

Для цитирования: А.Ю. Баранов, Л.В. Иванов, А.М. Андреев. Расчет режимов бездренажной эксплуатации судовых криогенных танков типа «С». Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (1): 8-17. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-8-17

For citation: A.Yu. Baranov, L.V. Ivanov, A.M. Andreev. Calculation of the drainless operation modes of type C vessel cryogenic tanks. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48 (1): 8-17. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-1-8-17

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.642.86

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-1-8-17

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ БЕЗДРЕНАЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВЫХ КРИОГЕННЫХ ТАНКОВ ТИПА «С»

А.Ю.Баранов, Л.В. Иванов, А.М. Андреев

Санкт-Петербургский научно-исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, Россия

Резюме. Цель. Для нужд автономной газификации необходимо создавать речные суда для перевозки сжиженного природного газа (СПГ) и отрабатывать технологию транспортирования. В качестве наиболее рациональной системы хранения груза выбраны танки типа «С», которые могут эксплуатироваться в бездренажном режиме. **Метод.** Существующая методика определения уровня первоначального заполнения танка не учитывает время хранения СПГ, что приводит к вынужденному сбросу образовавшихся паров СПГ при достижении максимально допустимого избыточного давления в танке. При модернизации танкера в средство транспортирования СПГ авторами предлагается установка на него двух танков типа «С». Диаметр полусферических крышек 9 м, длина цилиндрической части танка 20 м. Максимально допустимое избыточное давление внутри танка принято равным 0,65 МПа. Толщина тепловой изоляции определена из габаритных размеров трюма с учетом условия обеспечения расстояния между боковой стенкой корпуса и наружным изоляционным слоем не менее 760 мм. Максимально возможная толщина слоя теплового ограждения составила 1,1 м. **Результат.** В статье предложена методика определения оптимального уровня заполнения танка для достижения бездренажного режима работы. Предложенная методика может позволить добиться максимальной экономической эффективности транспортирования СПГ за счет исключения потерь сбрасываемого СПГ для длительных переходов судна и транспортирования дополнительного объема СПГ для коротких переходов. **Вывод.** При увеличении давления паров СПГ внутри танка растет температура насыщения жидкой фракции и снижается ее плотность. Из-за этого доля объема занятого жидкостью постоянно возрастает, уменьшая паровое пространство емкости. Увеличение массы паров СПГ в сочетании с уменьшением объема паровой зоны повышают темп роста давления. При оптимизации начального уровня заполнения танка определено количество СПГ, которое будет вынуждено сброшено в виде пара на длинных перегонах. Оптимизация режима эксплуатации танков типа «С» возможна для случаев с любой толщиной изоляционного слоя. При выполнении подобных расчетов можно составлять таблицы оптимального заполнения для перегонов любой дальности.

Ключевые слова: танки типа «С», автономная газификация, бездренажное хранение, газозаполненная изоляция, отпарной газ, BOR

CALCULATION OF THE DRAINLESS OPERATION MODES OF TYPE «C» VESSEL CRYOGENIC TANKS

A.Yu. Baranov, L.V. Ivanov, A.M. Andreev

Saint Petersburg Research University of Information Technology, Mechanics and Optics,
9 Lomonosov St., St. Petersburg 191002, Russia

Abstract. Objective. For autonomous gasification, it is necessary to create river vessels to transport liquefied natural gas and work out the transportation technology. As the most efficient cargo storage system, C-type tanks are selected and operated in a non-drainage mode. **Methods.** The existing methodology for determining the level of initial filling of the tank does not consider the storage time of liquefied natural gas, which leads to the forced discharge of the formed liquefied natural gas vapors when the maximum allowable overpressure in the tank is reached. When upgrading a tanker into a transportation vessel for liquefied natural gas, the authors propose to install two C-type tanks on it. The diameter of the hemispherical covers is 9 m, the length of the cylindrical part of the tank is 20 m. The maximum permissible overpressure inside the tank is assumed to be 0.65 MPa. The thickness of the thermal insulation is determined from the overall dimensions of the hold, considering the condition of ensuring a distance between the hull sidewall and the outer insulation layer of at least 760 mm. The maximum possible thickness of the thermal layer was 1.1 m. **Results.** The article proposes a method for determining the optimal tank filling level to achieve a drainless operation mode. The proposed method can achieve the maximum economic efficiency of transportation of liquefied natural gas by eliminating the loss of discharged liquefied natural gas due to long ship crossings and transporting an additional liquefied natural gas volume for a short changeover. **Conclusion.** As the pressure of liquefied natural gas vapor increases inside the tank, the saturation temperature of the liquid fraction increases, and its density decreases. Thus, the proportion of the liquid volume is constantly increasing, reducing the vapor space of the container. An increase in the mass of liquefied natural gas vapors combined with a decrease in the steam area volume increases the pressure growth rate. When optimizing the initial tank filling level, the amount of liquefied natural gas that will be forced to be discharged as steam on long legs is determined. Optimization of the operating mode of type C tanks is possible for cases with any thickness of the insulation layer. When performing such calculations, tables of optimal filling for any range of legs can be created.

