

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ КИПЯЩЕГО ГАЗА  
ВНУТРИ РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ИСПАРЕНИЯ В ANSYS FLUENT**

**COMPUTATIONAL SIMULATION OF BOIL-OFF GAS FORMATION INSIDE  
LIQUEFIED NATURAL GAS TANK USING EVAPORATION MODEL  
IN ANSYS FLUENT**

*Д-р. техн. наук С.В. Саркисов<sup>1</sup>, А.А. Смелик<sup>2</sup>, канд. воен. наук А.Н. Дегтярев<sup>3</sup>, Ю.И. Гринюк<sup>2</sup>*

*D.Sc. S.V. Sarkisov, A.A. Smelik, Ph.D. A.N. Degtyarev, U.I. Grinyuk*

<sup>1</sup>*Военный институт (инженерно-технический) ВА МТО им. А.В. Хрулева,*

<sup>2</sup>*Военный инновационный технополис «ЭРА», <sup>3</sup>ВА МТО им. А.В. Хрулева*

Формирование, вентилирование и сжигание в факелах испарившегося газа (BOG) рассматривается как один из вкладов в выброс парниковых газов (GHG). Существующие модели не способны проанализировать реальное поведение паров внутри резервуара со сжиженным природным газом (СПГ). В данной работе модель испарения используется для оценки скорости испарения СПГ (BOR) внутри резервуара СПГ. Результат показывает, что значение BOR согласуется с предыдущим исследованием, проведенным с помощью другой модели, и со стандартом Международной морской организации (ИМО), который составляет менее 0,15 % веса в день. Результаты также позволяют нам визуализировать поведение испарения СПГ в резервуарах.

**Ключевые слова:** сжиженный природный газ (СПГ), испаряющийся газ (BOG), модель испарения, парниковый газ (GHG).

Evaporated gas generation, venting and flaring (BOG) is considered one of the contributors to greenhouse gas emissions (GHG). Existing models are unable to analyze the actual behavior of vapors inside a liquefied natural gas (LNG) tank. In this paper, an evaporation model is used to estimate the LNG evaporation rate (BOR) inside an LNG tank. The result shows that the BOR value is consistent with previous research using a different model and with the International Maritime Organization (IMO) standard of less than 0,15 % weight per day. The results also allow us to visualize the vaporization behavior of LNG in tanks.

**Keywords:** liquefied Natural Gas (LNG), Boil-off Gas (BOG), evaporation model, Greenhouse Gas (GHG).

Известно, что температура насыщенного кипения СПГ составляет  $-163$  °С. Из жидкого состояния СПГ газообразное состояние, которое является природным газом, было получено во время морской транспортировки из-за непрерывного воздействия теплового потока на резервуар СПГ. Движение газообразного вещества

внутри резервуара можно проиллюстрировать с помощью программы вычислительной гидродинамики, которую невозможно использовать, если учитывать только количество теплового потока. Избыток паров необходимо удалить, чтобы избежать повышения давления внутри резервуара СПГ. Удаление газообразного вещества из

резервуара приведет к экономическим и экологическим последствиям для окружающей среды.

Правильный выбор модели многофазного кипения вместе с законом сопротивления и размером частиц позволит предсказать движение паровой фазы. Таким образом, детальное понимание процесса парообразования позволит исследователям и инженерам минимизировать потери газа при испарении [9, 10, 13].

Для анализа используется танкер СПГ мембранного типа, поскольку он охватывает более половины всех танкеров СПГ, используемых во всем мире [1, 9, 10]. Двухмерная геометрия танка в соответствии с [2] показана на рис. 1. Ширина цистерны была определена автором для того, чтобы удовлетворить требования анализа и с целью проверки. Трехмерная геометрия была построена с помощью программного обеспечения GAMBIT и сетки с использованием тетраэдрических элементов. Все стороны резервуара, кроме верхней стороны, были приняты в качестве граничных условий свойств стенки с конкретными значениями граничных условий в соответствии с реальной отраслевой практикой [17]. На верхней стороне резервуара задано граничное условие для выхода давления, чтобы обеспечить выход жидкости и пара или обратный поток в зависимости от соответствующего давления на выходе. В данном случае предполагается, что давление на выходе составляет 101,3 кПа в соответствии с реальным рабочим давлением СПГ [12], хотя оно немного выше, чем атмосферное давление [3].

