

УДК 621.59:621.642.03

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-595-602

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА В МОБИЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ

А.Ю. Баранов<sup>a,b</sup>, К.А. Валентинова<sup>b,c</sup>, Л.В. Иванов<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Научно-производственное предприятие «КРИОН», Санкт-Петербург, 197375, Российская Федерация

<sup>b</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>c</sup> Санкт-Петербургский филиал ООО «Газпром проектирование», Санкт-Петербург, 191036, Российская Федерация

Адрес для переписки: Valentinova\_96@bk.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 30.04.20, принята к печати 08.06.20

Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Баранов А.Ю., Валентинова К.А., Иванов Л.В. Моделирование испарения сжиженного природного газа в мобильных резервуарах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 4. С. 595–602. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-595-602

### Аннотация

Представлен анализ работоспособности изотермических хранилищ сжиженного природного газа в условиях речной навигации. Исследовано влияние конструктивных и технологических решений на безопасность и рентабельность использования сжиженного природного газа в качестве альтернативы нефтепродуктам. Методика заключается в моделировании криогенного хранилища на основании уравнения энергии паровой и жидкой фракции и проведении сопоставительного анализа нескольких вариантов транспортирования сжиженного природного газа речным транспортом. Получены данные о взаимосвязи толщины изоляции и степени заполнения резервуара, влияющие на транспортные характеристики. Выявлено, что транспортирование сжиженного природного газа в хранилищах с газозаполненной изоляцией технически возможно и удовлетворительно при комбинировании оптимальной величины удельного объема криогенной жидкости в резервуаре и достаточной толщины теплоизоляции. Полученные результаты могут найти применение в разработках автономных плавучих контейнеров с большой толщиной изоляции, которые будут буксироваться по рекам без использования судов-носителей.

### Ключевые слова

сжиженный природный газ, криогенное хранилище, теплоизоляция, паровое пространство, теплопритоки

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-595-602

## MODELING OF LIQUEFIED NATURAL GAS EVAPORATION IN MOBILE RESERVOIRS

A.Yu. Baranov<sup>a,b</sup>, K.A. Valentinova<sup>b,c</sup>, L.V. Ivanov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> NPP “KRION”, Saint Petersburg, 197375, Russian Federation

<sup>b</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>c</sup> St. Petersburg Branch of Gazprom Design, Saint Petersburg, 191036, Russian Federation

Corresponding author: Valentinova\_96@bk.ru

### Article info

Received 30.04.20, accepted 08.06.20

Article in Russian

**For citation:** Baranov A.Yu., Valentinova K.A., Ivanov L.V. Modeling of liquefied natural gas evaporation in mobile reservoirs. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 595–602 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-4-595-602

### Abstract

The paper presents the analysis of isothermal storage of liquefied natural gas within the conditions of river navigation. The effect of constructive and technological solutions on the safety and profitability of liquefied natural gas application as an alternative to petroleum products is studied. The technique principle consists in a cryogenic storage modeling based on the energy equation of the vapor and liquid fractions and comparative analysis of several options for transportation of liquefied natural gas by river transport. In consequence of the study results, data were obtained on the relationship between the insulation thickness and the degree of tank filling having an effect on transport characteristics. It was revealed that transportation of liquefied natural gas in gas-insulated storage facilities is technically possible and

satisfactory by combining the optimal specific volume of cryogenic liquid in the tank and sufficient thickness of thermal insulation. The results obtained can be used in the development of autonomous floating containers with a large insulation thickness, which will be towed along rivers without the use of carrier vessels.

### Keywords

liquefied natural gas, cryogenic storage, thermal insulation, steam space, heat influx

### Введение

Традиционная доставка природного газа по наземным или подводным трубопроводам сопряжена с рядом проблем неэкономического характера. При этом затраты на доставку природного газа по наземным трубопроводам длиной более 2300 км и подводным трубопроводам длиной более 1200 км оказывается выше, чем затраты на производство и доставку сжиженного природного газа (СПГ). Экологичность, ценовая и логистическая доступность этого вида топлива в сочетании с административными рекомендациями по применению природного газа в качестве топлива, создают благоприятные условия для замены им нефтепродуктов<sup>1</sup>.

Компания «НОВАТЭК» в ближайшие годы планирует строительство ряда новых заводов по производству СПГ в Северных регионах Российской Федерации<sup>2</sup>, в непосредственной близости к газовым месторождениям. Это позволит при необходимости прокладывать протяженные трубопроводы в промышленно развитые регионы и повысит возможности рыночной реализации готовой продукции, делая выгодным использование СПГ взамен нефтяных энергоносителей, которые из-за недостатка региональных нефтеперерабатывающих предприятий доставляются на северные территории из южных районов страны [1].

Для успеха проектов региональной газификации Сибири необходимы специализированные средства перевозки СПГ речным транспортом и последующего длительного хранения его в местах потребления. Ключевую роль в решении этих вопросов играет выбор рациональной конструкции хранилищ и технологии хранения СПГ. Необходимо обеспечить минимальный уровень потерь криопродукта от испаряемости под действием теплопритока из окружающей среды (ОС) и других факторов.