Keywords: type C tanks, autonomous gasification, drainless storage, gas-filled insulation, steam gas, BOR

Введение. Логистика энергоносителей в восточной части России организована крайне нерационально. Существует проблема с топливным снабжением населенных пунктов в северных регионах России. Основной энергоноситель – дизельное топливо (ДТ) доставляется в ряд регионов (Красноярский край, ЯНАО, Якутия и др.).

С Омского НПЗ, находящегося на юго-востоке России, дизельное топливо доставляется до нефтебаз, откуда развозится по магистральным рекам малотоннажными танкерами. Эта система снабжения топливом в значительной степени формирует сезонную логистическую компанию, которую часто называют «Северный завоз».

Расстояние между местом производства и потребления ДТ в ряде случаев неоправданно велико. Последнее время именно на северо-востоке России разворачивается производство СПГ. СПГ имеет множество преимуществ: он энергоэффективнее и экологичнее ДТ. Плечо его доставки от места производства до места потребления значительно короче.

Постановка задачи. Выбор рациональной схемы для снабжения потребителей сжиженного природного газа (СПГ) является важной технико-экономической задачей развития внутреннего рынка энергоносителей Российской Федерации. Применительно к северо-восточным регионам страны, отличающимся низкой плотностью населения и большой продолжительностью отопительного периода, поставки СПГ представляются крайне привлекательными, так как СПГ может использоваться в автономных системах газификации и в качестве моторного топлива. Учитывая слаборазвитую сеть автомобильных и железнодорожных магистралей, единственным способом транспортирования СПГ является водный транспорт.

СПГ уже производится на заводе Ямал СПГ на полуострове Ямал. В стадии строительства и разработки находится ГПЗ на Гыданском полуострове (Проект АрктиСПГ-2) и в Якутии (Проект Якутский ГПЗ). С учетом этого, Ямальский район ЯНАО, северные районы Краснояр-

ского края по побережью Енисея, а также заречные улусы Якутии могут быть в ближайшее время газифицированы за счет поставок СПГ водным транспортом [1].

При организации транспортирования СПГ малотоннажными судами, наиболее рациональной системой хранения груза являются танки типа «С» [2]. Танки типа «С» конструктивно представляют криогенные резервуары, рассчитанные на работу с высоким внутренним давлением. В штатном режиме эксплуатации испарившийся СПГ не удаляется из танка, а остается внутри, повышая внутреннее давление. В экстремальной ситуации при достижении максимального допустимого избыточного давления – часть пара сбрасывается из танка через аварийную арматуру, через факельную систему.

Потеря части перевозимого СПГ при транспортировании увеличивает транспортные издержки. Утилизация паров в факельной установке или в главном двигателе судна усложняет эксплуатацию. Необходимо исключить работу емкости в экстремальном режиме.

Методы исследования. Для снижения теплопритоков из окружающей среды в конструкции криогенной емкости используют различные типы тепловых ограждений. Для малотоннажных танкеров наиболее технологичным видом теплоизоляции является напыляемая пенополиуретановая пена, покрытая праймером [3].

Организация транспортирования СПГ отличается от перевозки традиционных криопродуктов: азота, аргона или кислорода. По соображениям экологической безопасности сброс паров СПГ в окружающую среду запрещен, поэтому перевозка часто проходит в «бездренажном» режиме. При этом пары СПГ не отводятся через дренажную арматуру, а накапливаются в паровом пространстве криогенной емкости.