В данной модели определены два объема. Структурный объем охватывает от внешней оболочки до внутренней оболочки резервуара, подверженной воздействию груза, который представляет собой материал основной изоля-

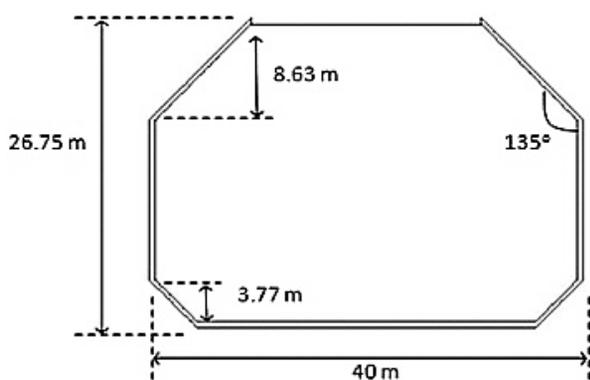


Рис. 1. Резервуар в двухмерном изображении

ции [14], внешнюю сталь, внутреннюю сталь, область опорного соединения, наполнитель различного размера, угловое железо, балластную среду и так далее. Другой объем груза представляет собой материал СПГ. Связанные свойства материалов, используемые для каждого объема, показаны в табл. 1.

Формула BOR. Ключевыми параметрами при определении образования BOG являются плотность и энтальпия СПГ. В используемой литературе [4, 5] приводятся несколько моделей и уравнений для оценки плотности паров природного газа. В указанных работах использовалось уравнение Бенедикта-Уэбба-Рубина (BWR) для оценки плотности природного газа внутри резервуара для хранения [15]. Уравнение BWR было рассчитано с помощью хорошо известного уравнения энергетического баланса [6].

$$BOR = \frac{q}{\rho \cdot V \cdot h_{fg}} \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 100 \% \quad (1)$$

Уравнение показывает, что BOR напрямую зависит от изменения утечки тепла  $q$ , теплоты парообразования  $h_{fg}$ , плотности  $\rho$  и общего объема  $V$  СПГ внутри резервуара. Однако в данной работе образование BOG СПГ определялось исключительно на основе температуры насыщения СПГ ( $-163 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$$\text{MassTransferRate} = \frac{r \cdot VF_l \cdot \rho_l \cdot (T_l - T_{sat})}{T_{sat}} \quad (2)$$

где  $r$  — коэффициент релаксации;  $VF_l$  — объемная доля жидкости;  $\rho_l$  — плотность жидкости;  $T_l$  — температура жидкости и  $T_{sat}$  — температура насыщения.

Реализация UDF в ANSYS Fluent позволяет использовать фундаментальные уравнения течения жидкости.

Закон сопротивления Шиллера-Наумана используется для взаимодействия фаз; он был использован для описания сопротивления между сферической частицей пара и окружающей жидкостью СПГ [8, 11].

Было сделано несколько упрощающих допущений для того, чтобы удовлетворить требования модели и в то же время сохранить точность и надежность вычисленного массового расхода BOG.

Таблица 1

*Свойства материалов используемых в данном анализе*

Свойства	Значение
Температура кипения	-163 °С
Плотность жидкости	424,53 кг/м <sup>3</sup>
Удельная теплоемкость жидкости, $c_p$	3450 Дж/(кг·К)
Вязкость жидкости, $\mu$	1178,133 кг/с
Теплопроводность жидкости, $k$	0,193 Вт/(м·К)
Поверхностное натяжение жидкости, $\sigma L$	0,014 Н/м
Теплота парообразования, $h_{fg}$	51,03·10 <sup>5</sup> Дж/кг
Теплота плавления, $h_{sf}$	58,62·10 <sup>3</sup> Дж/кг
Плотность пара	1,826 кг/м <sup>3</sup>
Теплопроводность изоляции между внутренней и внешней оболочкой, $U$	0,411 кДж/(м <sup>2</sup> ·К)

Таблица 2

*Сравнительные параметры, используемые для сравнения и проверки результатов моделирования*

Параметр моделирования	Экспериментальная модель	Данные для проверки
Объем резервуара	35062 м <sup>3</sup>	35250 м <sup>3</sup>
Временной шаг	1 час	5 минут
Плотность СПГ	452 кг/м <sup>3</sup>	452 кг/м <sup>3</sup>
Температура окружающей среды	5 °С	5 °С
Общая теплопроводность	0,4 кДж/(м <sup>2</sup> ·К)	0,4 кДж/(м <sup>2</sup> ·К)
Состав СПГ	100 % метан	90 % метан, 10 % этан
Рабочее давление	101325 Па	101325 Па

1. Температура пара находится в состоянии насыщения, так что соотношение вещества в состоянии пар-жидкость находится в состоянии равновесия.