Большие объемы хранения СПГ вынуждают к замене традиционной для криогенных цистерн вакуумной теплоизоляции на газонаполненную, толщина которой увеличивается до 1 м и более из-за относительно высокой теплопроводности. Для мобильных хранилищ выбор рациональной толщины изоляции связан с ограничениями на габаритные размеры речных судов [2].

Запрет на сброс паров природного газа в атмосферу предписывает использование транспорта СПГ в бездренажном режиме, когда образующиеся пары криопрод-

укта аккумулируются в паровом пространстве хранилища. С учетом ограничений на рост давления паров СПГ, для образующегося пара необходимо предусматривать достаточное для безопасной транспортировки паровое пространство хранилища [3]. Для разработки обоснованных рекомендаций по конструированию и эксплуатации мобильных хранилищ необходимо использовать математическое моделирование процессов, протекающих в изотермическом хранилище СПГ.

### Физическая модель объекта исследования

Цель исследования — анализ вариантов организации транспортировки СПГ. Для решения поставленной задачи применима упрощенная модель криогенного хранилища с газонаполненной изоляцией (рис. 1).

Перенос теплоты из ОС к СПГ осуществляется через цилиндрическую часть емкости, а его интенсивность определяется толщиной теплоизолирующего слоя ( $\Delta_{из}$ ). Некоторое значение имеют температура ОС ( $T_{ос}$ ) и внешний диаметр изоляционного пространства ( $D_{из}$ ), по которым вычисляется интенсивность конвективного подвода теплоты к поверхности криогенного резервуара. С внутренней стороны теплоизоляционное пространство ограничено стенкой металлического сосуда ( $D_c$  — диаметр сосуда), которая имеет достаточную толщину (при максимально допустимом давлении паров ( $P_{п}$ ) 0,75 МПа расчетная толщина стенки составляет 20 мм), поэтому стенка обладает удовлетворительной теплопроводностью и выполняет функцию экрана, который формирует внутреннюю изотермическую границу теплового ограждения.

Во избежание аварийных ситуаций при заполнении емкости ( $h_{ж}$  — высота жидкости) всегда оставляют не-

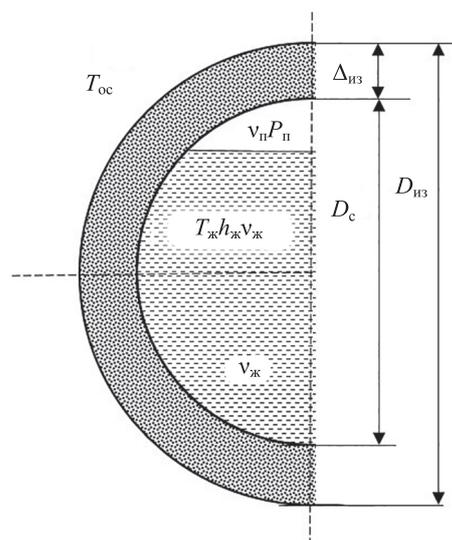


Рис. 1. Физическая модель криогенного хранилища

<sup>1</sup> Газпром Экспорт «Использование природного газа в качестве моторного топлива» [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.gazpromexport.com/files/Gas\\_Motor\\_Fuel\\_2018\\_RU.pdf385.pdf](http://www.gazpromexport.com/files/Gas_Motor_Fuel_2018_RU.pdf385.pdf), свободный. Яз. рус. (дата обращения: 09.05.2020).

<sup>2</sup> Годовой отчет компании «НОВАТЭК» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.novatek.ru/ru/investors/reviews/>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 09.05.2020).

которое свободное пространство для накопления пара, образующегося в результате подвода теплоты из ОС [4]. Выбор удельной доли этого парового пространства является одним из предметов данного исследования. Процессы, протекающие в хранилище СПГ анализируются при помощи одномерной модели, т. е. все тепловые потоки относятся к единице объема внутреннего пространства емкости. Соответственно, рассчитываются удельные характеристики хранилища, такие как удельная масса СПГ  $g_{ж}$ ; удельная масса паров СПГ  $g_{п}$ ; удельное пространство, занятое жидкостью  $v_{ж}$ ; удельное паровое пространство  $v_{п}$  [5]:

$$g_{ж} = \frac{G_{ж}}{V_c}; \quad g_{п} = \frac{G_{п}}{V_c}; \quad v_{ж} = \frac{V_{ж}}{V_c}; \quad v_{п} = \frac{V_{п}}{V_c},$$

где  $G_{ж}$  — вес жидкости;  $G_{п}$  — вес пара;  $V_{ж}$  — объем жидкости;  $V_{п}$  — объем пара;  $V_c$  — объем сосуда.