За пределами России в бездренажном режиме транспортируют почти все криопродукты, так как это позволяет повысить степень использования криогенной емкости почти до 100%. Но для бездренажного транспортирования криопродуктов нужны криососуды, рассчитанные на высокое (0,6 – 0,8 МПа) давление, а продолжительность перевозки следует сводить к минимуму.

В условиях ограничения диапазона рабочих давлений необходимо разработать технологические приемы бездренажного длительного транспортирования СПГ по рекам.

Поскольку длина перегонов между точкой загрузки и точкой слива СПГ различна – величина максимального избыточного давления паров будет различаться. Максимально избыточное давление – фиксированная величина, которая определяется конструктивными параметрами танка.

Для предупреждения работы емкости в экстремальном режиме можно выбирать уровень первоначального заполнения таким образом, чтобы максимальное давление в танке устанавливалось не ранее окончания перегона.

Расстояния перевозок СПГ варьируются от нескольких десятков до нескольких сотен километров, поэтому разница в начальном уровне начального заполнения танков жидкостью может быть значительной. Необходимо создать алгоритм выбор оптимального заполнения танков криогенной жидкостью в зависимости от продолжительности доставки груза.

Исследования проведены в виде численного эксперимента на математической модели криогенных хранилищ, предназначенных для установки на модернизированный танкер класса река-море «Ленанефть Проект 621». Этот тип танкеров в настоящий момент не может эксплуатироваться из-за несоответствия нормативам безопасности МАРПОЛ для малых танкеров дедвейтом меньше 5000 т [4].

При модернизации этого танкера в средство транспортирования СПГ предлагается установка на него двух танков типа «С». Диаметр полусферических крышек 9 м, длина цилиндрической части танка 20 м. Максимально допустимое избыточное давление внутри танка принято равным 0,65 МПа. Толщина тепловой изоляции определена из габаритных размеров трюма с учетом условия обеспечения расстояния между боковой стенкой корпуса и наружным изоляционным слоем не менее 760 мм [5]. Максимально возможная толщина слоя теплового ограждения составила 1,1 м. Схема мидель-шпангоута, с расположенным танком приведена на рис. 1.

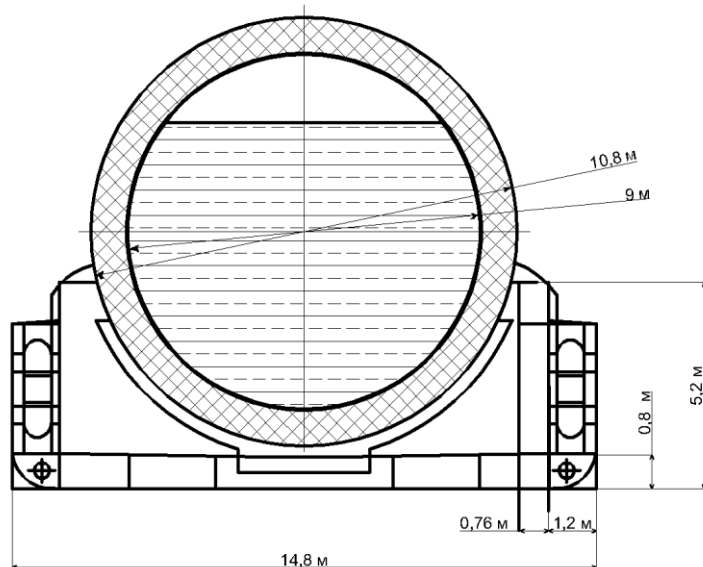


Рис.1. Мидель-шпангоут танкера после модернизации
Fig. 1. Tanker midship frame after modernization

Увеличить диаметр криогенного танка более 9 м нельзя, так как в таком случае вес системы значительно возрастет. Поэтому свободное пространство трюма использовано для размещения напыляемой тепловой изоляции, плотность которой 34-35 кг/м³. Увеличение толщины изоляционного слоя не вызывает существенного увеличения общей массы грузовых танков.

Обсуждение результатов. Основу математической модели криогенного хранилища составляет уравнение энергии для жидкой и паровой фракции [6-7]. 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 .

$$\rho_{жс} \cdot \frac{dh_{жс}}{d\tau} = \frac{dq_x}{dx} + \frac{dq_y}{dy} + \frac{dq_z}{dz} + q_v.$$

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 складывается из теплопритока из окружающей среды q_{oc} и теплоты, поглощаемой при испарении жидкости:

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

Применим метод замены переменных и получим упрощенную запись уравнения:

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

Отсюда получается алгебраическое выражение пригодное для вычисления энтальпий жидкости в следующий момент времени:

$$h'_{жс} = h_{жс} + \frac{q_v \cdot \Delta \tau}{\rho_{жс}}.$$

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 – т.е. жидкость перегрета. В этом случае инициализируется процесс парообразования: $h'_{жс} > h' = f(P_n)$, $\Delta g_{жс} > 0$.

