·К)	0,028 Вт/(м·К)

В данной работе расчет процесса теплопередачи через изолированную поверхность стенки резервуара выполняется в рамках общепринятых предположений о квазистационарности процессов.

Процесс потерь криотоплива на захлаживание резервуара складывается из следующих составляющих:

- потери на охлаждение газа внутри резервуара $G_{газ}$;
- потери на охлаждение стальной конструкции $G_{ст}$;
- потери на охлаждение изоляции $G_{из}$;
- потери на компенсацию теплоты, поступающей за время захлаживания $G_{о.с}$.

В математическом виде выражение для расчета потерь будет иметь следующий вид

$$G_{СПГ} = G_{газ} + G_{ст} + G_{из} + G_{о.с} = \frac{Q_{газ} + Q_{ст} + Q_{из} + Q_{о.с}}{r}, \tag{1}$$

где $G_{СПГ}$ — потери СПГ за время захлаживания, кг; Q — количество теплоты, затрачиваемой при соответствующих процессах, Дж; r — теплота парообразования СПГ, Дж/кг.

Расчет количества теплоты проводится по следующим формулам:

$$Q_{газ} = M_{газ} c_{p,газ} (t_{о.с} - t_{зах}); \tag{2}$$

$$Q_{ст} = M_{ст} c_{p,ст} (t_{о.с} - t_{зах}); \tag{3}$$

$$Q_{из} = M_{из} c_{p,из} (t_{из.ср} - t_{зах}), \tag{4}$$

где $c_{p,газ}$ — теплоемкость газовой фракции, Дж/(кг·°С); $c_{p,ст}$ — теплоемкость материала стенки танка, Дж/(кг·°С); $c_{p,из}$ — теплоемкость изоляции, Дж/(кг·°С); $t_{о.с}$ — температура окружающей среды, °С; $t_{зах}$ — температура за-

холаживания, °C; $t_{из. ср}$ — средняя температура изоляции в процессе захлаживания, °C, рассчитываемая как

$$t_{из. ср} = \frac{t_{о.с} - t_{зак}}{2}. \tag{5}$$

За время захлаживания в резервуар поступает теплота

$$Q_{о.с} = q_{о.с} F \tau_1, \tag{6}$$

где $q_{о.с}$ — интенсивность теплового потока, поступающего из окружающей среды:

$$q_{о.с} = k(t_{о.с} - t_{зак}); \tag{7}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_1} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}, \tag{8}$$

здесь α_1 — коэффициент теплоотдачи от стенки к газу, Вт/(м²·°C); $\delta_{ст}$ — толщина стенки танка, м; $\delta_{из}$ — толщина изоляции, м; λ_1 — коэффициент теплопроводности материала стенки танка, Вт/(м·°C); λ_2 — коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·°C); α_2 — коэффициент теплоотдачи от окружающей среды к поверхности стенки, Вт/(м²·°C); F — площадь внешней поверхности танка, м², рассчитываемая как

$$F = 2\pi Rl + 4\pi R^2 \tag{9}$$

R — радиус резервуара, м; l — длина резервуара, м; τ_1 — время захлаживания, ч, определяемое в соответствии с рекомендуемой скоростью охлаждения металлических конструкций (5 °C/ч)

$$\tau_1 = \frac{t_{о.с} - t_{зак}}{5}. \tag{10}$$

Определение потерь на втором этапе захлаживания осуществляется путем решения дифференциальных уравнений, в основе которых заложено уравнение теплового баланса

$$dq_2 - dq_1 = dq_3, \tag{11}$$

где q_1 — количество теплоты, поступающее с потоком СПГ;

$$dq_1 = G'_{СПГ} c_{СПГ} (T - T_{СПГ}) d\tau_2, \tag{12}$$

где $G'_{СПГ}$ — массовый расход поступающего СПГ, кг/с; T — функция температуры в резервуаре от времени; $T_{СПГ}$ — температура поступающего в танк СПГ; q_2 — поступление теплоты через стенки резервуара за время τ_2 , Дж;

$$dq_2 = k(T_{о.с} - T) F d\tau_2, \tag{13}$$

здесь q_3 — количество теплоты, расходуемое на охлаждение конструкции резервуара с $T_{зак}$ до $T_{СПГ}$

$$dq_3 = (c_{ст} M_{ст} + c_{СПГ} M_{СПГ} + c_{газ} M_{газ}) dT = C \cdot dT. \tag{14}$$

