

В.А. ПАВЛОВСКИЙ, А.С. РЕУЦКИЙ
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

ОБОСНОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУЗОВОЙ СИСТЕМЫ БУНКЕРОВЩИКОВ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Исследованы тенденции применения сжиженного природного газа (СПГ) в качестве топлива на морском транспорте. Проанализированы основные операции, проводимые в процессе бункеровки СПГ. Рассмотрены основные способы утилизации выпара, образующегося при хранении и передаче СПГ. Предложен программный инструмент оценки количества образующегося выпара при проведении бункеровочных операций, помогающий определить состав грузовой системы бункеровщика на ранних этапах проектирования.

Ключевые слова: СПГ, EEDI, бункеровщик СПГ, отпарной газ, «МЕТАНК».

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Павловский В.А., Реуцкий А.С. Обоснование характеристик грузовой системы бункеровщиков сжиженного природного газа. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; Специальный выпуск 2: 191–199. УДК 629.553:629.563.82 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-191-199

V.A. PAVLOVSKY, A.S. REUTSKY
Krylov State Research Centre, Moskovskoe shosse, 44, St. Petersburg, Russia

LNG BUNKER HANDLING SYSTEM VERIFICATION

Tendencies in the use of LNG fuel for marine vessels are investigated. Main LNG bunkering operations are analyzed. Main methods for utilizing boil-off gas evaporated during LNG storage and bunkering are considered. The software package has been developed for assessment of boil-off gas amount during bunkering operations making it possible to define bunkering system configuration at the early design stages.

Key words: LNG, EEDI, LNG bunker, boil-off gas, METANK.

Authors declare lack of the possible conflicts of interest.

For citations: Pavlovsky V.A., Reutsky A.S.. LNG bunker handling system verification. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 191–199 (in Russian). UDC 629.553:629.563.82 DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-191-199

Введение

За последние десятилетия мировое потребление энергии выросло в разы. На рис. 1 показана статистика производства энергии в США за последние 60 лет. После рассмотрения данного графика можно сделать вывод о том, что доля природного газа в мировом энергопотреблении неуклонно растет. Это связано не только с повышающейся ценой на нефть и нефтепродукты, но и со вступлением в силу новых экологических требований, ограничивающих количество вредных выбросов в атмосферу.

На данный момент особое внимание судовладельцев и представителей судостроительной промышленности привлекает к себе Приложение VI морской конвенции МАРПОЛ, определяющее предельное содержание вредных веществ, попадаю-

щих в атмосферу в результате сжигания топлива в судовых энергоустановках. В последние годы происходит постоянное ужесточение требований к морским судам в части выбросов оксидов серы, оксидов азота, углекислого газа и твердых частиц в атмосферу. Хотя нормы ИМО по выбросам серы в особых районах достаточно жесткие, морская администрация каждой страны вправе устанавливать в своих портах еще более жесткие нормы. Так, европейская комиссия постановила, что с 01.01.2010 г. выброс оксида серы с любого судна при нахождении в порту ЕС не должен превышать 0,1 %.

Приложением VI МК МАРПОЛ 73/78 ИМО дополнительно установлены особые районы контроля выбросов серы (SECA – Sulphur Emission Control Areas), такие как Балтийское и Северное моря, пролив Ла-



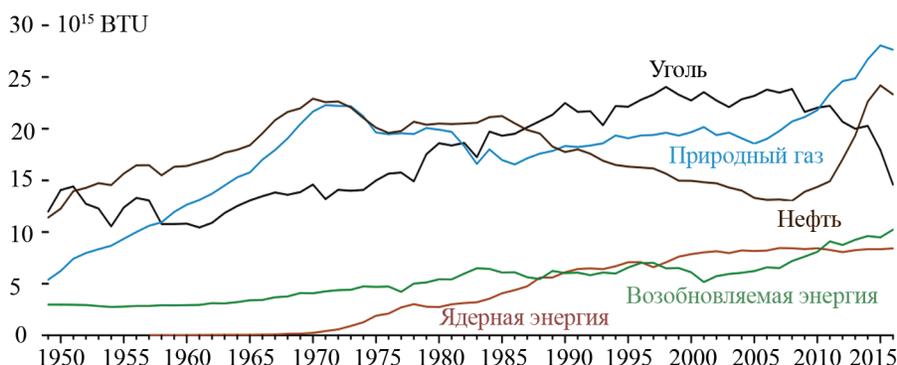


Рис. 1. Производство энергии в США за последние 65 лет [1]

Манш, прибрежные воды США и ряд других, в границах которых намечено в ближайшие годы многократно сократить выбросы серы с судов. Перечень таких особых районов будет существенно расширяться.

