

DOI 10.15589/jnn20150511  
УДК 629.5.063.6:622.691.2-404  
Г67

## SELECTION OF LIQUEFIED NATURAL GAS FUEL TANKS FOR OCEAN-GOING SHIPS

### ВЫБОР ТОПЛИВНЫХ ЦИСТЕРН СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ СУДОВ С ДЛИННОЙ РЕЙСОВОЙ ЛИНИЕЙ

**Viktor M. Gorbov**

viktor.gorbov@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0002-9697-8083

**Vira S. Mitienkova**

vera.mytenkova@nuos.edu.ua  
ORCID: 0000-0003-3369-7943

**В. М. Горбов**

канд. техн. наук, проф.

**В. С. Митенкова**

канд. техн. наук, доц.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

**Abstract.** Estimation of weight-size parameters for different types of liquefied natural gas fuel tanks used in ocean-going ships is done in this article. Prediction of volume, empty weight and mass with total fuel capacity of membrane, prismatic, spherical and cylindrical tanks for five containerships from 2500 TEU to 18000 TEU is the main aim of research. Total fuel capacity for MAN two-stroke low speed diesel engines is estimated for one-way trip. Weight-size parameters of cylindrical cryogenic tanks with ellipsoidal head are estimated. Estimation of volume and mass for other tanks types is performed with dimensionless ratio usage obtained for gas carrier vessels. Obtained data are capable of LNG-fuel tanks choiceduring the conceptual design of ocean-going ships. It is foundthe biggest spaceat constant liquefied natural gas mass need for spherical tanks, further pressurized cylindrical tanks thenprismaticand membrane ones with slightly different volume. The lowest mass need for membrane tanks, little heavier aluminum spherical and steel cylindrical cisterns, further prismatic tanks and spherical ones made of steel. It is shown the lowest weight-size parameters has membrane tanks but it usage need strong change in ship hulls design techniques. Independent cylindrical tanks type C or prismatic type B are the most rational choice for ocean-going ships.

**Keywords:** ship fuel systems; liquefied natural gas; cylindrical cryogenic tanks; prismatic tanks; membrane tank; weight-size parameters.

**Аннотация.** Проведено обоснование выбора типа топливных цистерн сжиженного природного газа по масогабаритным параметрам для судов с длинной рейсовой линией (на примере контейнеровозов). Получены значения объема и массы мембранных, призматических, цилиндрических, сферических стальных и алюминиевых топливных танков СПГ в широком диапазоне установленной мощности главных двигателей. Представлены рекомендации по выбору типа цистерн для газообразного топлива на стадии концептуального проектирования.

**Ключевые слова:** судовые топливные системы; сжиженный природный газ; цилиндрические криогенные танки; призматические танки; мембранные танки; масогабаритные показатели.

**Анотація.** Наведено обґрунтування вибору типу паливних цистерн зрідженого природного газу за масогабаритними параметрами для суден з довгою рейсовою лінією (на прикладі контейнеровозів). Отримані значення об'єму та маси мембранних, призматичних, циліндричних, сферичних сталевих та алюмінієвих паливних танків ЗПГ у широкому діапазоні встановленої потужності головних двигунів. Представлені рекомендації щодо вибору типу цистерн для газоподібного палива на стадії концептуального проектування.

**Ключові слова:** судові паливні системи; зріджений природний газ; циліндричні криогенні цистерни; призматичні танки; мембранні танки; масогабаритні показники.

## REFERENCES

- [1] Gorbov V. M., Mitienkova V. S. *Alternativnye topliva v sudovoy energetike: monografiya* [Alternative fuels in the ship's power: monograph]. Nikolaev: NUOS Publ., 2012. 316 p.