По определению сумма удельного пространства, занятого паром и жидкостью, равна  $1 \text{ м}^3$ , что позволяет высчитывать по известной величине удельного пространства, занятого жидкостью, остаточное пространство, занятое паром.

$$v_{ж} + v_{п} = 1 \rightarrow v_{п} = 1 - v_{ж}.$$

Определяющее значение при моделировании процессов тепломассопереноса внутри емкости имеет плотность фаз СПГ. Плотность жидкости ( $\rho_{ж}$ ) является функцией ее температуры, так как жидкость находится в насыщенном состоянии [6]. Повышение температуры жидкости ( $T_{ж}$ ) приводит к снижению ее плотности:

$$\rho_{ж} = f(T_{ж}).$$

При выполнении вычислительного эксперимента используются прямые расчеты. Объем, занятый жидкостью, определяется по известному значению удельной массы:

$$v_{ж} = \frac{g_{ж}}{\rho_{ж}}.$$

Определяющее значение на темп испарения жидкости оказывает продолжительность хранения и величина теплопритоков из ОС ( $q_{ос}$ ):

$$g_{ж} = f(\tau, q_{ос}).$$

Теплопритоки из ОС являются функцией целого ряда показателей:

$$q_{ос} = f(D_c, \Delta_{из}, \lambda_{из}, T_{ос}),$$

где  $D_c$  — диаметр сосуда, м;  $\Delta_{из}$  — толщина теплоизоляции, м;  $\lambda_{из}$  — теплопроводность изоляции, Вт/(м·К);  $T_{ос}$  — температура ОС, К.

В общем случае за время транспортирования хранилища речным транспортом температура ОС, значение диаметра сосуда, вычисляемого на основании габаритных размеров трюма судна, практически не изменяется. Условно неизменна теплопроводность теплоизолирующего слоя, хотя в общем случае она зависит от распределения температур внутри изоляции:

$$T_{ос} \approx \text{const}; \quad D_c = \text{const} \rightarrow q_{ос} = f(\Delta_{из}); \quad \lambda_{из} \approx \text{const}.$$

В рамках намеченного исследования величина теплопритоков из ОС в основном будет зависеть от выбора толщины теплоизолирующего слоя. Максимальное абсолютное давление паров в паровом пространстве по конструктивным соображениям должно составлять не более:  $P_{\text{max}} = 0,75 \text{ МПа}$ .

Давление паров является функцией нескольких факторов, определяющими из которых являются: время хранения, величина теплопритоков из ОС (качество теплоизоляции) и начальный удельный объем парового пространства:  $P_{п} = f(\tau, q_{ос}, v_{п}^0)$ , где  $v_{п}^0$  — удельный объем парового пространства,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Количество образующихся паров в общем случае определяется интенсивностью теплопритоков и тепловой парообразования  $r$  [7], определяемое выражением:

$$\Delta g_{ж} = \frac{q_{ос}}{r}.$$

Величина теплоты парообразования зависит от текущего давления в системе и давления паров:  $r = f(P_{п})$ .

Повышение давления паров сопровождается ростом температуры насыщенной жидкости:  $T_{ж} = f(P_{п})$ .

Необходимо рассчитывать давления паров для каждого момента времени. По условиям эксперимента в начальный момент времени давление паров равно атмосферному, а вычисление текущего значения выполняется по расчетному значению плотности пара. Плотность пара может быть вычислена по известному значению удельной массы и удельного объема паров:  $\rho_{п} = g_{п}/v_{п}$ .

Описанный выше комплекс физических процессов вызывает постепенное изменение состояния замкнутой системы и, в итоге, приводит к критическому повышению давления. Расчет допустимой продолжительности хранения СПГ в условиях замкнутой емкости при известных значениях толщины теплоизоляции и известном начальном значении удельного объема парового пространства является объектом данного исследования.

### Математическая модель криогенного хранилища

Основу математической модели криогенного хранилища составляет уравнение энергии для жидкой и паровой фракций [8]. С учетом принятых ограничений необходимо описать процессы, протекающие в единице объема хранилища. При этом энтальпия внутри этого объема является функцией от внутренних источников  $q_v$  и теплоты, подводимой в этот элементарный объем по трем осям  $q_x$ ,  $q_y$  и  $q_z$ .

$$\rho_{ж} \cdot \frac{dh_{ж}}{dt} = \frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy} + \frac{dq_z}{dz} + q_v.$$

Ранее было указано, что хранение СПГ бездренажное, т. е.

$$\frac{dq_x}{dx} = \frac{dq_y}{dy} = \frac{dq_z}{dz} = 0.$$

Распределенные источники теплоты складываются из теплопритока через тепловое ограждение  $q_{ос}$  и теплоты, поглощаемой при испарении жидкости:

$$q_v = q_{oc} + \frac{dg_{ж}}{d\tau}$$

$$\rho'_n = \frac{g'_n}{v'_n}$$

Применим метод замены переменных и получим упрощенную запись уравнения:

$$\rho_{ж} \cdot \frac{\Delta h_{ж}}{\Delta \tau} = q_v$$

Отсюда имеем алгебраическое выражение, пригодное для вычисления энтальпий жидкости на новом временном слое:

$$h'_{ж} = h_{ж} + \frac{q_v \Delta \tau}{\rho_{ж}}$$

После того, как будет вычислено новое значение энтальпии жидкости на новом временном слое, может сложиться одна из трех возможных ситуаций:

- 1) энтальпия жидкости на новом временном слое больше, чем энтальпия насыщенной жидкости (жидкость перегрета). В этом случае инициализируется процесс парообразования:  $h'_{ж} > h' = f(P_n)$ ,  $\Delta g_{ж} = 0$ ;
- 2) энтальпия жидкости равна энтальпии насыщенной жидкости при текущем давлении (нет парообразования):  $h'_{ж} = h' = f(P_n)$ ,  $\Delta g_{ж} = 0$ ;
- 3) энтальпия жидкости меньше энтальпии насыщенной жидкости при текущем давлении. В этом режиме также не происходит парообразования, так как жидкость находится в недогретом состоянии:  $h'_{ж} < h' = f(P_n)$ ,  $\Delta g_{ж} = 0$ .

В тех случаях, когда новое значение энтальпии жидкости оказывается выше энтальпии насыщенной жидкости, выполняется расчет потерь жидкости за счет испарения [9]. Количество потерянной жидкости вычисляется с учетом удельной массы жидкости и отношения к разности энтальпий насыщенной жидкости, отнесенной к теплоте парообразования жидкого СПГ при данном давлении:

$$\Delta g_{ж} = g_{ж} \cdot \frac{(h'_{ж} - h')}{h'' - h'}$$

где  $h''$  — давление насыщенных паров при текущем значении давления пара  $h'' = f(P_n)$ .

После того, как будут определены потери жидкости от испаряемости, вычисляется масса жидкости на новом временном слое:

$$g'_{ж} > g_{ж} - \Delta g'_{ж}$$

По известной плотности жидкой фракции  $\rho_{ж} = f(P_n)$  рассчитывается на новом временном слое: удельный объем занимаемой жидкостью  $v'_{ж} = g'_{ж} / \rho_{ж}$  и объем, который будет занимать пар  $v'_n = 1 - v'_{ж}$ .

Расчетное значение потерь жидкости от испаряемости позволяет определить количество пара, которое будет находиться в паровом пространстве на новом временном слое:

$$g'_n = g_n + \Delta g$$

По массе пара рассчитывается плотность пара на новом временном слое:

Для того чтобы определить текущее давление паров СПГ, используется матрица давлений, которая описана зависимостью плотности от давлений в следующем интервале:

$$0,1 \leq P_i \leq 2,0 \text{ МПа.}$$

Сравнивая новое значение плотности пара в паровом пространстве с табличными значениями плотности паров при различных давлениях [10], выбирается значение давления, при котором разница расчетного давления паров и табличного значения минимальна  $\Delta_{\min} = \rho'_n - \rho_i$ , с шагом  $\Delta P_i = 0,001$  МПа. На следующем временном шаге в паровом пространстве устанавливается новое давление:  $P'_n = P_i$ .

После того, как вычислено новое значение давления в паровом пространстве, происходит присвоение новых значений переменным. Если произошло испарение жидкости,  $\Delta g_{ж} > 0$  то энтальпии жидкости присваивается значение энтальпии насыщенной жидкости:  $h_{ж} = h'$ . Давление пара устанавливается равным давлению, определенному по новому значению плотности пара  $P_n = P'_n$ .

Для расчета изменения энтальпии паров используется уравнение энергии паровой фракции [11]:

$$\rho'_n \cdot \frac{\partial h_n}{\partial \tau} = \frac{\partial q_y}{\partial y} + q_v$$

Уравнение энергии паровой фракции рассчитывает изменение энтальпии паров с учетом подвода теплоты из ОС и количество теплоты, перенесенное с парами жидкой фракции, проникающих в паровое пространство [12]. Используя метод замены производных конечными разностями, преобразуем уравнение к алгебраическому виду:

$$\rho_n \cdot \frac{h_n}{\Delta \tau} \approx \frac{\Delta q_y}{\Delta y} + q_v$$

где  $\Delta q_y$  — количество теплоты, внесенное насыщенными парами в паровое пространство:  $\Delta q_y = \Delta g(h'' - h_n)$ .

В разделе «Физическая модель объекта исследования» было указано, что большая толщина стенки и высокое качество контакта между жидкой фракцией и стенкой приводит к тому, что стенка сосуда выполняет функции экрана, т. е. жидкость отводит на себя все теплопритоки, проникающие сквозь изоляцию. В связи с этим для паровой фазы принимается, что теплота от внутренних источников равна нулю и, соответственно, так как нет теплопритоков из ОС:  $q_v = q_{oc} = 0$ .