Североевропейская зона SECA представляет собой обширную акваторию, в которой сходятся морские транспортные линии со всего мира. Крупнейшие порты региона – Роттердам, Антверпен, Гамбург, Бремен, Гавр, Санкт-Петербург, Приморск, Усть-Луга и другие. Данный морской регион является одним из первых в мире по количеству совершаемых в год судовых рейсов (рис. 2).

В связи с тем, что зоны SECA находятся в узловых точках многих морских маршрутов, большое количество судовладельцев столкнется с необходимостью модернизировать имеющиеся у них суда таким образом, чтобы последние удовлетворяли вступающим в силу экологическим нормам [3]. Требования Приложения VI МАРПОЛ распространяются и на строящиеся суда.

Экономические и экологические аспекты использования сжиженного природного газа в качестве судового топлива

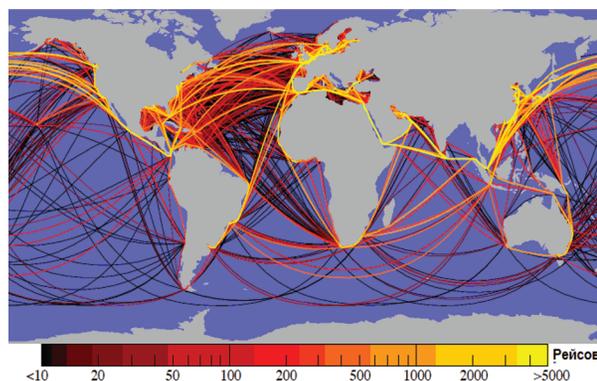
На данный момент есть несколько вариантов технологического решения проблемы выбросов оксидов серы, азота, а также твердых сажевых частиц:

- перевод судовых двигателей на дизельное топливо, содержание серы в котором сведено к минимуму;
- дооборудование судовой системы выпуска отработанных газов специальными катализаторами (скрубберами) для очистки выхлопных газов от вредных примесей;
- перевод судовых двигателей на природный газ.

Суда, находящиеся в эксплуатации в данное время, могут быть как модернизированы для работы на низкосернистом дизельном топливе, так и оборудованы системами очистки и катализации вредных примесей в выхлопных газах. Данные способы снижения количества вредных примесей в выхлопных газах отличаются низкими капитальными затратами и являются наиболее простыми решениями для судовладельцев. Строящиеся или планируемые к постройке суда могут быть оборудованы для использования сжиженного природного газа (СПГ) в качестве топлива как наиболее экологически чистого и сопоставимого по цене с низкосернистым дизельным топливом. Экономические преимущества сжиженного газа позволяют в приемлемые сроки окупить затраты на переоборудование судна для работы на СПГ, технологическое оборудование и стоимость бункеровки [5].

Необходимо также упомянуть о том, что ужесточение требований ИМО к выбросам парниковых газов в атмосферу с судов также затрагивает вопросы

Рис. 2. Морские транспортные линии [1]



экономии топлива. Особые усилия ИМО затрачивает на разработку стандарта EEDI (Energy Efficiency Design Index) в части общего определения, толкования его составных частей, их характеристик вместе с методами определения энергоэффективности для судов различного конструктивного исполнения, размера и назначения. Согласно стандарту EEDI собственная энергетическая эффективность судна [7] в нормальных условиях его хода определяется безразмерной величиной, вычисляемой по формуле

$$EEDI_{\text{учл}} = \frac{Rv}{g_{e(c)} \cdot P_{e\Sigma} \cdot Q_H^p},$$

где R – буксировочное усилие, кН; v – скорость хода, м/с; $g_{e(c)}$ – удельный секундный расход топлива на все энергопроизводящие установки, работающие на исследуемом режиме, общей мощностью $P_{e\Sigma}$, кВт/Вт·с; Q_H^p – низшая теплотворная способность топлива.