- [2] GOST 14249-89. *Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost* [State Standard 14249-89. Vessels and apparatuses. Norms and methods of strength calculation]. Moscow, Standartinform Publ., 1989. 53 p.
- [3] Zaytsev V. V., Korobanov Yu. N. *Suda-gazovozy* [Gas ships]. Leningrad : Sudostroenie Publ., 1990. 304 p.
- [4] Lashchinskiy A. A. *Konstruirovaniye svarnykh khimicheskikh apparatov: spravochnik* [Construction of welded chemical apparatus: handbook]. Leningrad : Mashinostroenie Publ., 1981, 382 p.
- [5] Costs and benefits of LNG as ship fuel for container vessels. Key results from a GL and MAN joint study. *DNV GL Group*, 2013. Available at: URL: [http://www.gl-group.com/pdf/GL\\_MAN\\_LNG\\_study\\_web.pdf](http://www.gl-group.com/pdf/GL_MAN_LNG_study_web.pdf).
- [6] Dobrota D., Lalić B., Komar I. Problem of Boil-off in LNG Supply Chain. *TRANSACTIONS ON MARITIME SCIENCE*, 2013, no. 2. pp. 91–100.
- [7] In Focus. LNG as Ship Fuel. *DNV GL Group*, 2015. no. 1. 52 p. Available at: URL: [http://production.prestogo.com/fileroot7/gallery/dnvgl/files/original/124feddb807045969b3071a55f73c80b/124feddb807045969b3071a55f73c80b\\_low.pdf](http://production.prestogo.com/fileroot7/gallery/dnvgl/files/original/124feddb807045969b3071a55f73c80b/124feddb807045969b3071a55f73c80b_low.pdf).
- [8] LNG fuelled ships as a contribution to clean air in harbours. *Clean North Sea Shipping*, 2013. Available at: URL: <http://cnss.no/wp-content/uploads/2013/08/CNSS-LNG-report-4mb.pdf>.
- [9] MAN B&W Two-Stroke Propulsion Engines. Catalogue of products. *MAN Diesel & Turbo*, 2015. 204 p. Available at: URL: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/marine-engine-programmes/4510-0014-00d9d156f0bf5969569b45ff0200499204.pdf>.
- [10] QUANTUM 9000 Two-stroke LNG — Marine Engines & Systems. *MAN Diesel & Turbo*. Available at: URL: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/quantum-9000.pdf?sfvrsn=22>.
- [11] Ramoo R. The Application of a New Tank Containment System to ULTRA-Large LNG Carriers. *Altair Engineering, Inc*, 2011. 32 p. Available at: URL: <http://www.scribd.com/doc/187809327/Application-of-a-New-Tank-Containment-System-to-ULTRA-Large-LNG-Carriers#scribd>.
- [12] Yoshinori N., Akira T., Takayuki K., Takashi K. IHI-SPB Tank for LNG-Fueled Ship. *IHI Engineering Review*, 2015. vol. 47. no. 2. pp. 17–21.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Ужесточение требований к выбросам в атмосферу со стороны водного транспорта является основной причиной применения сжиженного природного газа (СПГ) в качестве морского топлива, т.к. это позволяет снизить выбросы  $SO_x$  на 95–100%,  $NO_x$  — на 85–90%,  $CO_2$  — на 20–25% [10]. С 2015 г. действует положение об индексе энергетической эффективности судов, направленное на уменьшение выбросов диоксида углерода, в 2016 г. вступает в силу ограничение по выбросам оксидов азота Tier III, использование топлив с содержанием серы свыше 0,5% будет запрещено с 2020 г. в Европейском Союзе и с 2025 г. — во всем мире. Альтернативой природному газу является установка на судне оборудования для очистки уходящих газов, в большинстве случаев дорогостоящего и крупногабаритного.

До недавнего времени природный газ использовался преимущественно на судах с короткой рейсовой линией, таких как буксиры, паромы, суда обслуживания буровых платформ, которые строились в основном под надзором классификационного общества DNV GL Group. Ужесточение экологического законодательства привело к появлению проектов контейнеровозов, танкеров, автомобилевозов, газозов, балкеров и других судов с длинной рейсовой линией, работающих на сжиженном природном газе. По состоянию на май 2015 г. действовало 63 судна, двигатели которых работали на СПГ (без учета газо-

возов), и официально был подтвержден предстоящий ввод в эксплуатацию еще 76 объектов в 2018 г. [7].

Применение сжиженного природного газа на новых типах судов требует решения новых задач. Одной из наиболее актуальных является выбор типа емкостей для хранения СПГ для судов с большой установленной мощностью двигателей и длинной рейсовой линией. Цистерны СПГ занимают больше пространства, чем танки жидкого топлива. Кроме того, в течение рейса СПГ испаряется, что может привести к опасному повышению давления в топливных емкостях, если газ регулярно не отбирается (что обязательно следует учитывать для судов с высокой автономностью плавания).