2. Энтальпия жидкости равна энтальпии насыщенной жидкости при текущем давлении (нет парообразования): $h'_{жс} = h' = f(P_n)$, $\Delta g_{жс} = 0$.

3. Энтальпия жидкости меньше энтальпии насыщенной жидкости при текущем давлении. В этом режиме также не происходит парообразования, так как жидкость находится в недогретом состоянии: $h'_{жс} < h' = f(P_n)$, $\Delta g_{жс} = 0$.

В тех случаях, когда новое значение энтальпии жидкости оказывается выше энтальпии насыщенной жидкости, выполняется расчет потерь жидкости за счет испарения.

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.

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

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

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

$$g'_{жс} = g_{жс} - \Delta g'_{жс}$$

По известной плотности жидкой фракции $\rho_{жс} = f(P_n)$ рассчитывается удельный объем занимаемой жидкостью на новом временном слое: $v'_{жс} = g'_{жс} / \rho_{жс}$.

Объем, который будет занимать пар на новом временном слое: $v'_n = 1 - v'_{жс}$.

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 же рассчитывается плотность пара на новом временном слое:

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

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

$$0,1 \leq P_i \leq 2 \text{ МПа.}$$

Сравнивая новое значение плотности пара в паровом пространстве с табличными значениями плотности паров при различных давлениях [8], выбираются значений давлений, при котором разница расчетного давления паров и табличного значения минимальна $\Delta_{min} = \rho'_n - \rho_i$. Шаг $\Delta P_i = 0,001$ 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 переменным новых значений. Если произошло испарение жидкости, $\Delta g_{жс} > 0$, то энтальпии жидкости присваивается значение энтальпии насыщенной жидкости: $h_{жс} = h'$. 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:

$$\rho_n \cdot \frac{\partial h_n}{\partial \tau} = \frac{\partial q_y}{\partial y} + q_v$$

Уравнение энергии паровой фракции вычисляет изменение энтальпии паров с учетом подвода теплоты из ОС и количество теплоты, перенесенное с парами жидкой фракции, проникающих в паровое пространство.

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 Δq_y – это количество теплоты, внесенное насыщенными парами в паровое пространство: $\Delta q_y = \Delta g \cdot (h'' - h_n)$.

Ранее 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. Поэтому для паровой фазы принимается, что теплота от внутренних источников равна нулю и, соответственно, так как нет теплопритоков из ОС: $q_v = q_{oc} = 0$.

В нормативной документации приведена методика, по которой определяется уровень заполнения танка [9] по формуле:

$$Ll = Fl \cdot \frac{\rho_{min}}{\rho_{max}},$$

где Fl (*filling limit*) – максимальный уровень заполнения танка 98%,

ρ_{min} – минимальная плотность жидкой фракции СПГ (достигается при максимальном избыточном давлении паров СПГ), кг/м³;

ρ_{max} – максимальная плотность жидкой фракции (в момент загрузки, при нулевом избыточном давлении паров СПГ), кг/м³.

Для моделируемого резервуара уровень заполнения составляет:

$$Fl = 0,98 \cdot \frac{371,75}{423,73} = 0,86.$$

При перевозке СПГ на большие расстояния загрузка до фиксированного уровня не рациональна. В случае аномально длительного перехода возрастает вероятность перехода в экстремальный режим работы емкости. А в случае короткого перехода емкость можно было бы использовать в большей мере.

Однако подобный подход с фиксированным уровнем заполнения танка не является оптимальным. В случае длительного перехода – давление превысит максимально допустимое и часть пара будет сброшена, а в случае короткого перехода – давление не успеет достигнуть максимально допустимого, что означает, что за рейс могло быть перевезено большее количество СПГ.

При каботажной навигации в Норвегии, доставке СПГ по Рейну и другие, расстояния перегонов приблизительно одинаковы [10-11]. В России с её неравномерной плотностью населения и большим удалением населенных пунктов друг от друга необходимо использовать адаптированную технологию транспортирования СПГ.