С помощью знаменателя данной формулы легко может быть учтен подробный состав энергетической установки судна, в том числе с учетом ее времени работы, нагрузки, вида топлива. Важным аспектом учета энергоэффективности судна является то, что уже сейчас параметр EEDI взят на вооружение всеми европейскими финансовыми организациями, связанными с кредитованием постройки судов, и является универсальным параметром, влияющим на процентную ставку. Таким образом, экономическая и экологическая составляющие топливоиспользования являются одним из важнейших рычагов давления правительств европейских стран на судоходные компании при помощи финансовых организаций. Данная мера в первую очередь направлена на то, чтобы увеличить количество новых судов, работающих в европейских водах и использующих природный газ в качестве топлива.

При морской транспортировке природного газа в сжиженном состоянии в результате нагрева неизбежно происходит испарение части груза. Пары природного газа можно повторно сжижать и возвращать в грузовой танк, а также использовать в качестве топлива для энергетической установки. Последнее зачастую является экономически и экологически более выгодным решением проблемы утилизации отпарных газов [6]. Перевод судовой энергетики на газ для судов, не являющихся газовозами, тоже уже является практически решенным вопросом. Однако если сам процесс сжигания отработан фирмами-строителями дизелей и котлов, то размещение бункера на судне и получение газового топлива на борту судна еще находится в процессе внедрения и разработки [5].

Способы проведения бункеровочных операций со сжиженным природным газом

Основными факторами, сдерживающими увеличение масштаба использования СПГ в качестве газового топлива на судах, являются отсутствие бункеровочной инфраструктуры, вопросы организации бункеровки и использования емкостей для хранения природного газа на судах и бункеровочных терминалах. Сегодня уже существуют решения, позволяющие хранить СПГ на борту судна в течение длительного времени, а также максимально вписывающиеся в судовые обводы практически без ущерба вместимости. На рис. 3б показано размещение мембранных топливных танков СПГ [8], а также топливных танков на верхней палубе парома Viking Grace норвежского оператора Viking Line (рис. 3а).

Наиболее развитой инфраструктурой для бункеровки судов, использующих СПГ в качестве топлива, исторически обладает Норвегия. Также в Европе строятся и планируются к постройке СПГ-терминалы в Швеции, Германии, Голландии, Бельгии, Великобритании и на побережье Средиземного моря во Франции, Испании и Греции. Помимо Европы СПГ-бункеровка осуществляется в США, Китае, Сингапуре и Южной Корее. Опыт внедрения СПГ в качестве морского топлива имеется у многих стран, однако наличие СПГ терминалов не означает решение проблемы обеспечения СПГ-бункеровки. Большая стоимость терминалов, особенности их размещения относительно крупных портов и населенных пунктов оказывают негативное влияние на их размер и пропускную способность.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день в мире уже имеется в эксплуатации специализированный бункеровщик СПГ – шведский Sea Gas, работающий в порту Стокгольма (рис. 4). Однако это судно создано специально для парома Viking Grace, упоминавшегося ранее, и причиной его создания стало желание судового оператора сократить время пребывания парома в порту, производя погрузку и бункеровку одновременно. Кроме бункеровщика Sea Gas необходимо упомянуть еще несколько судов, относящихся к газовозам малой вместимости (до 15 000 м³ СПГ) – Coralius, Coral Methane и другие суда, принадлежащие судовладельческой организации Antony Veder. Назначением газовоза малой вместимости помимо бункеровки газотопливных судов могут быть перевозки небольших партий СПГ как для нужд местной и региональной газификации,