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Исследования, проведенные Germanischer Lloyd для 5 контейнеровозов с установленными мощностями главных двигателей от 14500 до 65000 кВт, показали, что при использовании сжиженного природного газа большая часть дополнительных инвестиций приходится на криогенные емкости. Отмечалось, что удельные затраты на цилиндрические танки типа С выше, чем на призматические типа В [5].

Южнокорейская судостроительная компания Hanjin Shipping предложила концепцию контейнеровоза 16300 TEU, оборудованного двумя мембранными танками сжиженного природного газа. В качестве основного преимущества использования криогенных

емкостей такого типа указывается более эффективное использование судового пространства и уменьшение занимаемого объема практически в два раза по сравнению с цилиндрическими и сферическими танками [7].

В проекте контейнеровоза «Quantum 9000», представленного классификационным обществом DNV, предусматривается хранение СПГ в двух цилиндрических однокорпусных танках объемом по 2500 м<sup>3</sup> каждый, хотя рассматривались и другие типы криогенных емкостей, в частности в качестве наиболее приемлемой альтернативы рассматривался призматический вкладной танк производства IHI Corporation [10].

Среди доступных публикаций, посвященных выбору топливных цистерн для СПГ, отсутствует сопоставление характеристик различных типов криогенных танков по значениям испаряемости с учетом регулярного отбора топлива, массогабаритным, стоимостным и другим параметрам, которые следует учитывать на стадии концептуального проектирования судов.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — оценка массогабаритных характеристик различных типов топливных цистерн сжиженного природного газа для судов с длинной рейсовой линией (на примере контейнеровозов) на стадии концептуального проектирования.

#### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

К числу основных способов хранения СПГ относятся: изотермический — хранение при постоянной температуре, обеспечивающей избыточное давление насыщенных паров, близкое к атмосферному, полуизотермический — хранение газа в резервуарах при постоянной температуре и давлении выше атмосферного. Для морских энергетических комплексов СПГ максимальная технологически обоснованная величина давления полуизотермического способа хранения составляет 1,2 МПа. Вследствие того, что хранение большого объема газа под давлением в сжиженном виде приводит к значительному увеличению массы и размеров цилиндрических емкостей, активно обсуждается возможность применения других типов танков, которые используются на газовозах.

Сжиженный природный газ, перевозимый газовозами, транспортируется во встроенных мембранных или полумембранных танках, или вкладных

цистернах сферической, призматической или цилиндрической формы [3]. Согласно международной классификации ИМО танки делятся на встроенные (мембранные) и вкладные типа А (призматической формы), В (призматические и сферические) и С (цилиндрические цистерны). Все танки, кроме типа С, относятся к атмосферным с избыточным давлением не выше 0,07 МПа. Цистерны типа С проектируются на рабочее давление до 2 МПа.

Согласно правилам классификации и постройки морских судов Det Norske Veritas на судах, где используется СПГ в качестве топлива, разрешается устанавливать танки типа В и С. Цистерны типа С выполняются двухкорпусными с вакуумно-порошковой или вакуумно-многослойной изоляцией, рассчитанными на давление до 1,2 МПа, и однокорпусными с порошковой изоляцией и наружной обшивкой стальным листом с рабочим давлением 0,4–0,6 МПа. Двухкорпусные танки выпускаются объемом от 5 до 500 м<sup>3</sup>, однокорпусные — от 700 до 2500 м<sup>3</sup>, как в горизонтальном, так и в вертикальном исполнении [12].

Основной задачей исследования была укрупненная оценка объема, занимаемого различными типами цистерн и их массы порожнем и с полным запасом топлива на рейс. В качестве объекта исследования выбраны пять контейнеровозов, для которых Germanischer Lloyd проводил сравнительную оценку эффективности различных технологий снижения выбросов в атмосферу, включая и перевод судов на работу на сжиженном природном газе (табл. 1) [5]. Кроме того, анализ портфеля заказов показал, что среди проектов создания судов с длинной рейсовой линией на СПГ наибольшее количество приходится именно на контейнеровозы [7].

Масса запасов топлива определялась для рейса в один конец (половина пути). Удельный эффективный расход топлива для природного газа и тяжелого топлива принимался для малооборотных двухтактных двигателей компании MAN, т.к. именно такие двигатели установлены на рассматриваемых контейнеровозах [9].