Для решения требуется воспользоваться заменами переменных:

$$A = \frac{1}{C} (k \cdot T_{о.с} F + G'_{СПГ} c_{СПГ} T_{СПГ}). \tag{15}$$

$$B = \frac{1}{C} (k \cdot F + G'_{СПГ} c_{СПГ}). \tag{16}$$

Представив выражение (11) в развернутом виде, требуется привести его к уравнению с разделяющимися переменными

$$\frac{dT}{A - B \cdot T} = d\tau_2. \tag{17}$$

Интегрируя уравнение (17) с начальными условиями ($\tau_0=0$ и $T=T_{зак}$) получаем формулу для расчета времени захлаживания резервуара:

$$\tau_2 = \frac{1}{B} \ln \frac{A - B \cdot T_{зак}}{A - B \cdot T}. \tag{18}$$

Следовательно, с течением времени температура T в танке убывает по закону

$$T = \frac{1}{B} \left[A - \frac{A - B \cdot T_{зак}}{e^{B\tau}} \right]. \tag{19}$$

Подстановка данной величины в формулу (13) с последующим интегрированием в пределах $0 \leq \tau \leq \tau_2$ дает следующее выражение

$$Q_2 = k \cdot F \left[\left(T_{о.с} - \frac{A}{B} \right) \tau_2 + \left(\frac{A}{B} - T_{зак} \right) \int_0^{\tau_2} \frac{d\tau}{e^{B\tau}} \right] = k \cdot F \left[\left(T_{о.с} - \frac{A}{B} \right) \tau_2 + \left(\frac{A}{B} - T_{зак} \right) \left(-\frac{1}{B} e^{-B\tau} \Big|_0^{\tau_2} \right) \right]. \tag{20}$$

Таким образом, за время τ_2 через стенки поступает теплота Q_2 , которая испаряет следующее количество СПГ, кг,

$$G_{\tau_2} = \frac{Q_2}{r}. \tag{21}$$

Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.

Графическая интерпретация результатов расчета предварительного этапа захлаживания по формулам (1)–(10) представлена на рис. 2.

Из представленной диаграммы видно, что основную часть потерь составляет захлаживание стальной конструкции. Наибольшие суммарные потери свойственны хранилищам с большим объемом и вакуумной изоляцией с перлитным наполнением. Наименьшие потери наблюдаются у резервуаров с меньшим объемом и пенополиуретановой изоляцией. Применение пенополиуретановой изоляции по сравнению с вакуумно-порошковой сокращает потери СПГ на 42–45%.

Результаты расчета второго этапа захлаживания, проведенного в соответствии с формулами (11)–(21), представлены на рис. 3, где $G_{охл}$ — затраты СПГ на охлаждение резервуара до 111 К; $G_{зак}$ — затраты СПГ на компенсацию теплоты, поступающей извне за время заполнения τ_2).

Таблица 2

Исходные данные для расчета

Table 2

Initial data for calculations

Тип изоляции	ВПИ	ППУ	ВПИ	ППУ
$V, \text{ м}^3$	200	200	1000	1000
$T_{о.с}, \text{ К}$	293			
$T_{зак}, \text{ К}$	143			
$M_{газ}, \text{ кг}$	145,2		726,0	
Сталь	10X14Г14Н4Т			
$\delta_{ст}, \text{ мм}$	30	30	40	40
$M_{ст}, \text{ т}$	179,83	181,57	85,16	85,16
	600,00	603,72	289,41	289,41
$\delta_{из}, \text{ мм}$	250	300	300	350
$M_{из}, \text{ кг}$	5,98	7,18	3,87	4,51
	15,22	18,27	9,84	11,48