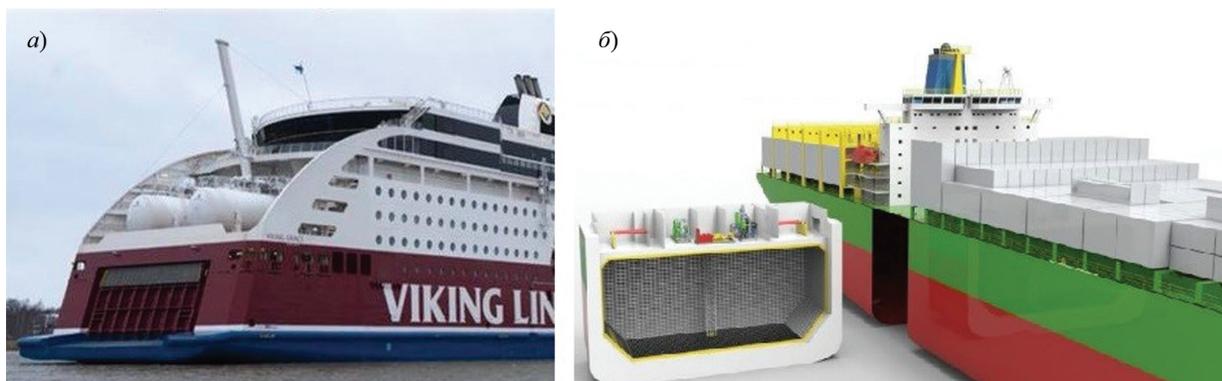


Рис. 3. Хранение СПГ на борту судна: а) размещение топливных танков на верхней палубе парома Viking Grace норвежского оператора Viking Line; б) размещение мембранных топливных емкостей СПГ внутри корпусных конструкций контейнеровоза [9]

так и в порядке региональной торговли экспортными энергоносителями на рынках соседних стран. Эти суда представляют собой фидерные газовозы и уже сейчас осуществляют бункеровку СПГ [11].

Существует несколько сценариев бункеровки СПГ. СПГ может передаваться на бункеруемое судно при помощи автомобильных цистерн (судно пришвартовано к стенке пирса), на специализированном терминале при помощи трубопроводов, при помощи бункеровочного судна СПГ, а также с использованием сменного контейнерного оборудования (танк-контейнеров СПГ). Судно-бункеровщик СПГ может представлять собой как танкер, так и несамоходную баржу. На рис. 5 представлены основные способы проведения бункеровочных операций с СПГ.

Автоцистерны позволяют проводить бункеровку СПГ на любом причале, в том числе в порту, не обу-

Рис. 4. Бункеровщик СПГ Sea Gas, Стокгольм



Рис. 5. Способы проведения бункеровочных операций с СПГ [12]



с помощью
СПГ
бункеровщика

с помощью
танк-
контейнера

с берегового
терминала

с авторейлера



Рис. 6. Передача бункерного СПГ между малым газовозом Coral Energy (слева) и нефтяным танкером MT Ternsund (справа), проведенная методом «борт-к-борту» на рейде порта Гетеборг, Швеция [11]

дованном СПГ-терминалом. Альтернативой данному способу видится использование сменных танк-контейнеров, устанавливаемых на палубе судна при помощи портового кранового оборудования взамен израсходованных. Заправленные танк-контейнеры могут быть доставлены на судно автомобильным или железнодорожным транспортом, а израсходованные танк-контейнеры возвращены для заправки. Положительный эффект в данном случае достигается путем сокращения времени, отведенного на бункеровку.

Преимуществом использования судна-бункеровщика СПГ является изоляция бункерных операций от грузовых причалов, что снижает их влияние на грузовые операции в порту и уменьшает последствия возможных аварий, связанных с использованием СПГ [15]. Типичное судно-бункеровщик СПГ имеет больший район снабжения топливом, чем баржа-бункеровщик, и большую вместимость. Суда-бункеровщики СПГ имеют конструкцию и эксплуатируются в соответствии с требованиями Международного газового кодекса и Классификационного общества, предъявляемыми к судам-газовозам.

Использование бункеровщиков СПГ, в отличие от аналогичных по назначению бункеровщиков жидким нефтяным топливом, выявляет серьезную проблему, определяемую, с одной стороны, практикой работы судна-бункеровщика, а с другой – свойствами СПГ как груза.

Принять СПГ при помощи специализированного судна-бункеровщика можно несколькими способами – в порту, в дрейфе или в движении. У каждого

способа есть как плюсы, так и минусы, но объединяет их одно – проведение бункеровки способом «борт-к-борту» (рис. 6). Этот способ подразумевает необходимость в практически полной унификации грузовой системы бункеровщика и топливной системы принимающего бункерное СПГ газотопливного судна. Еще одним фактором влияния СПГ на конструктивное исполнение грузовой системы бункеровщика и газотопливного судна являются потребительские свойства СПГ.

В настоящее время количество газотопливных судов в мире невелико по сравнению с количеством судов, работающих на традиционных сортах жидкого топлива, вероятность появления нуждающихся в бункеровке газотопливных судов в акватории, обслуживаемой бункеровщиком СПГ, труднопредсказуема. СПГ представляет собой криогенную жидкость, поэтому даже применение самых эффективных видов теплоизоляции не позволяет обеспечить его длительное хранение без образования выпара. Любая перегрузка СПГ сопровождается потерями части газа, объем которых увеличивается с ростом числа перегрузочных операций. Иными словами, при любой передаче СПГ происходит интенсивное парообразование.