При расчете цилиндрических цистерн (базовый вариант) диаметр внешнего корпуса можно определить как:  $d_H = d_B + \delta_B + \delta_H + a$ , где  $d_B$  — диаметр внутреннего корпуса цистерны,  $a$  — толщина изоляции (расстояние между внешним и внутренним корпусами цистерны),  $\delta_B$ ,  $\delta_H$  — толщина стенок внутреннего и внешнего корпусов цистерны [2].

**Таблица 1.** Характеристики контейнеровозов

TEU	Скорость, узлов	Мощность главного двигателя, кВт	Длина рейса, миль
2500	20	14500	5300
4600	21	25000	13300
8500	23	47500	23000
14000	23	53500	23000
18000	23	65000	23000

Внутренний диаметр цистерны с эллипсоидными днищами:

$$d_B = \sqrt[3]{\frac{V_{ц}}{\left(\frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{4x}\right)k_3}} \text{ м,}$$

где  $V_{ц}$  — объем внутреннего корпуса цистерны, м<sup>3</sup>;  $k_3$  — коэффициент запаса, учитывающий наличие «пустого» пространства в цистерне (принимается 0,85 – 0,95);  $x$  — соотношение «диаметр / высота» ( $D/H$ ).

Толщину изоляции, м, можно определить как

$$a = \frac{0,1d_B}{1 - x_a},$$

где  $x_a$  — соотношение «толщина изоляции / внешний диаметр цистерны».

Площадь поверхности внутреннего корпуса, м, цилиндрической цистерны с эллипсоидным днищем:

$$S_B = d_B H_B \pi + 2\pi d_B \left( d_B + \frac{0,5d_B}{\sqrt{3}} \ln \left( 1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right),$$

где  $H_B$  — высота корпуса цистерны, м.

Толщина стенок корпусов цистерны, мм, из условий прочности [7]:

$$\delta = \frac{Pd}{2\varphi[\sigma] - P} + c,$$

где  $[\sigma]$  — допускаемое напряжение материала корпуса цистерны, МПа;  $P$  — давление хранения СПГ, МПа;  $\varphi$  — коэффициент прочности сварочных швов;  $c$  — прибавка к расчетной толщине стенки.

Высота (длина) внешнего корпуса цистерны, м, находится как:

$$H_H = H_B + \delta_B + a + \delta_H.$$

Площадь поверхности внешнего корпуса цистерны, м<sup>2</sup> [8]:

$$S_H = d_H H_H \pi + 2\pi d_H \left( d_H + \frac{0,5d_H}{\sqrt{3}} \ln \left( 1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right).$$

Объем цистерны с эллипсоидными днищами, м<sup>3</sup> [8]:

$$V_H = \pi d_H^2 \left( \frac{2d_H}{3} + \frac{H_H}{4} \right).$$

Масса внутреннего и внешнего корпусов цистерны хранения, кг [2]:

$$M_B = \left( \left( \pi (d_B + \delta_B)^2 \left( \frac{2}{3} (d_B + \delta_B) + \frac{1}{4} (H_B + \delta_B) \right) - \pi d_B^2 \left( \frac{2}{3} (d_B + \frac{1}{4} H_B) \right) \right) \right) \rho_B,$$

$$M_H = \left( \left( \pi d_H^2 \left( \frac{2}{3} d_H + \frac{1}{4} H_H \right) - \pi (d_H - \delta_H)^2 \left( \frac{2}{3} (d_H - \delta_H) + \frac{1}{4} (H_H - \delta_H) \right) \right) \right) \rho_H,$$

где  $\rho_B, \rho_H$  — плотность материалов внешнего и внутреннего корпусов, кг/м<sup>3</sup>.

Сравнение расчетных значений объема и массы цистерн с данными, приводимыми официальными производителями такого оборудования показало высокую степень достоверности полученных результатов [4]. Статистическая обработка характеристик цистерн, представленных в каталогах VRV Group, компании «Криогенмаш», Cryolog и других позволила получить достоверные аппроксимирующие зависимости для определения объема и массы порожнего сосуда от массы перевозимого топлива в диапазоне значения давления 0,4 – 1,0 МПа. Так, объем цилиндрических криогенных танков для СПГ и их массу можно определить по зависимостям:  $V_T = 3,5 m_F + 1,5$  и  $m_T = 0,77 m_F + 2,3$ , соответственно, где  $m_F$  — масса перевозимого топлива.