### Результаты численного эксперимента

С помощью описанной математической модели хранилища СПГ выполнен сопоставительный анализ нескольких вариантов транспортирования СПГ речным транспортом общей продолжительностью  $\tau_{тр} = 100$  ч.

Таблица 1. Характеристика сравниваемых вариантов транспортирования СПГ

Обозначение	Варианты транспортирования СПГ					
	0,8 × 1,0	0,8 × 1,25	0,85 × 1,5	0,75 × 1,0	0,75 × 0,75	0,75 × 0,5
Удельный объем жидкости, м <sup>3</sup> /кг	0,8	0,8	0,85	0,75	0,75	0,75
Удельная масса жидкости, кг/м <sup>3</sup>	336,6	336,6	357,6	315,6	315,6	315,6
Масса СПГ в танках, т	942,5	942,5	1001,4	883,5	883,5	883,5
Толщина изоляции, м	1,0	1,25	1,5	1,0	0,75	0,5

Исходные данные численного эксперимента:  
 — транспортное судно снабжено двумя емкостями для хранения СПГ объемами по 1400 м<sup>3</sup>;  
 — диаметр сосуда для хранения жидкости 9 м;  
 — длина цилиндрической части 20 м.

К рассмотрению были приняты варианты с толщины изоляционного материала в пределах 0,5–1,5 м (табл. 1).

Существенное влияние на условия транспортирования СПГ оказывает начальный объем жидкой фракции, который определяет удельный объем свободного пространства, занятого парами. При перевозке СПГ паровое пространство емкости используется для аккумуляции образующихся паров СПГ. Так как в данном эксперименте моделируется процесс бездренажного транспортирования, то выбор начального значения объема парового пространства может существенно сказаться на результатах всего эксперимента.

Все эксперименты, представленные в табл. 1, различаются величиной удельного объема жидкой фракции в диапазоне  $0,75 \leq v_{ж} \leq 0,85$  и толщиной слоя тепловой изоляции, выбранной в интервале  $0,5 \leq \Delta_{из} \leq 1,5$  м.

Предполагается, что в начальный момент времени  $\tau = 0$  давление паров СПГ в емкости близко к атмосферному  $P_{п} \approx 0,105$  МПа. Эксперимент продолжается до тех пор, пока расчетное значение давления паров в паровом пространстве не превысит установленного предела  $P_{п} \leq 0,75$  МПа. Именно такое значение давления паров является максимально допустимым для многих судов, транспортирующих СПГ по странам Западной Европы.

Режим переноса теплоты через теплоизоляционную конструкцию емкости предполагается установившимся, что на практике достигается после некоторой выдержки СПГ в емкости. Температура изоляционного материала в начальный момент времени изменяется по линейному закону:

$$\tau = 0 \quad 2 \leq i \leq n - 1 \quad T_i = T_{i-1} + \frac{(T_n - T_1)}{n - 1},$$

где  $i$  — номер текущего участка;  $T_i$  — температура текущего участка;  $T_n$  — температура последнего участка;  $T_1$  — температура начального участка;  $n$  — число участков.

Температура стенки металлического сосуда ( $T_c$ ), ограничивающего внутренний объем, принята на 3 К выше температуры хранимой жидкости ( $T'$ ). Температура внутренней границы тепловой изоляции равна температуре стенки сосуда:

$$T_1 = T_c = T' + 3.$$

Температура внешней границы изоляции на 1 К ниже температуры ОС:

$$T_{п} = T_{ос} - 1.$$

Температура ОС  $T_{ос} = 293$  К.

Во время моделирования процесса хранения на каждом шаге по времени вычисляются:

- текущее давление паров  $P_{п}$ ;
- удельный объем жидкости  $v_{ж}$ ;
- удельный объем пара  $v_{п}$ ;
- масса жидкости  $G_{ж}$ ;
- масса пара  $G_{п}$ ;
- удельный подвод теплоты из ОС через единицу длины внешней поверхности изоляции  $q_{из}$ ;
- распределение температур и энтальпий по периметру металлической оболочки емкости хранения и слоям теплоизоляционной конструкции.

Из материалов табл. 1 видно, что в зависимости от выбора величины начального удельного объема жидкости меняется количество жидкости, которое находилось в танках в момент начала транспортирования. Наибольшее количество удается загрузить в том случае, если удельный объем жидкости составляет 0,85, наименьшее — 0,75. Моделирование процесса транспортирования при более низкой степени заполнения емкости пока нецелесообразно, так как представляется нерентабельным с экономической точки зрения.