На рис. 7 представлена схема грузовой системы бункеровщика и топливной системы газотопливного судна в момент бункеровки. Топливная система принимающего бункер судна может иметь различное исполнение. На верхней схеме в составе топливного резервуара газотопливного судна представлен танк типа «С», а на нижней – мембранный танк типа «В» (по классификации IGC [13]). Последний не способен выдерживать давление паров природного газа больше 0,25 бар. Превышение данного порога ведет к потере устойчивости оболочки танка, нарушению его целостности и другим последствиям.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что бункерный СПГ в момент передачи его на газотопливное судно должен иметь следующие параметры – околонулевое давление и соответствующую температуру – ниже точки кипения СПГ при данном давлении.

Частое наполнение грузового резервуара различными сортами СПГ, имеющими разные температуры, заведомо приводит к стратификации СПГ внутри грузового резервуара, а также избыточному парообразованию. Для бункеровщиков СПГ характерны частые операции, связанные с приемом и выдачей СПГ. Характерные для данного типа судна

перепады давления и температур внутри грузовой системы возникают при дозаправке емкости новой порцией СПГ, физические параметры которой отличается от параметров СПГ, находящегося в ней изначально.

Для того чтобы произвести операцию налива СПГ, бункеровщик СПГ должен предварительно подготовить к этой операции топливную систему судна, принимающего бункер [14]. В данном случае это означает подготовку топливной системы и топливных танков газотопливного судна к перевозке СПГ. Вопрос подготовки топливной системы судна, использующего природный газ в качестве топлива,

Рис. 7. Схема грузовой системы бункеровщика и топливной системы газотопливного судна в момент бункеровки СПГ

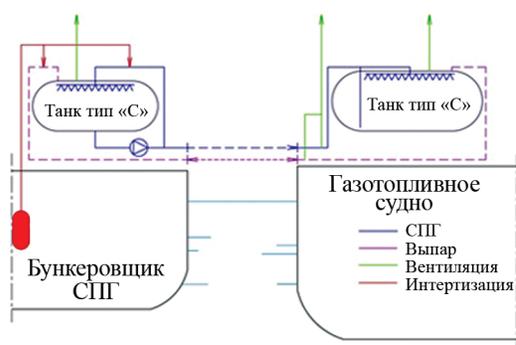


Схема бункеровки СПГ с танком типа «С» в составе топливной системы

Температура хранения СПГ от -130°C до -163°C при давлении от 0 до 8 бар

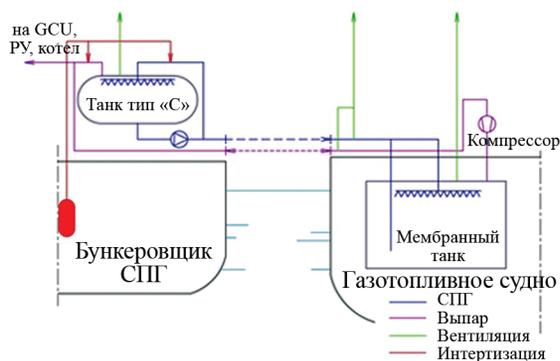


Схема бункеровки СПГ с мембранным танком в составе топливной системы

Температура хранения СПГ -163°C при давлении от 0 до 0,25 бар

стоит рассматривать как отдельную задачу, с которой бункеровщик СПГ должен справляться с помощью собственного набора технических средств.

Основные сценарии проведения бункеровки сжиженным природным газом

На данный момент известны три основных сценария выполнения бункеровки. Первый сценарий предусматривает бункеровку судна, топливный танк которого пуст или практически пуст, а его температура выше -60°C . Это тот случай, когда судно только построили или оно проходило длительный ремонт; возможны и другие причины, по которым температура внутри его топливной системы поднялась выше отметки в -60°C . В данном случае требуется произвести самый полный перечень операций (см. таблицу), в том числе инерттизацию танка азотом, замещение азота на природный газ, осушка системы, далее захлаживание с определенным темпом с принудительным отбором вновь образовавшегося выпара и налив СПГ.