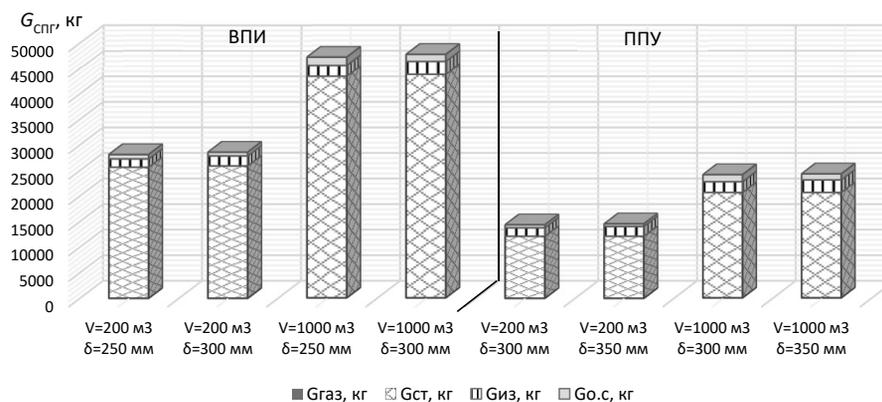


Рис. 2. Накопительная диаграмма расхода СПГ на первичное захлаживание
 Fig. 2. Cumulative diagram of LNG consumption for initial cooling

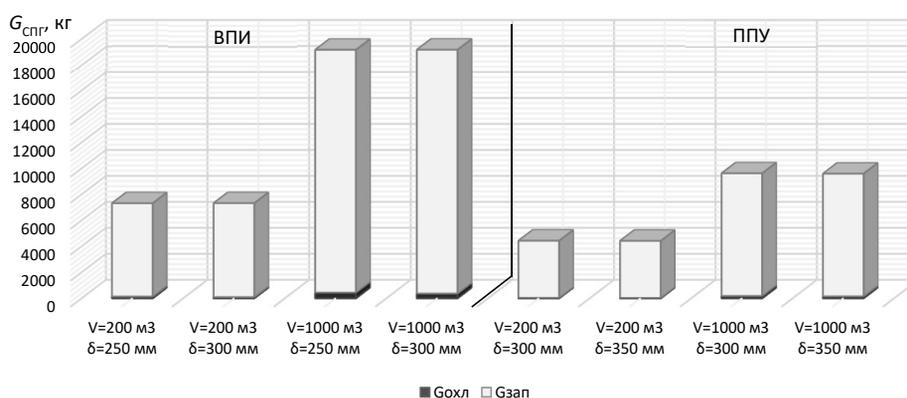


Рис. 3. Потери СПГ при заполнении танка в зависимости от конструкции
 Fig. 3. LNG losses at tank filling depending on the design

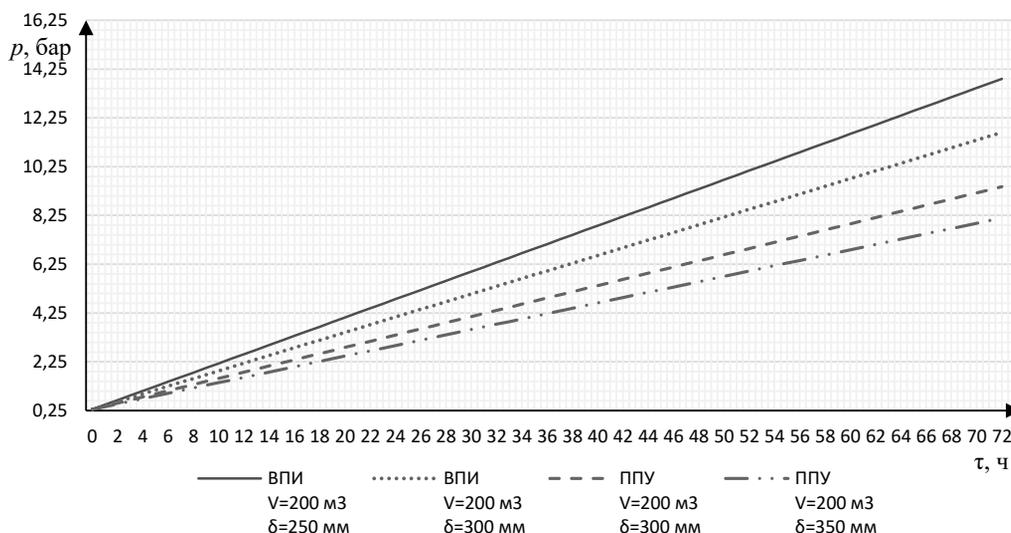


Рис. 4. График роста давления в зависимости от вида и толщины изоляционного слоя для танков $V=200 \text{ м}^3$
 Fig. 4. Pressure increase depending on the type and thickness of insulation layer for the tanks of $V=200 \text{ м}^3$

В зависимости от объема и толщины изоляции потери сокращаются на 44–48% для 200-кубовых и на 16–18% для 1000-кубовых танков.