На рис. 2 представлен график изменения давления паров жидкости внутри объема сосуда  $P_{п}$ . Видно, что в

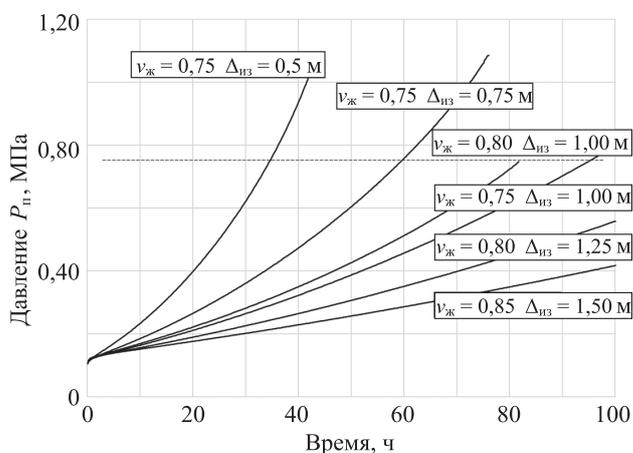


Рис. 2. Зависимость давления паров ( $P_{п}$ ) сжиженного природного газа от времени транспортирования в хранилищах с разной толщиной изоляции ( $\Delta_{из}$ ) и удельным объемом жидкой фракции ( $v_{ж}$ ) в начальный момент времени

зависимости от выбора начального объема и толщины изоляции существенно меняется характер изменения текущего значения  $P_{п}$ .

На первый взгляд определяющую роль играет выбор толщины изоляции, так как минимально разрешенное время транспортирования получено в варианте с минимальной толщиной изоляции  $\Delta_{из} = 0,5$  м и степенью начального заполнения  $v_{ж} = 0,75$ . В этом варианте время достижения максимально допустимого давления составило 35 ч (табл. 2).

Увеличение толщины изоляции позволяет повысить продолжительность безопасного транспортирования СПГ [13]. Удовлетворительные, с точки зрения продолжительности подъема давления, результаты были получены в варианте со степенью заполнения  $v_{ж} = 0,75$  и толщиной изоляции  $\Delta_{из} = 1,0$  м. Чуть хуже показатели варианта с толщиной изоляции  $\Delta_{из} = 1,0$  м и начальной степенью заполнения  $v_{ж} = 0,8$ . В этом варианте транспортирование продолжалось всего 82 ч, т. е. чуть меньше, чем плановая продолжительность транспортирования  $\tau_{тр} = 100$  ч.

Только в двух из пяти моделируемых вариантов технологическая задача была выполнена, т. е. транспорт с СПГ смог двигаться по реке в течение 100 ч и более.

Следует обратить внимание, что в вариантах  $v_{ж} = 0,8$ ,  $\Delta_{из} = 1,25$  м и  $v_{ж} = 0,85$ ,  $\Delta_{из} = 1,5$  м к моменту завершения транспортирования  $\tau_{тр} = 100$  ч давление паров СПГ было значительно ниже максимально допустимого уровня  $P_{п} \leq 0,75$  МПа (табл. 2). Это позволяет высказать предположение, что при проектировании хранилищ, предназначенных для транспортирования СПГ по речным магистралям, целесообразно выбирать варианты с максимально возможной толщиной изоляции.

В то же время при транспортировании СПГ в газозавозах, построенных на базе речных танкеров серии «Лена-77», максимальная толщина теплоизоляционной конструкции составляет не более 1,25 м, так как по требованиям безопасности необходимо предусматривать пространство между емкостью для хранения горючего вещества и бортами судна, используемого для периодического осмотра емкости. Из-за привязки к судну определенной конструкции лучший, с эксплуатационной точки зрения безопасности и логистики, вариант с максимальной начальной степенью заполнения  $v_{ж} = 0,85$  и толщиной изоляции  $\Delta_{из} = 1,5$  м уже не может быть реализован в рамках модернизации речных танкеров.

Однако этот вариант привлекателен, так как за счет рационального сочетания большой степени начального

заполнения и большой толщины теплоизоляционной конструкции, он обеспечил отправку максимального количества жидкости на максимальное расстояние, поэтому есть смысл разрабатывать транспортные цистерны с такими параметрами без привязки к существующим плавсредствам.

Повышение давления паров в емкости стимулируется увеличением удельного объема жидкости при транспортировании, которое связано с повышением температуры насыщения жидкости при повышении давления в паровом пространстве. Так, например, в варианте с начальным значением удельного объема  $v_{ж} = 0,75$  и толщиной изоляции  $\Delta_{из} = 0,5$  (рис. 3) к моменту завершения вычислительного эксперимента объем занимаемой жидкости возрос от начальных  $v_{ж} = 0,75$  до  $v_{ж} = 0,88$ . Уменьшение объема, занимаемого парами СПГ, в сочетании с непрерывным поступлением в это пространство образующихся паров СПГ, приводит к быстрому росту давления и, выбирая малую толщину изоляции, например, по конструктивным соображениям, необходимо уменьшать степень заполнения танка, иначе перевозить жидкость на большие расстояния не получится.

Увеличение толщины изоляции снижает негативное влияние теплопритоков из ОС. При толщине изоляции 1,5 м и начальной степени заполнения 0,85, общее изменение объема занимаемой жидкости не оказывает существенного влияния на рост давления.