Оценка объема и массы криогенных танков других типов проводилась с использованием безразмерных коэффициентов, полученных для газозовов, и представленных в работе [1]. Исследования проводились совместно машиностроительной компанией Altair Product Design и Мичиганским университетом, полученные коэффициенты соотношения объемов и масс различных типов танков позволяют их использовать для сравнения массогабаритных показателей на стадии концептуального проектирования для различных объемов перевозимого СПГ.

Результаты оценки объемов топливных емкостей различных типов для контейнеровозов представлены на рис. 1. В качестве базового значения для сравнения рассматривался объем цистерн для тяжелого топлива (в расчетах принималось, что главные двигатели являются, как правило, двухтопливными и в течение всего рейса работают на тяжелом топливе или на природном газе, масса и объем запального топлива при этом не учитывались). Кроме «чистого» объема цистерн оценивался объем описанного вокруг танков параллелепипеда, учитывающий «мертвое» пространство на судне, которое образуется вследствие установки топливных емкостей. Сравнивались варианты установки цилиндрических, сферических, призматических и мембранных танков.

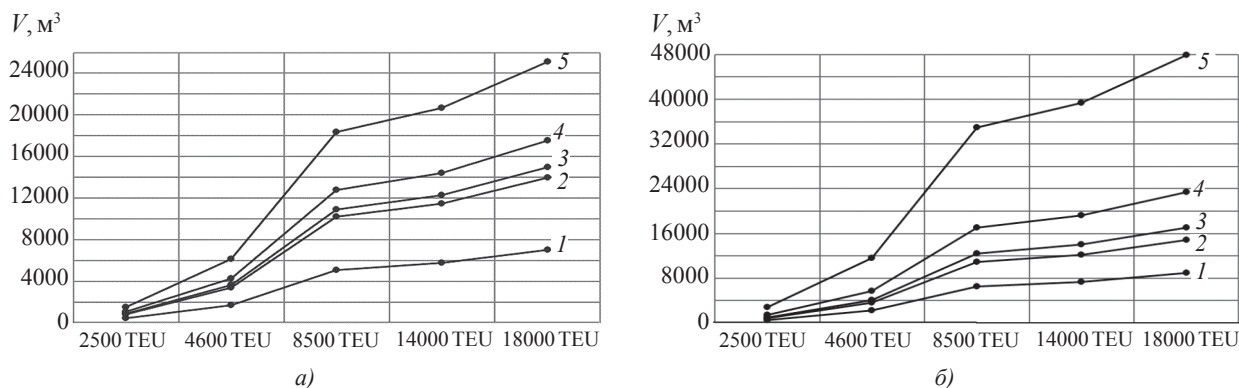


Рис. 1. Изменение объема цистерн запаса топлива для главного двигателя контейнерного судна:

*a* — объем цистерн без учета «мертвого пространства»; *б* — объем цистерн с учётом «мертвого пространства»; 1 — цистерны тяжелого топлива; 2 — призматические танки СПГ; 3 — мембранные танки СПГ; 4 — цилиндрические цистерны СПГ; 5 — сферические танки СПГ

Объем призматических танков типа В, необходимый для транспортировки обеспечивающего работу главного двигателя в течение половины рейса СПГ, в 2 раза больше объема цистерн с эквивалентным количеством тяжелого топлива. Для мембранных и цилиндрических танков это значений в 2,1 и 2,5 раза выше, соответственно. Наибольший объём потребуется для сферических танков типа В — в 3,6 раза выше, чем для цистерн с тяжелым топливом (рис. 1, *a*). С учётом реального объема, занимаемого топливными цистернами на судне, включая «мертвое» пространство, то для призматических танков это значение в 1,65 выше, чем для емкостей с нефтяным топливом, для мембранных и цилиндрических, соответственно, — в 1,9 и 2,6 раза, а для сферических — в 5,3 раза (рис. 1, *б*).

При выборе типа криогенного танка следует учитывать не только его геометрическую форму, но и основной конструкционный материал, используемый при изготовлении (рис. 2).