Транспортировка СПГ в хранилищах неизбежно сопровождается неконтролируемым ростом давления, вызванным фазовым переходом криожидкости в газообраз-

ный вид [1]. Катализаторами данного процесса является качка судов, вызывающая собой процесс волнообразования — слошинг.

Графики изменения градиента давления с течением времени представлены на рис. 4, 5.

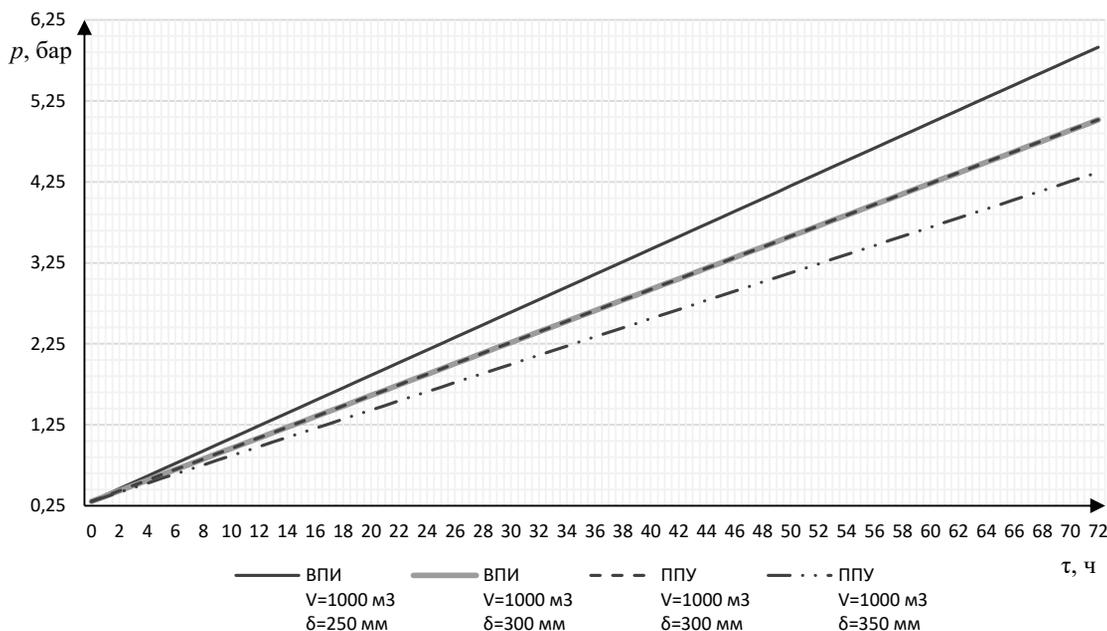


Рис. 5. График роста давления в зависимости от вида и толщины изоляционного слоя для танков $V=1000 \text{ м}^3$

Fig. 5. Pressure increase depending on the type and thickness of insulation layer for the tanks of $V=1000 \text{ м}^3$

Графики показывают, что в танках с пенополиуретановой изоляцией рост давления происходит с меньшей скоростью. Таким образом, во избежание быстрого роста давления требуется совершенствовать характеристики теплоизоляционного слоя.

Далее в работе был произведен анализ зависимости величины потерь при захлаживании от температуры окружающей среды.

В результате был сделан вывод, что потери прямо пропорционально зависят от величины температуры окружающего воздуха. Средняя скорость роста потерь для резервуаров с вакуумно-перлитной изоляцией колеблется в пределах от 185,52 до 194,87 кг/°C, в то время как с пенополиуретановой изоляцией — от 97,09 до 102,49 кг/°C. В пересчете на процентные соотношения составляет порядка 0,081–0,084%/°C от массы СПГ.