В численном эксперименте моделируется перевозка СПГ по трем направлениям: навигация по Обской и Тазовской губе, по Енисею от Дудинки до Енисейска и по Лене от Ленска до Тикси, а также притоке Лены – Алдану до Усть-Маи. Выбраны несколько перегонов различной продолжительности, для которых оптимальным является разный уровень начального заполнения танка.

Продолжительность переходов определяется с учетом максимальной скорости судов типа «Ленанефть 621», которая составляет 19 узлов [12]. Рассматриваемые перегоны, расстояния между конечными точками и суммарное время прохождения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Рассматриваемые перегоны
Table 1. Considered routes

Перегон Distillation	Расстояние, км Distance, km	Время прохождения, ч Travel time, h
Якутск – Тикси Yakutsk – Tiksi	1631,1	94,4
Дудинка – Новоназимова Dudinka – Novonazimovo	1357,4	82,5
Дудинка – Бор Dudinka – Bor	1093,1	65,2
Якутск – Жиганск Yakutsk – Zhigansk	769,2	44,5
Сабетта – Панаевск Sabetta – Panaevsk	615,4	35,6
Дудинка – Игарка Dudinka – Igarka	252,9	15,4
Сабетта – Сёяха Sabetta – Syoyakha	125,3	7,6

Изменяя начальный уровень заполнения танка, можно вычислить время, за которое давление паров повысится до максимально допустимого уровня.

Начальное давление СПГ принято равным 0,105 МПа. Увеличение степени начального заполнения танка жидкостью от 0,7 до 0,925 привело к уменьшению продолжительности бездренажного транспортирования СПГ от 126,7 до 38 часов. График зависимости времени бездренажного хранения от первоначального уровня заполнения танка представлен на рис. 2.

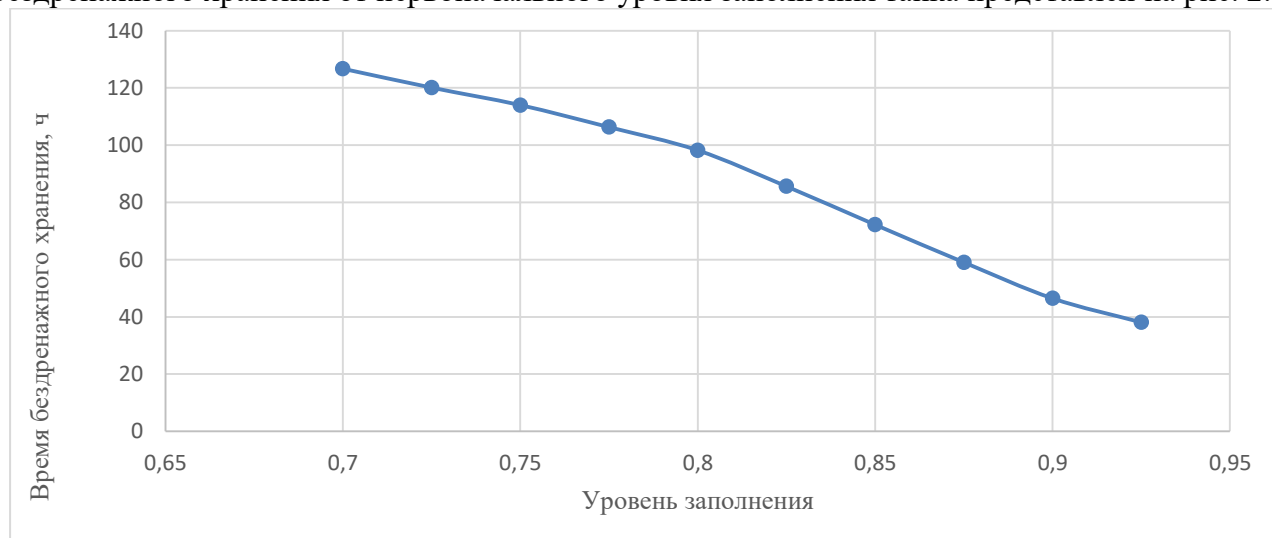


Рис. 2. График зависимости времени бездренажного хранения от первоначального уровня заполнения танка

Fig. 2. Graph of dependence of the time of non-drainage storage on the initial filling level of the tank

Вывод. При увеличении давления паров СПГ внутри танка растет температура насыщения жидкой фракции и снижается ее плотность. Из-за этого доля объема занятого жидкостью постоянно возрастает, уменьшая паровое пространство емкости. Увеличение массы паров СПГ в сочетании с уменьшением объема паровой зоны повышают темп роста давления.