Значение температуры жидкости в момент завершения каждого из перечисленных экспериментов

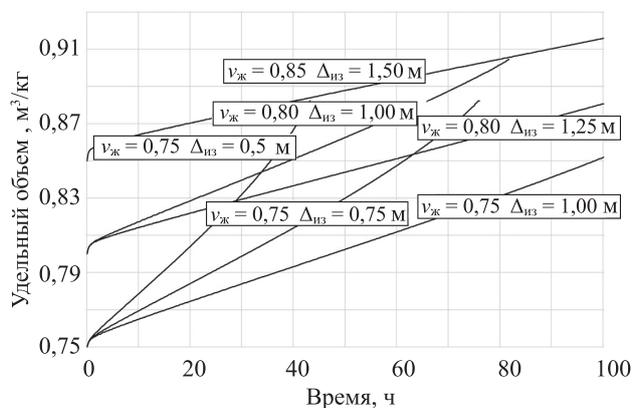


Рис. 3. Изменение доли пространства, занятого сжиженным природным газом, за время транспортирования в емкости с разной толщиной изоляции

Таблица 2. Результаты численного эксперимента

Обозначение	Варианты транспортирования СПГ					
	0,8 × 1,0	0,8 × 1,25	0,85 × 1,5	0,75 × 1,0	0,75 × 0,75	0,75 × 0,5
Максимальное время, ч	82	100	100	92	60	35
Максимальное давление, МПа	0,751	0,558	0,417	0,751	0,751	0,751
Масса СПГ в танках, т	942,5	942,5	1001,4	883,5	883,5	883,5
Остаток СПГ в танках, т	940,3	940,5	1000,5	879,9	879,8	879,8
Потери жидкости, т	2,2	2,0	0,9	3,6	3,7	3,7

Таблица 3. Изменение температуры СПГ за счет подвода теплоты через изоляцию и повышения давления паров

Обозначение	Варианты транспортирования СПГ					
	0,8 × 1,0	0,8 × 1,25	0,85 × 1,5	0,75 × 1,0	0,75 × 0,75	0,75 × 0,5
Время, ч	82	100	100	92	60	35
Давление, МПа	0,751	0,558	0,417	0,751	0,751	0,751
Температура СПГ, К	141,5	134,6	129,4	141,5	141,5	141,5

приведено в табл. 3. Начальная температура СПГ составляла 111 К. Как видно из таблицы, к концу эксперимента в отдельных случаях жидкость была перегрета на 30 К, что сказалось на снижении ее плотности и увеличении объема, который занимает жидкость даже несмотря на некоторые потери массы за счет испаряемости.

### Заключение

По результатам выполненного численного эксперимента, можно сделать следующие выводы:

- 1) транспортирование сжиженного природного газа в хранилищах с газозаполненной изоляцией технически возможно, и, при выборе достаточной толщины изоляции, может обеспечить удовлетворительные логистические результаты;
- 2) при бездренажном транспортировании нет потерь энергоносителя сжиженного природного газа, так как все образовавшиеся пары аккумулируются в паровом пространстве и могут быть использованы в виде топлива по месту доставки;

### Литература

1. Буянова Л.Н., Мудрова О.М. Логистика малотоннажного СПГ // Мир транспорта. 2019. Т. 17. № 4. С. 166–180. doi: 10.30932/1992-3252-2019-17-4-166-180
2. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа. Технологии и оборудование. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2011. 159 с.
3. Майорец М.А., Симонов К.В. Сжиженный природный газ – будущее мировой энергетики. М.: Альпина Паблишер, 2013. 131 с.
4. Рачевский Б.С. Производство и потребление компримированного и сжиженного природного газа CNG/LNG. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2018. 173 с.
5. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы. В 2 т. Т.1. Основы теории и расчета: учебник для студентов вузов. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1996. 575 с.
6. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 549 с.
7. Васильев Г.Г., Иванцова С.Г., Рахманин А.И. Особенности обеспечения безопасной эксплуатации крупногабаритных изотермических резервуаров для хранения сжиженного природного газа // Газовая промышленность. 2013. № 11. С. 57–61.
8. Архаров А.М., Архаров И.А., Беляков В.П. и др. Криогенные системы. В 2 т. Т. 2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем. М.: Машиностроение, 1999. С. 556–562.
9. Яковлев Е.И., Видовский Л.А., Глоба В.М. Тепловые режимы хранилищ сжиженных газов. СПб.: Недра, 1992. 182 с.
10. Lemmon E.W., McLinden M.O., Friend D.G. Thermophysical properties of fluid system. NIST Chemistry Webbook, NIST Standard Reference Database Number 69.
11. Scurlock R.G. Surface Evaporation of Cryogenic Liquids, Including LNG and LPG // Stratification, Rollover and Handling of LNG, LPG and Other Cryogenic Liquid Mixtures. Springer International