Второй сценарий – бункеровка «теплого» танка, когда температура внутри него находится в диапазоне от -60 до -130°C , при этом передача бункера начинается с операции захлаживания и сравнения давлений между системами. Третий сценарий – самый благоприятный, когда танк судна «холодный» и сразу готов к приему СПГ с отбором паров. Более подробная схема последовательности проведения бункеровочных операций в рамках описанных сценариев представлена в таблице.

Из вышесказанного следует то, что грузовая система бункеровщика должна быть подготовлена к ситуациям, при которых придется принимать большое количество отпарного газа, оперативно его обрабатывать и утилизировать. Основные типы применяемых для хранения СПГ емкостей не рассчитаны на избыточное давление более 4–5 бар, поэтому выпар приходится отводить для поддержания приемлемого давления. Сбрасывать выпар в атмосферу опасно, т.к. образуется облако потенциально взрывоопасной газозвушной смеси. Выпар либо сжигают в факельных установках, либо используют в качестве топлива в судовой энергоустановке бункеровщика СПГ (как и на газовозах СПГ), сжимают с помощью компрессорного оборудования или повторно сжижают в имеющейся на борту реконденсационной установке (УПСГ).

Сжатие паров природного газа используется только в тех случаях, когда количество бункера незначительно, к тому же для сжимания на борту бун-

Схема последовательности проведения бункеровочных операций с СПГ

| № сценария | Проводимые операции | |
|------------|--------------------------|--|
| 1.1 | инертизация системы | |
| 1.2 | замещение инертного газа | |
| 1.3 | утилизация газовой смеси | |
| 1.4 | осушка системы | |
| 1.5 | 2.1 | захолаживание топливного резервуара |
| 1.6 | 2.2 | 3.1 поддержание давления внутри системы при помощи постоянного отбора паров метана |
| 1.7 | 2.3 | 3.2 заполнение танка СПГ |
| 1.8 | 2.4 | 3.3 транспортировка СПГ |
| 1.9 | 2.5 | 3.4 выгрузка СПГ на береговой терминал |

керовщика требуется установка комплекса специального оборудования – компрессор, CNG-баллоны и т.д. [17]. Данный способ утилизации испарившегося метана приводит к увеличению строительной стоимости бункеровщика, потере больших внутренних объемов, увеличению массы используемого на борту оборудования. К тому же при бункеровке «теплого» танка (сценарий № 1) придется сжать все его содержимое. Такой способ утилизации выпара, как сжатие, не может в полной мере отвечать всем требованиям, предъявляемым к бункеровщику СПГ, и снижает его эксплуатационные характеристики. В довершение к уже обозначенным проблемам появляется проблема утилизации сжатого газа. Сжигать выпар необходимо при превышении критического значения давления внутри системы хранения СПГ, однако этот способ не может применяться при выполнении бункеровки, т.к. влечет за собой большие потери бункерного топлива. Оптимальным вариантом является предусмотренная заранее в составе грузовой системы бункеровщика реконденсационная установка (установка повторного сжижения газа), сжижающая выпар и возвращающая его обратно в грузовой танк.

Для принятия правильного решения о составе грузовой системы бункеровщика СПГ и способе борьбы с выпаром следует объективно оценивать режимы его эксплуатации. Для определения состава

грузовой системы бункеровщика СПГ нужно иметь четкое понимание объема выпара, образующегося при выполнении бункеровки и сопутствующих технологических операций (захолаживание трубопроводов, инертизация систем и др.). В ходе проектирования бункеровщика СПГ пр. 50408 (рис. 8) был создан программный продукт, позволяющий оценивать объем выпара при проведении широкого спектра операций с бункерным СПГ, а также определять потребность в УПСГ, ее мощность и другие характеристики [16].

Программный комплекс под названием «МЕТАНК» реализован в программной среде AnyLogic. «МЕТАНК» учитывает физические процессы, протекающие при приеме, хранении и передаче СПГ, учитывает характеристики изоляции емкости, а также позволяет:

- находить критические значения давления для системы автоматического стравливания излишков перевозимого груза при эксплуатации СПГ-бункеровщиков в различных климатических условиях;
- определять наилучшее соотношение между емкостью и производительностью установки повторного сжижения газа по экономическому критерию;
- поддерживать проектные решения в плане нахождения баланса между альтернативными средствами эффективного охлаждения СПГ (теплоизоляция танков или использование УПСГ);
- моделировать процессы бункеровки судов, использующих СПГ в качестве топлива, с контуром обратной закачки и последующего сжижения сопутствующего выпара в емкости судна-бункеровщика.