2. Фаза кипения в условиях данной модели находится на режиме начального этапа закипания.

3. Любые условия обратного потока, возникающие на поверхности, считаются такими же, как и в жидкой фазе.

Модель была проверена путем сравнения с результатами моделирования, выполненного в [3]. Программное обеспечение, использованное в [3] — Aspen HYSYS 2004.2 для моделирования различных условий транспортировки СПГ. Несколько параметров, используемых в данном исследовании и в [3], немного отличаются, чтобы доказать, что упрощенная модель и предположения применимы к эталонным результатам, полученным в [3]. В табл. 2 показано сравнение

параметров моделирования, обычно используемых в данном исследовании и в [3] для проверки, рис. 2.

Анализ, проведенный на основе одного независимого сценария, выглядит следующим образом. Для общей теплопроводности мы приняли значение 0,411 кДж / (м<sup>2</sup>·К), что соответствует изоляционному материалу пенополиуретана и соотношению опорных стыков, соединяющих внутреннюю и внешнюю оболочки резервуара [3, 16].

Вместимость одного резервуара была принята равной 35062 м<sup>3</sup> и использовалась в реальной практике для судна объемом 145000 м<sup>3</sup>. Температура перемишки, которая находится между резервуарами внутри судна СПГ в данном расчете была принята равной 5 °С для того, чтобы удовлетворить минимально допустимую расчетную температуру материала конструкции оболочки. Температура окружающей среды основана на

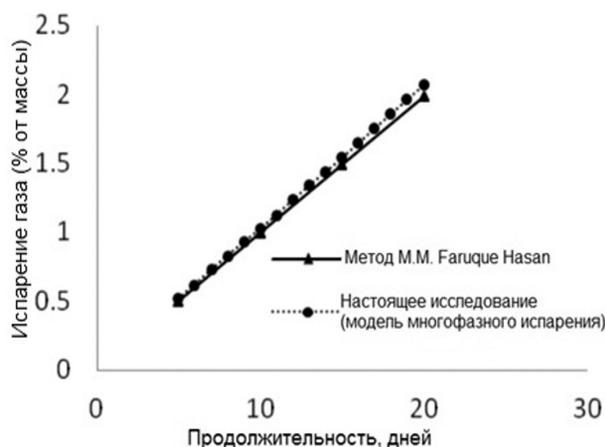


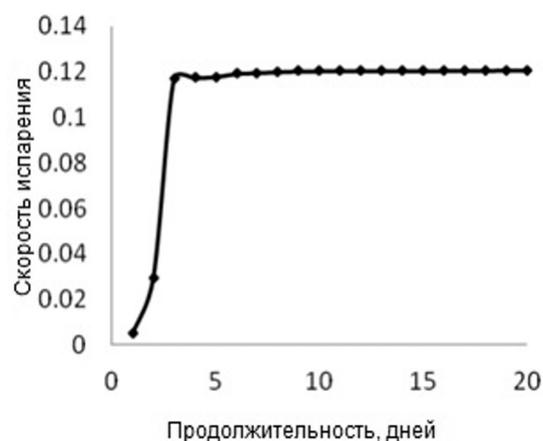
Рис. 2. Сравнение результатов CFD моделирования

критическом состоянии в соответствии с соответствующими требованиями охранной службы США (USCG), которая составляет 45 °С и 32 °С для температуры воздуха и морской воды, соответственно. Окружающий воздух и морская вода разделены осадкой типичного судна для транспортировки СПГ, которая составляет около 10 метров [5].

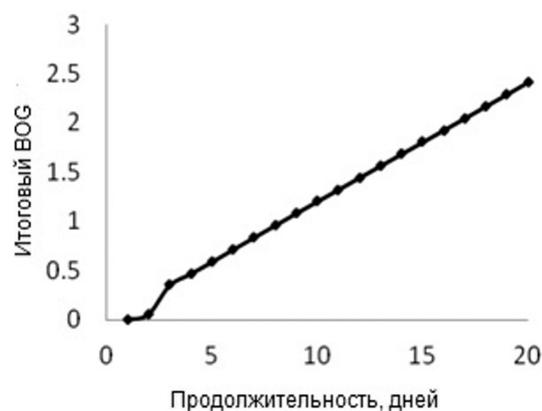
Для того, чтобы использовать уравнение (2), необходимы свойства каждой ячейки, а именно: плотность жидкости, объемная доля жидкости и температура жидкости. Например, общая объемная доля жидкости в СПГ внутри резервуара СПГ во время испарения может быть получена путем интегрирования из всего объема резервуара.