На основе вышесказанного можно сделать вывод, что величину потерь можно рассчитать, используя следующие зависимости:

$$G_{\text{СПГ}, T_2} = f_{\Delta t} G_{\text{СПГ}, T_1}; \tag{22}$$

$$f_{\Delta t} = 1,00824^{\Delta t}; \Delta t = T_2 - T_1, \tag{23}$$

где $G_{\text{СПГ}, T_2}$ — исчисляемая величина потерь СПГ за период захлаживания; $G_{\text{СПГ}, T_1}$ — известная величина потерь, рассчитанная при температуре T_1 ; T_1 — исходная расчетная температура; T_2 — температура, для которой необходимо оценить потери; $f_{\Delta t}$ — коэффициент пересчета потерь; 1,00824 — эмпирический коэффициент. В табл. 3 представлен сравнительный анализ методик расчета, где А — значение, полученное по формулам (1)–(21); Б — величина потерь, рассчитанная по формулам (22)–(23); $|\Delta|$ — относительная погрешность расчетов.

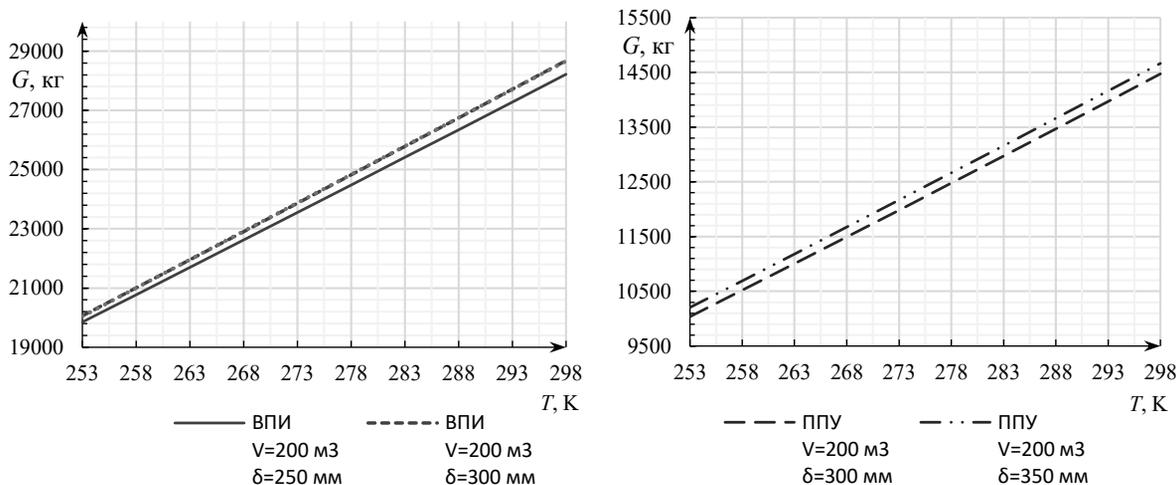


Рис. 6. График изменения потерь в зависимости от температуры окружающей среды для танков $V=200 \text{ м}^3$

Fig. 6. Dependency of losses on the environment temperature for the tanks of $V=200 \text{ м}^3$

Для резервуаров объемом 200 м³ относительная погрешность исчисления по формулам (22)–(23) составляет от 0,07 до 1,78% в пределах температур от 253 до 298 К, что применимо для проведения оценочных инженерных расчетов.

Для оценки достоверности полученной зависимости был произведен расчет для резервуаров, объем которых составляет 1000 м³ (табл. 4).

Таким образом, исходя из данных табл. 4, относительная погрешность расчетов по формулам (22)–(23) в выше представленном диапазоне температур составляет от 0,02 до 1,31%, что подтверждает высокую точность оценочных расчетов потерь СПГ.

Выводы

Вне зависимости от формы и исполнения резервуара с течением времени в результате поступления тепловой энергии из окружающей среды начинают протекать процессы самопроизвольного теплообмена, проявляющиеся в испарении более легких и летучих фракций с более высокой точкой росы и конденсации.

По результатам расчетов, проведенных в процессе исследования, можно сделать следующие выводы.