Так, при одинаковом количестве перевозимого топлива наименьшая масса порожней емкости с учетом веса изоляции будет у мембранных стальных танков,

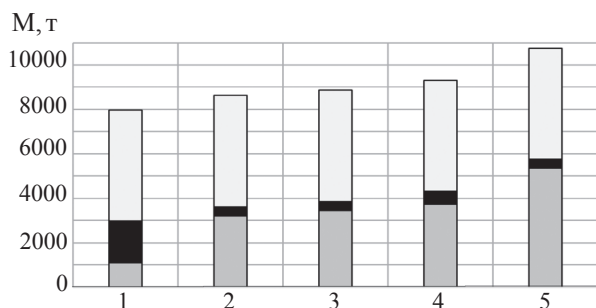


Рис. 2. Распределение массы для танков СПГ различных типов на примере контейнеровоза 18000TEU:

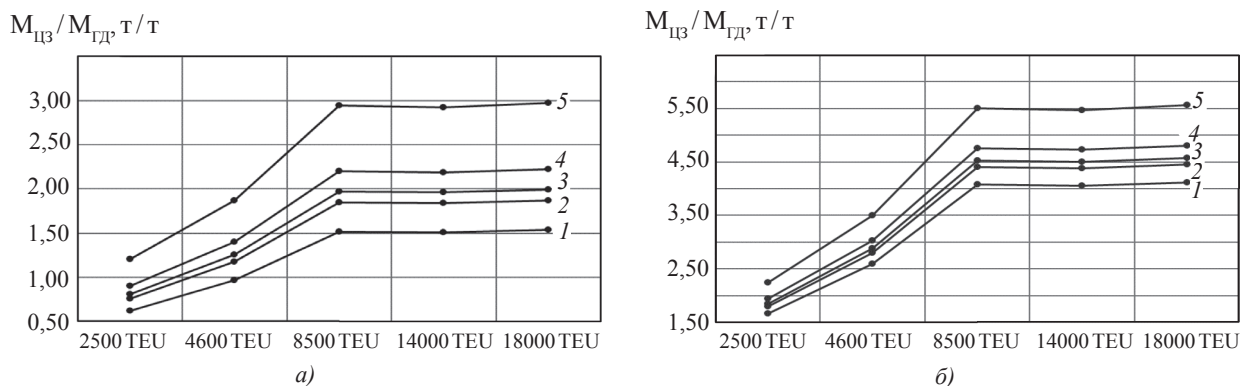
1 — мембранные стальные; 2 — сферические алюминиевые; 3 — цилиндрические стальные; 4 — призматические стальные; 5 — сферические стальные; ■ — масса танка; ■ — масса изоляции; □ — масса топлива

масса емкостей сферической формы из алюминия и стали будет на 22% и 94% выше, соответственно. Аналогичные значения для цилиндрических и призматических танков из стали выше на 30% и 45%, соответственно. Следует отметить, что массовая доля изоляции для мембранных танков составляет 63% и только 37% приходится непосредственно на емкость. Для других типов криогенных емкостей на изоляцию приходится 7–13% от общего веса порожнем.

Масса стальных мембранных танков порожнем для пяти рассматриваемых контейнеровозов составила от 177 т для судна 2500 TEU до 2966 т для 18000 TEU, для сферических емкостей из алюминия и стали — от 216 до 3619 т и от 343 до 5754 т, соответственно, для стальных призматических и цилиндрических — от 230 до 3856 т и от 257 до 4301 т, соответственно. Показательной характеристикой является относительная масса топливных цистерн порожнем и с полным запасом сжиженного природного газа на половину рейса, приведенная к массе установленного на судне главного двигателя (рис. 3).

Как видно из рис. 3 относительная масса мембранных стальных цистерн порожнем составляет 0,62–1,53 от массы главного двигателя, то же с полным запасом топлива — 1,66–4,12, для алюминиевых сферических емкостей порожнем и топливом, соответственно, — 0,76–1,87 и 1,8–4,46, для таких же стальных — 1,2–2,97 и 2,24–5,56. Относительная масса цилиндрических цистерн без топлива лежит в диапазоне от 0,81 до 2, с топливом — от 1,85 до 4,58, то же для призматических танков — 0,9–2,22 и 1,94–4,81, соответственно.

Дополнительным параметром, который надо учитывать при выборе танков для СПГ с учетом отбора топлива, является повышение давление внутри емкости вследствие испаряемости. Предварительную оценку можно произвести при известном составе природного газа по зависимостям, представленным в работе [6].



**Рис. 3.** Приведенная масса топливных цистерн для главного двигателя:  
*a* — без топлива; *б* — с топливом; 1 — мембранные стальные; 2 — сферические алюминиевые; 3 — цилиндрические стальные; 4 — призматические стальные; 5 — сферические стальные

**ВЫВОДЫ.** 1. Проведена оценка массогабаритных характеристик танковразличных типов для хранения сжиженного природного газа, которые можно использовать в качестве топливных цистерн на судах с длинной рейсовой линией (цилиндрические, мембранные, призматические и сферические).