На графике, представленном на рис. 3, видно, что значение BOR становится почти постоянным примерно через 5 дней после рейса для соответствующего граничного условия. Это происходит из-за того, что начальная температура СПГ установлена немного ниже температуры насыщения. Это явление также связано с характеристиками изоляции резервуара СПГ. Более высокая теплопроводность используемой изоляции как ожидается, даст больше времени для того, чтобы BOR получил постоянное показание.

На рис. 4, а видно, что существует зависимость между температурой СПГ и парообразованием. Как и ожидалось, парообразование больше вблизи стенки резервуара СПГ из-за более высокой температуры СПГ в соответствующем месте. Из-за меньшей плотности пара по сравнению с СПГ, пар обладает плавучестью и стремится выйти на поверхность. Однако на поверх-



а



б

Рис. 3. а — скорость испарения; б — общее количество испарившегося газа в зависимости от продолжительности

ности возникает обратный поток из-за давления, действующего на выходе в насыщенном состоянии. Только давление пара, превышающее нулевое манометрическое давление, установленное на выходе, будет выходить, и кипение будет считаться ослабленным.

Поскольку утечка тепла через структурную и изоляционную часть резервуара происходит непрерывно, температура СПГ все еще поддерживается около температуры насыщения. Это утверждение можно увидеть на рис. 4, б. Температура СПГ стала немного выше температуры насыщения только вблизи стенки. По мере удаления СПГ от стенки температура СПГ все еще сохраняется на уровне температуры насыщения. Это имеет большое значение и является целью при транспортировке СПГ для выпуска газа-отхода, чтобы максимально сохранить состояние СПГ в жидкой фазе.