При оптимизации начального уровня заполнения танка определено количество СПГ, которое будет вынуждено сброшено в виде пара на длинных перегонах. Вычислено дополнительное количество СПГ, которое можно перевести на коротких перегонах.

В табл. 2 приведено сравнение оптимизированной транспортной модели и модели, принятой сейчас.

Таблица 2. Результаты вычислительного эксперимента по моделированию перевозки сжиженного природного газа речным танкером
Table 2. Results of a computational experiment on modeling the transportation of liquefied natural gas (LNG) by river tanker

Рассматриваемый перегон Ferry in question	Время транспортирования, час Transportation time, hour	Оптимальный уровень начального заполнения жидкостью Optimum initial liquid fill level	Масса возможных потерь СПГ из-за превышения давления, т Mass of possible LNG losses due to overpressure, t	Дополнительная масса СПГ, т Additional mass of LNG, t
Якутск – Тикси Yakutsk – Tiksi	94,4	0,807	2,062	–
Дудинка – Ново-назимово Dudinka – Novonazimovo	82,5	0,832	2,062	–
Дудинка – Бор Dudinka – Bor	65,2	0,860	–	–
Якутск – Жиганск Yakutsk – Zhigansk	44,5	0,886	–	31,2
Сабетта – Панаевск Sabetta – Panaevsk	35,6	0,896	–	43,2
Дудинка – Игарка Dudinka – Igarka	15,4	0,915	–	66
Сабетта – Сёяха Sabetta – Syoyakha	7,6	0,922	–	74,4

Для больших расстояний экономическая эффективность определяется по массе предотвращенных потерь СПГ. Для коротких перегонов – экономический эффект определяется дополнительной массой перевезенного СПГ на километр.

Оптимизация режима эксплуатации танков типа «С» возможна для случаев с любой толщиной изоляционного слоя. При выполнении подобных расчетов можно составлять таблицы оптимального заполнения для перегонов любой дальности.

По сравнению с методикой, когда уровень заполнения принимается по плотности СПГ в момент отгрузки и плотности при максимальном избыточном давлении, – в оптимизированной методике наблюдается положительный экономический эффект.

Библиографический список:

1. Иванов Л.В., Баранов А.Ю., Плужникова Перспективы использования водного транспорта СПГ для автономной газификации отдаленных регионов // Газовая промышленность. 2020, №2(796). С. 52-58;
2. Баранов А. Ю., Иванов Л. В., Анализ конструкционных особенностей систем хранения груза для танков для модернизации проекта речного танкера класса река-море // Морской Вестник. 2019, №3(71). с 18-21;
3. Каталог продукции компании Woojo Hightech CO., LTD URL:<http://woojohightech.com/pdf/wojo-catalogue.pdf> (дата обращения 08.06.2020);
4. МАРПОЛ 73/78 Приложение I к конвенции «Правила предотвращения загрязнения нефтью» URL: <http://docs.cntd.ru/document/499014769> (дата обращения 08.06.2020);
5. Международный кодекс постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (IGC Code);
6. Архаров А.М. Криогенные системы: основы проектирования аппаратов, установок и систем. - М.: Машиностроение, 1999. 556-562 с.
7. Баранов А.Ю., Валентинова К.А., Иванов Л.В. Моделирование испарения сжиженного природного газа в мобильных резервуарах [Modeling of liquefied natural gas evaporation on mobile reservoirs] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2020. Т. 20. №4(128). С. 595-602.
8. Яковлев Е.И. Тепловые режимы хранилищ сжиженных газов. - СПб.: Недра, 1992. 182 с.