- 3) нарастание давления насыщения жидкости в процессе транспортировки создает дополнительные технические проблемы при организации разгрузки танкера-газовоза, так как жидкость, которая к моменту завершения транспортирования находится в состоянии насыщения при высоком давлении, при переливе в приемную емкость с меньшим давлением будет частично переходить в паровое состояние, что потребует дополнительных мер для утилизации большого количества паров сжиженного природного газа;
- 4) целесообразно рассмотреть возможность изготовления автономных плавучих контейнеров с большой толщиной изоляции, которые будут буксироваться по рекам без использования судов носителей. Низкая себестоимость такого рода хранилищ делает возможность просто оставлять их на месте доставки сжиженного природного газа в качестве автономного источника энергоносителя, отбор паров сжиженного природного газа на хозяйственные нужды, значительно снизит темпы роста давления паров и увеличит срок хранения сжиженного природного газа.

### References

1. Buyanova L.N., Mudrova O.M. Logistics of Low-Tonnage LNG. *World of Transport and Transportation*, 2019, vol. 17, no. 4, pp. 166–180. (in Russian). doi: 10.30932/1992-3252-2019-17-4-166-180
2. Fedorova E.B. *State-of-the-Art and Development of the Global Liquefied Natural Gas Industry: Technologies and Equipment*. Moscow, Gubkin University, 2011, 159 p. (in Russian)
3. Maioretz M.A., Simonov K.V. *Liquefied Natural Gas – The Future of Global Energy Economy*. Moscow, Al'pina Publ., 2013, 131 p. (in Russian)
4. Rachevsky B.S. *Production and Consumption of Compressed AND Liquefied Natural GAS CNG/NG*. Moscow, Gubkin University, 2018, 173 p. (in Russian)
5. Arkharov A.M. et al. *Cryogenic Systems*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1996, 575 p. (in Russian)
6. Cvetkov F.F., Grigorev B.A. *Heat-Mass-Exchange*. Moscow, MPEI Publ., 2005, 549 p. (in Russian)
7. Vasilev G.G., Ivantcova S.G., Rakhmanin A.I. Safe operation ensurance of large-sized isothermal tanks for liquefied natural gas storage. *Gas Industry Magazine*, 2013, no. 11, pp. 57–61. (in Russian)
8. Arkharov A.M. et al. *Cryogenic Systems*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999, pp. 556–562. (in Russian)
9. Iakovlev E.I., Vidovskii L.A., Globa V.M. *Thermal Conditions of Liquefied Gas Storages*. St. Petersburg, Nedra Publ., 1992, 182 p. (in Russian)
10. Lemmon E.W., McLinden M.O., Friend D.G. *Thermophysical properties of fluid system*. NIST Chemistry Webbook, NIST Standard Reference Database Number 69.
11. Scurlock R.G. Surface Evaporation of Cryogenic Liquids, Including LNG and LPG. *Stratification, Rollover and Handling of LNG, LPG and Other Cryogenic Liquid Mixtures*. Springer International Publishing, 2016, pp. 41–62. doi: 10.1007/978-3-319-20696-7\_4

- Publishing, 2016. P. 41–62. (SpringerBriefs in Energy). doi: 10.1007/978-3-319-20696-7\_4
12. Kandoliya P.D., Mehta N.C. Recent research on cryogenic storage tank: a review // *International journal for research in applied science & engineering technology (IJRASET)*. 2017. V. 5. N 4. P. 1681–1686.
  13. Каганер М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. М.: Машиностроение, 1966. 275 с.
  12. Kandoliya P.D., Mehta N.C. Recent research on cryogenic storage tank: a review. *International journal for research in applied science & engineering technology (IJRASET)*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 1681–1686.
  13. Kaganer M.G. *Thermal Insulation in Cryoengineering*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966, 275 p. (in Russian)

#### Авторы

**Баранов Александр Юрьевич** — доктор технических наук, профессор, руководитель департамента, Научно-производственное предприятие «КРИОН», Санкт-Петербург, 197375, Российская Федерация; профессор практики, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57191032604, ORCID ID: 0000-0002-9263-8153, abaranov@itmo.ru

**Валентинова Ксения Александровна** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; инженер, Санкт-Петербургский филиал ООО «Газпром проектирование», Санкт-Петербург, 191036, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-1202-8022, Valentinova\_96@bk.ru

**Иванов Лев Владимирович** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-6916-7154, levladiv@mail.ru

#### Authors

**Aleksandr Yu. Baranov** — D.Sc., Professor, Head of Research Department, NPP “KRION”, Saint Petersburg, 197375, Russian Federation; Professor of Practice, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57191032604, ORCID ID: 0000-0002-9263-8153, abaranov@itmo.ru

**Kseniia A. Valentinova** — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Engineer, St. Petersburg Branch of Gazprom Design, Saint Petersburg, 191036, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-1202-8022, Valentinova\_96@bk.ru

**Lev V. Ivanov** — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-6916-7154, levladiv@mail.ru