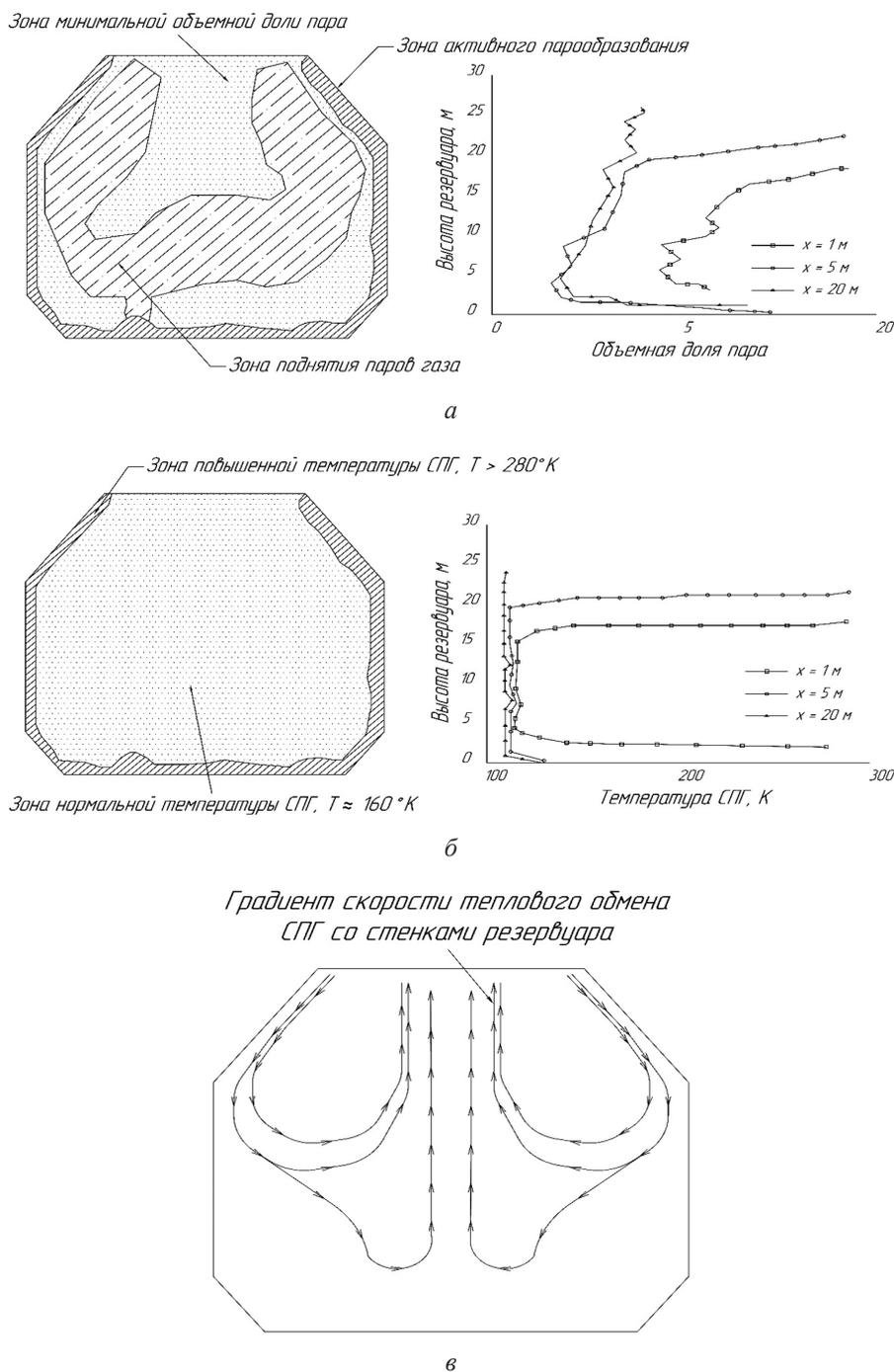


Рис. 4. Контур и профиль (а) объемной доли пара, (б) температуры пара и (в) величины скорости для температуры воздуха = 318 К, температуры морской воды = 305 К,  $U=0,411$  в центре резервуара ( $z = 20$  м)

### Вывод

Использование CFD-кода в ANSYS Fluent может быть использовано для моделирования поведения паров СПГ внутри резервуара. Однако правильное и корректное моделирование очень важно. Неправильный метод моделиро-

вания не способен отследить движение газовой фазы внутри резервуара.

Разработанная модель может быть использована для прогнозирования поведения паров СПГ внутри резервуара, что позволит улавливать потери СПГ и уменьшить потери энергии и выброса газа. Модель также способна получить

BOR для конкретного граничного условия, оценивается в 0,11 % в день, что ниже стандартного промышленного диапазона и в пределах спецификации стандарта IMO.

### Литература

1. Javier Romero and Ignacio Mosquera: Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources. Proceedings of the 11th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean. Vol. 2. 2005. P. 883–892.

2. Chen H.C. CFD Simulation of Compressible Two Phase Sloshing Flow in a LNG Tank. Ocean System Engineering. Vol.1. 2011. P. 31–57.

3. Hasan M., Zheng M.A., Karimi I.A. Minimizing Boil-Off Losses in Liquefied Natural Gas Transportation. Industrial & Engineering Chemistry Research. Vol. 48 (21). 2009. P. 9571–9580.

4. Chen Q.S., Wegrzyn J., and Prasad V. Analysis of temperature and pressure changes in liquefied natural gas cryogenic tanks. Cryogenic. Vol. 44 (10). 2004. P. 701–709.

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

6. Mohamad Shukri Zakaria, Kahar Osman, and Md. Nor Musa. Boil-Off Gas Formation inside Large Scale Liquefied Natural Gas (LNG) Tank Based on Specific Parameters. Applied mechanics and Material. Vol. 229–231. 2012. P. 690–694.

7. Guyer E.C., Brownell D.E. Handbook of Applied Design. (reprinted ed.): Taylor & Francis. 1999.

8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. — М.: Наука. 1972. 716 с.

9. Бармин И.В., Кунис И.Д. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра / под ред. А.М. Архарова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2009. 256 с.: ил.

10. Сорокин А.П. Сжиженный метан за рубежом / А.П. Сорокин, Л.М. Черняк. — М.: «НЕДРА». 1965. 135 с.

11. Кириченко Ю.А. Экспериментальное исследование теплообмена в осесимметричных объемах при граничных условиях второго рода / Ю.А. Кириченко, В.Н. Щелкунов // ИФЖ. 1974. № 1. С. 5–14.

12. Кириллов Н.Г., Вакуненко В.А., Саркисов С.В., Смелик А.А. Новые методики расчёта материальных сред и технических решений для обеспечения автономного функционирования котельных объектов военной инфраструктуры с использованием сжиженного природного газа // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2021. № 1 (13). С. 414–426.

13. Саркисов С.В., Вдовичев А.А. и др. Проблема увеличения продолжительности бездренажного хранения сжиженного природного газа в малолитражных криогенных баках // Научно-технический журнал «Вопросы оборонной техники Серия 16. Технические средства противодействия терроризму». 2020. № 7–8 (145–146). С. 142–146.