9. DNVGL-CG-0135 Liquefied gas carriers with independent cylindrical tanks of type C – 2016 URL: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/CG/2016-02/DNVGL-CG-0135.pdf> (дата обращения 08.06.2020);
10. Egil Rensvik Distribution and use of LNG for a cleaner environment // Presentation on the Network LNG Norway with GO LNG Interreg Project – Bergen, Norway – 2017 URL: http://www.lngcluster.eu/files/Main/files/Egil%20Rensvik_Network%20LNG%20Norway.pdf (дата обращения 08.06.2020);
11. Lucia Karpatyova LNG Masterplan in a nutshell. Project overview presentation – 2015 URL: http://lngmasterplan.eu/images/2015-12-16_04_LNG_MP_FE_Project_overview_Lucia.Karpatyova.pdf (дата обращения 08.06.2020);
12. Спецификация Ленанефть 621 URL: <https://russrivership.ru/public/files/doc357.pdf> (дата обращения 08.06.2020).
13. Soumya Chakraborty - Understanding the design of liquified gas carriers - Naval Architecture, 2019.- URL: <https://www.marineinsight.com/navalarchitecture/understandingdesignliquifiedgascarriers/>(дата обращения 09.06.2019)
14. International safety guide for inland navigation tankbarges and terminals. (ISGINTT).- Chapter 33: Types of gas carriers,2010, 14 с. 21
15. LNG vessel construction - Advantages of Moss Rosenberg technology- URL: <http://www.liquefiedgascarrier.com/mossrosenbergcontainmentsystem.html> (дата обращения 09.06.2019)
16. IHI: What is SPB tank?URL: https://www.ihi.co.jp/offshore/whatisspb_e.htm (дата обращения 09.06.2019)
17. Wursig G.M. LNG fuel tank: benefits and challenges - Managing risk DNV, 2012. 27 с. 21
18. Fleet List Small Scale LNG Carriers - Updated URL: <https://smalllng.com/fleetlistsmallscalelngcarriersupdated/>(дата обращения 09.06.2019)
19. Karistios Leonidas. Smallscale LNG ships: a report into the commercial drivers and technical requirements for seaborne smallscale supply - Southampton, UK: Lloyd's Register Marine, 2018.-32 с.
20. URL: <https://www.fkab.com/wpcontent/uploads/sites/3/CoraliusLNG.pdf> (дата обращения 09.06.2019) Coralius: 5800 m3 LNG Bunker and feeder vessel.

References:

1. Ivanov L.V., Baranov A.YU., Pluzhnikova Perspektivy ispol'zovaniya vodnogo transporta SPG dlya avtonomnoy gazifikatsii otдалennykh regionov // Gazovaya promyshlennost'. 2020, №2(796). S. 52-58; [Ivanov LV, Baranov A.Yu., Pluzhnikova Prospects for the use of LNG water transport for autonomous gasification of remote regions // Gas Industry. 2020, No. 2 (796). 52-58; (In Russ)]
2. Baranov A. YU., Ivanov L. V., Analiz konstruksionnykh osobennostey sistem khraneniya gruzha dlya tankov dlya modernizatsii proyekta rechnogo tankera klassa reka-more // Morskoy Vestnik. 2019, №3(71). s 18-21; [Baranov A. Yu., Ivanov L. V., Analysis of the structural features of cargo storage systems for tanks to modernize the project of a river-sea tanker // Marine Bulletin - 2019, No. 3 (71). from 18-21. (In Russ)]
3. Katalog produktov kompanii Woojo Hightech CO., LTD URL:<http://wojohightech.com/pdf/wojo-catalogue.pdf> (data obrashcheniya 08.06.2020)[Product catalog of Woojo Hightech CO., LTD URL: <http://wojohightech.com/pdf/wojo-catalogue.pdf> (access date 06/08/2020) (In Russ)]
4. MARPOL 73/78 Prilozheniye I k konventsii «Pravila predotvrashcheniya zagryazneniya neft'yu» URL: <http://docs.cntd.ru/document/499014769> (data obrashcheniya 08.06.2020)[MARPOL 73/78 Appendix I to the Convention “Rules for the Prevention of Oil Pollution” URL: <http://docs.cntd.ru/document/499014769> (date of access 08.06.2020 (In Russ)]
5. Mezhdunarodnyy kodeks postroyki i oborudovaniya sudov, perevozyashchikh szhizhennyye gazy nalivom (IGC Code) [International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code) (In Russ)]
6. Arkharov A.M. Kriogenyye sistemy: osnovy proyektirovaniya apparatov, ustanovok i sistem. - M.: Mashinostroyeniye, 1999. 556-562 s. [Arkharov A.M. Cryogenic systems: the basics of designing devices, installations and systems. - M.: Mechanical Engineering, 1999 . pp. 556-562 (In Russ)]
7. Baranov A.YU., Valentinova K.A., Ivanov L.V. Modelirovaniye ispareniiya szhizhennogo prirodnogo gaza v mobil'nykh rezervuarakh [Baranov A.Yu., Valentinova K.A., Ivanov L.V. Modeling of liquefied natural gas evaporation on mobile reservoirs // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2020. T. 20. No. 4 (128). pp. 595-602. (In Russ)]
8. Yakovlev Ye.I. Teplovyye rezhimy khranilishch szhizhennykh gazov. SPb.: Nedra, 1992. 182 s.[Yakovlev E.I. Thermal regimes of liquefied gas storage facilities. SPb.: Nedra, 1992. 182 p. (In Russ)]
9. DNVGL-CG-0135 Liquefied gas carriers with independent cylindrical tanks of type C - 2016 URL: <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/CG/2016-02/DNVGL-CG-0135.pdf> (date of treatment 06/08/2020);
10. Egil Rensvik Distribution and use of LNG for a cleaner environment // Presentation on the Network LNG Norway with GO LNG Interreg Project - Bergen, Norway - 2017 URL: http://www.lngcluster.eu/files/Main/files/Egil%20Rensvik_Network%20LNG%20Norway.pdf (date of access 06/08/2020);