1. С увеличением толщины изоляции возрастают расходы СПГ на захлаживание. Применение пенополи-

Таблица 3

Сравнительный анализ методик расчета (при V=200 м³)

Table 3

Comparative analysis of calculation methods (at V=200 м³)

T ₂	253	258	263	268	273	278	283	288	293	298
ВПИ, δ=250 мм										
А	19851,64	20774,22	21698,56	22624,66	23552,51	24482,13	25413,5	26346,63	27281,52	28218,18
Б	19647,7	20470,64	21328,04	22221,36	23152,09	24121,8	25132,14	26184,79	27281,52	28424,2
Δ	1,03	1,46	1,71	1,78	1,70	1,47	1,11	0,61	0,00	0,73
ВПИ, δ=300 мм										
А	20061,34	21007,11	21955,83	22907,5	23862,12	24819,68	25780,19	26743,64	27710,05	28679,4
Б	19956,31	20792,18	21663,05	22570,39	23515,75	24500,69	25526,9	26596,08	27710,05	28870,67
Δ	0,52	1,02	1,33	1,47	1,45	1,29	0,98	0,55	0,00	0,67
ППУ, δ=300 мм										
А	10036,56	10520,02	11005,86	11494,07	11984,64	12477,59	12972,91	13470,6	13970,65	14473,08
Б	10061,43	10482,85	10921,92	11379,38	11856	12352,59	12869,97	13409,02	13970,65	14555,81
Δ	0,25	0,35	0,76	1,00	1,07	1,00	0,79	0,46	0,00	0,57
ППУ, δ=350 мм										
А	10205,14	10692,44	11181,79	11673,17	12166,58	12662,04	13159,53	13659,06	14160,63	14664,24
Б	10198,25	10625,4	11070,44	11534,12	12017,23	12520,56	13044,98	13591,37	14160,63	14753,75
Δ	0,07	0,63	1,00	1,19	1,23	1,12	0,87	0,50	0,00	0,61

Таблица 4

Сравнительный анализ методик расчета (при V=1000 м³)

Table 4

Comparative analysis of calculation methods (at V=1000 м³)

T ₂	253	258	263	268	273	278	283	288	293	298
ВПИ, δ=250 мм										
А	65100,42	68221,21	71356,06	74504,96	77667,93	80844,95	84036,04	87241,18	90460,38	93693,64
Б	65148,06	67876,76	70719,75	73681,82	76767,95	79983,34	83333,41	86823,8	90460,38	94249,28
Δ	0,07	0,50	0,89	1,10	1,16	1,07	0,84	0,48	0	0,59
ВПИ, δ=300 мм										
А	65893,64	69024,65	72167,47	75322,1	78488,55	81666,81	84856,88	88058,76	91272,45	94497,96
Б	65732,9	68486,09	71354,61	74343,27	77457,1	80701,36	84081,51	87603,23	91272,45	95095,36
Δ	0,24	0,78	1,13	1,30	1,31	1,18	0,91	0,52	0	0,63
ППУ, δ=300 мм										
А	33518,64	35178,08	36849,33	38532,39	40227,27	41933,96	43652,47	45382,79	47124,92	48878,87
Б	33938,58	35360,09	36841,13	38384,21	39991,91	41666,96	43412,16	45230,46	47124,92	49098,73
Δ	1,25	0,52	0,02	0,38	0,59	0,64	0,55	0,34	0	0,45
ППУ, δ=350 мм										
А	33887,37	35544,84	37212,5	38890,35	40578,38	42276,6	43985	45703,59	47432,37	49171,33
Б	34160	35590,78	37081,49	38634,63	40252,83	41938,8	43695,39	45525,55	47432,37	49419,06
Δ	0,80	0,13	0,35	0,66	0,80	0,80	0,66	0,39	0	0,50

уретановой изоляции по сравнению с вакуумно-порошковой сокращает потери на 42–45%.

2. Основную часть потерь составляет захлаживание стальной конструкции. Наибольшие суммарные потери свойственны хранилищам с большим объемом и вакуумной изоляцией с перлитным наполнением. Наименьшие потери наблюдаются у резервуаров с меньшим объемом и пенополиуретановой изоляцией.

3. Суточные потери СПГ в процессе хранения уменьшаются с увеличением теплоизоляционного слоя. При сравнении разных типов изоляционного материала следует отметить, что полиуретановая пена эффективнее справляется со снижением потерь, чем вакуумно-порошковая теплоизоляция. В зависимости от объема и толщины изоляции потери сокращаются на 44–48% для 200-кубовых и на 16–18% для 1000-кубовых танков.