14. Саркисов С.В., Смелик А.А., Шорохов А.Д. и др. Анализ видов тепловой изоляции изотермических резервуаров СПГ // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2019. № 4 (5). С. 149–157.

15. Вакуненко В.А., Стукало С.А., Смелик А.А. и др. Анализ существующих способов производства и транспортировки сжиженного природного газа // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2020. № 6 (7). С. 192–196.

16. Шорохов А.Д., Вдовичев А.А., Есаян А.О. и др. Анализ периферийного оборудования локальных систем хранения СПГ // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: сб. ст. XIII Междунар. науч.-практ. конф. — Пенза. 2019. С. 238–242.

17. Шорохов А.Д., Стукало С.А. и др. Анализ систем локального хранения СПГ // Актуальные проблемы военно-научных исследований. 2019. № 4 (5). С. 158–167.

### References

1. Javier Romero and Ignacio Mosquera: Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources. Proceedings of the 11th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean. Vol. 2. 2005. P. 883–892.

2. Chen H.C. CFD Simulation of Compressible Two Phase Sloshing Flow in a LNG Tank. Ocean System Engineering. Vol.1. 2011. P. 31–57.

3. Hasan M., Zheng M.A., Karimi I.A. Minimizing Boil-Off Losses in Liquefied Natural

Gas Transportation. Industrial & Engineering Chemistry Research. Vol. 48 (21). 2009. P. 9571–9580.

4. Chen Q.S., Wegrzyn J., and Prasad V. Analysis of temperature and pressure changes in liquefied natural gas cryogenic tanks. *Cryogenic*. Vol. 44 (10). 2004. P. 701–709.

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

6. Mohamad Shukri Zakaria, Kahar Osman, and Md. Nor Musa. Boil-Off Gas Formation inside Large Scale Liquefied Natural Gas (LNG) Tank Based on Specific Parameters. *Applied mechanics and Material*. Vol. 229–231. 2012. P. 690–694.

7. Guyer E.C., Brownell D.E. *Handbook of Applied Design*. (reprinted ed.): Taylor & Francis. 1999.

8. Vargaftik N.B. Reference book on thermophysical properties of gases and liquids / N.B. Vargaftik. — Moscow: Nauka. 1972. 716 c.

9. Barmin I.V., Kunis I.D. Liquefied natural gas yesterday, today, and tomorrow (in Russian) / Edited by A.M. Arkharov. — Moscow: Bauman Moscow State Technical University. 2009. 256 p.: ill.

10. Sorokin A.P. Liquefied methane abroad / A.P. Sorokin, L.M. Chernyak. — M.: NEDRA. 1965. 135 p.

11. Kirichenko Y.A. Experimental study of heat transfer in axisymmetrical volumes at second kind boundary conditions / Y.A. Kirichenko, V.N. Schelkunov // *IPFG*. 1974. № 1. P. 5–14.

12. Kirillov N.G., Vakunenkov V.A., Sarkisov S.V., Smelik A.A. New methods of calculation of material media and technical solutions to ensure autonomous operation of boiler houses of military infrastructure using liquefied natural gas // *Actual problems of military and scientific research*. 2021. № 1 (13). P. 414–426.

13. Sarkisov S.V., Vdovichev A.A. et al. Problem of increasing the duration of drainless storage of liquefied natural gas in small-capacity cryogenic tanks // *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriya 16. Tekhnicheskie sredstva protivodestviia terrorizmu*. 2020. № 7–8 (145–146). P. 142–146.

14. Sarkisov S.V., Smelik A.A., Shorokhov A.D. et al. Analysis of Types of Thermal Insulation of Isothermal LNG Tanks // *Actual Problems of Military and Scientific Research*. 2019. № 4 (5). P. 149–157.

15. Vakunenkov V.A., Stukalo S.A., Smelik A.A. et al. Analysis of existing methods of production and transportation of liquefied natural gas // *Actual problems of military and scientific research*. 2020. № 6 (7). P. 192–196.

16. Shorokhov A.D., Vdovichev A.A., Esayan A.O. et al. Analysis of peripheral equipment of local LNG storage systems // *Perspective directions of road transport complex development: collected articles. XIII International Scientific-Practical Conference*. — Penza. 2019. P. 238–242.

17. Shorokhov A.D., Stukalo S.A. et al. Analysis of LNG local storage systems // *Actual problems of military and scientific research*. 2019. № 4 (5). P. 158–167.