2. Установлено, что при неизменной перевозимой массе СПГ наибольшее пространство на судне занимают сферические танки, далее идут цилиндрические цистерны под давлением, затем призматические и мембранные танки, объем которых отличается незначительно. В то же время наименьшая масса у мембранных танков, затем идут сферические цистерны из алюминия и цилиндрические стальные цистер-

ны, тяжелее призматических танков только сферические, изготовленные из стали.

3. Показано, что наименьшими массогабаритными характеристиками располагают мембранные танки, однако их использование требует существенного изменения в методиках проектирования корпусов судов. Реальными вариантами является установка вложенных цилиндрических танков типа С или призматических типа В. Окончательный выбор между вариантами может быть осуществлен после проведения расчетов испаряемости сжиженной фазы и изменения в связи с этим избыточного давления внутри танка в течение рейса с учетом отбора топлива.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горбов, В. М. Альтернативные топлива в судовой энергетике: монография / В. М. Горбов, В. С. Митенкова. — Николаев : НУК, 2012. — 316 с.
- [2] ГОСТ 14249-89. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность — Введен в действие с 1990-01-01. — М. : Издательство стандартов, 1989. — 53 с.
- [3] Зайцев, В. В. Суда-газовозы / В. В. Зацев, Ю. Н. Коробанов. — Л. : Судостроение, 1990. — 304 с.
- [4] Лацинский, А. А. Конструирование сварных химических аппаратов: справочник / А. А. Лацинский. — Л. : Машиностроение, 1981. — 382 с.
- [5] Costs and benefits of LNG as ship fuel for container vessels. Key results from a GL and MAN joint study [Electronic resource] // DNV GL Group, 2013. — Mode of access: [http://www.gl-group.com/pdf/GL\\_MAN\\_LNG\\_study\\_web.pdf](http://www.gl-group.com/pdf/GL_MAN_LNG_study_web.pdf).
- [6] Dobrota D., Problem of Boil-off in LNG Supply Chain / D. Dobrota, B. Lalić, I. Komar // TRANSACTIONS ON MARITIME SCIENCE. — 2013. — № 2. — P. 91–100.
- [7] In Focus – LNG as Ship Fuel [Electronic resource]. — DNV GL Group, 2015. — № 1. — 52 p. — Mode of access: [http://production.prestogo.com/fileroot7/gallery/dnvgl/files/original/124feddb807045969b3071a55f73c80b/124feddb807045969b3071a55f73c80b\\_low.pdf](http://production.prestogo.com/fileroot7/gallery/dnvgl/files/original/124feddb807045969b3071a55f73c80b/124feddb807045969b3071a55f73c80b_low.pdf).
- [8] LNG fuelled ships as a contribution to clean air in harbours [Electronic resource] // Clean North Sea Shipping, 2013. — Mode of access: <http://cnss.no/wp-content/uploads/2013/08/CNSS-LNG-report-4mb.pdf>.
- [9] MAN B&W Two-Stroke Propulsion Engines. Catalogue of products [Electronic resource] // MAN Diesel & Turbo, 2015 — 204 p. — Mode of access: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/marine-engine-programmes/4510-0014-00d9d156f0bf5969569b45ff0200499204.pdf>.
- [10] QUANTUM 9000 Two-stroke LNG – Marine Engines & Systems [Electronic resource] // MAN Diesel & Turbo. — Mode of access: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/quantum-9000.pdf?sfvrsn=22>.
- [11] Ramoo, R. The Application of a New Tank Containment System to ULTRA-Large LNG Carriers [Electronic resource] / R. Ramoo, T. Lamb. — Altair Engineering, Inc. — 2011. — 32 p. — Mode of access: <http://www.scribd.com/doc/187809327/Application-of-a-New-Tank-Containment-System-to-ULTRA-Large-LNG-Carriers#scribd>.
- [12] Yoshinori, N. IHI-SPB Tank for LNG-Fueled Ship / N. Yoshinori, T. Akira, K. Takayuki, K. Takashi. // IHI Engineering Review. — 2015. — Vol. 47. — № 2. — P. 17–21.

© В. М. Горбов, В. С. Митенкова

Надійшла до редколегії 25.09.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК д-р техн. наук, проф. М. І. Радченко