11. Lucia Karpatyova LNG Masterplan in a nutshell. Project overview presentation - 2015 URL: http://lngmasterplan.eu/images/2015-12-16_04_LNG_MP_FE_Project_overview_Lucia.Karpatyova.pdf (access date 06/08/2020);
12. Spetsifikatsiya Lenaneft' 621 URL: <https://russrivership.ru/public/files/doc357.pdf> (data obrashcheniya 08.06.2020 [Lenaneft' 621 specification URL: <https://russrivership.ru/public/files/doc357.pdf> (date of access 06/08/2020). (In Russ)]
13. Soumya Chakraborty - Understanding the design of liquified gas carriers - Naval Architecture, 2019.- URL: <https://www.marineinsight.com/navalarchitecture/understandingdesignliquefiedgascarriers/>(дата обращения 09.06.2019)
14. International safety guide for inland navigation tankbarges and terminals. (ISGINTT).- Chapter 33: Types of gas carriers,2010, 14 с. 21
15. LNG vessel construction - Advantages of Moss Rosenberg technology- URL: <http://www.liquefiedgascarrier.com/mossrosenbergcontainmentsystem.html> (дата обращения 09.06.2019)
16. IHI: What is SPB tank?- URL: https://www.ihi.co.jp/offshore/whatisspb_e.htm (дата обращения 09.06.2019)
17. Wursig G.M. LNG fuel tank: benefits and challenges - Managing risk DNV, 2012.-27 с. 21
18. Fleet List Small Scale LNG Carriers - Updated URL: <https://smallng.com/fleetlistsmallscalelngcarriersupdated/>(дата обращения 09.06.2019)
19. Karistios Leonidas. Smallscale LNG ships: a report into the commercial drivers and technical requirements for seaborne smallscale supply - Southampton, UK: Lloyd's Register Marine, 2018.-32 с.
20. URL: <https://www.fkab.com/wpcontent/uploads/sites/3/CoraliusLNG.pdf> (дата обращения 09.06.2019) Coralius: 5800 m3 LNG Bunker and feeder vessel.

Сведения об авторах:

Баранов Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, факультет низкотемпературной энергетики, e-mail: abaranov@corp.ifmo.ru

Иванов Лев Владимирович, аспирант, факультет низкотемпературной энергетики, e-mail: levladiv@mail.ru

Андреев Анатолий Михайлович, аспирант, факультет низкотемпературной энергетики, e-mail: amandreev@itmo.ru

Information about authors:

Alexander Yu. Baranov, Dr. Sci. (Technical), Prof., Faculty of Low-Temperature Energy, e-mail: abaranov@corp.ifmo.ru

Lev V. Ivanov, Postgraduate Student, Faculty of Low-Temperature Energy, e-mail: levladiv@mail.ru

Anatoly M. Andreev, Postgraduate Student, Faculty of Low-Temperature Energy, e-mail: amandreev@itmo.ru

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 21.12.2020.

Принята в печать 19.01.2021.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 21.12.2020.

Accepted for publication 19.01.2021.