4. В танках с пенополиуретановой изоляцией рост давления происходит с меньшей скоростью. Таким образом, для уменьшения скорости роста давления необходимо улучшать характеристики теплоизолирующего слоя танка.

5. Представлена и верифицирована зависимость потерь СПГ от температуры окружающей среды. Рассчитанный коэффициент ($f_{\Delta T}$) позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью оценить потери криогенного топлива в резервуаре хранения для различных внешних условий.

Литература/References

- Qadrdan M., Abeysekera M., Wu J., Jenkins N., Winter B. Fundamentals of Natural Gas Networks. In The Future of Gas Networks. Springer: Cham, Switzerland. 2020. pp. 5–22.
- Tutak M., Brodny J., Siwiec D., Ulewicz R., Bindzár P. Studying the Level of Sustainable Energy Development of the European Union Countries and Their Similarity Based on the Economic and Demographic Potential. *Energies*. 2020. Vol. 13. P. 6643.
- Banks F. E. The Political Economy of Natural Gas. Routledge, London, 2017.
- Geman H., Philippou S. The liquefied natural gas spot market and valuation of the rerouting option. *Journal of Energy Markets*. 2020 Oct 21:13 (3).
- Shaton K., Hervik A., Hjelle H. M. The environmental footprint of natural gas transportation: LNG vs. pipeline. *Economics of Energy & Environmental Policy*. 2020:9 (1).
- Chun D.-H., Roh M.-I., Ham S.-H. Optimum Arrangement Design of Mastic Ropes for Membrane-Type LNG Tanks Considering the Flatness of Thermal Insulation Panel and Production Cost. *J. Mar. Sci. Eng.* 2020. Vol. 8. P. 353.
- Park N. K., Park S. K. A Study on the Estimation of Facilities in LNG Bunkering Terminal by Simulation — Busan Port Case. *J. Mar. Sci. Eng.* 2019. Vol. 7. P. 354.
- Farzaneh-Gord M., Nabati A., Niazmand H. Solar radiation effects on evaporative losses of floating roof storage tanks. *International journal of oil gas and coal technology*. 2011. Vol. 4. P. 134–155.
- Huang W. Q., Huang F. Y., Fang J., Fu L. P. A calculation method for the numerical simulation of oil products evaporation and vapor diffusion in an internal floating-roof tank under the unsteady operating state. *Journal of petroleum science and engineering*. May 2020. Vol. 188. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106867.
- Zhang G., Huang F., Huang W., Zhu Z., Fang J., Ji H., Fu L., Sun X. Analysis of Influence of Floating-Deck Height on Oil-Vapor Migration and Emission of Internal Floating-Roof Tank Based on Numerical Simulation and Wind-Tunnel Experiment. *Processes*. 2020. Vol. 8 (9). P. 1026.
- 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*. Mar 2019. Vol. 130. P. 175–186. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.024.
- Khan M. S., Qyyum M. A., Ali W., Wazwaz A., Ansari K. B., Lee M. Energy Saving through Efficient BOG Prediction and Impact of Static Boil-off-Rate in Full Containment-Type LNG Storage Tank. *Energies*. 2020 Jan;13 (21):5578.
- Теплофизические основы морской транспортировки и бункеровки сжиженного природного газа. СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2019. 170 с. [Thermophysical fundamentals of maritime transport and bunkering of liquefied gas. St. Petersburg: Krylov State Research Center, 2019. 170 p. (in Russian)]

Сведения об авторах

Родькин Яков Эдуардович

Аспирант образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, rod-yakov.grp@mail.ru

Зайцев Андрей Викторович

К. т. н., доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, zai_@inbox.ru

Сулин Александр Борисович

Д. т. н., профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, miconta@rambler.ru

Information about authors

Rodkin Iakov E.

Postgraduate student of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, rod-yakov.grp@mail.ru

Zaitsev Andrey V.

Ph. D., Associate Professor of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, zai_@inbox.ru

Sulin Aleksandr B.

D. Sc., Professor of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, miconta@rambler.ru