Рис. 8. Внешний вид бункеровщика СПГ пр. 50408



Подбор параметров, состава оборудования и его производительности грузовой системы бункеровщика СПГ при помощи специальных программных комплексов позволяет:

- моделировать процесс бункеровки судов, использующих СПГ в качестве топлива;
- осуществлять подбор УПСГ на ранних этапах проектирования;
- находить баланс между альтернативными средствами эффективного охлаждения СПГ (теплоизоляция танков или использование УПСГ).

Углубленное понимание физических процессов, происходящих с СПГ в процессе перевозки, перегрузки либо хранения, позволяют в будущем повышать экономическую привлекательность данного вида топлива путем создания новых и совершенствования существующих методов и устройств передачи и хранения СПГ.

Вопросы оценки количества образующегося при хранении и бункеровке выпара, выбор и обоснование способа его утилизации, обоснование технических характеристик оборудования бункеровщика СПГ представляют собой первоочередные вопросы, стоящие перед проектантом данного типа судов.

Заключение

Россия имеет несколько крупных портов в акватории Балтийского моря. Как известно, этот оживленный участок международных морских перевозок входит в особую экологическую зону (ЕСА). На данный момент единственным известным топливом для ДВС, применение которого полностью удовлетворяет требованиям МАРПОЛ, является природный газ.

Российская промышленность имеет достаточный опыт создания элементов криогенных систем. Все элементы, необходимые для конверсии судовых энергетических установок на природный газ, изготавливаются и успешно применяются в других сферах промышленной деятельности. Некоторое оборудование уже имеет сертификат Российского морского регистра, а некоторое еще требует его получения.

На данный момент применение природного газа в качестве топлива на морском транспорте не ограничено ни техническими аспектами, ни нормативной документацией. Единственной преградой на пути применения СПГ на морском транспорте является отсутствие бункеровочной инфраструктуры и, как следствие, отсутствие у судовладельцев четкого понимания о стоимости бункерного СПГ.

Библиографический список

1. U.S. Energy Information Administration // Monthly Energy Review. October 2017. P. 4.
2. Regulation 14.3.1 of MARPOL Annex VI and regulation 1.11.2 of MARPOL Annex I (The Baltic Sea area).
3. Regulation 14.3.1 of MARPOL Annex VI and regulation 1.14.6 of MARPOL Annex V (The North Sea area).
4. Rules for classification of ships newbuildings special equipment and systems additional class. Part 6, chapter 13. Gas fuelled engine installations. January 2001.
5. *Костылев И.И., Коняев Д.В.* Бункеровка как фактор сдерживания применения газового топлива на судах // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2016. Вып. 5(39). С. 136.
6. ГОСТ Р 56835-2015. Газ природный сжиженный. Газ отпарной производства газа природного сжиженного. Определение компонентного состава методом газовой хроматографии.
7. *Шурьяк В.К., Гришкин В.В.* О конструктивном коэффициенте энергетической эффективности судов ледового плавания // Научно-технический сборник российского морского регистра судоходства. 2013. № 36. С. 191–212.
8. Wartsila Solutions for Marine and Oil & Gas Markets, 2013.
9. Gas Entec. Solutions for gas engineering // LNG Fuel Tank Application, 2017.
10. Доклад Газпрома. Совещание Минприроды России по реализации «Санкт-Петербургской инициативы» 21.11.2013.
11. Первая СПГ бункеровка методом «судно-к-судну» была проведена в Швеции // The Maritime telegraph. 16.09.2016. URL: <http://www.mtelegraph.com/lng-bunkering-ship-to-ship.html> (дата обращения: 30.03.2018).
12. *Реуцкий А.С.* Бункеровка СПГ. Особенности проектирования грузовой системы СПГ-бункеровщиков // 10 Всероссийский форум ассоциации бункеровщиков. 29–30 июня 2017 г., Санкт-Петербург, Россия.
13. International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code), 1993. IMO Ref: -104 E.

14. *Морейнис Ф.А., Барабанова М.А., Нахимовский И.А., Наумова М.Н.* Исследование основных характеристик судов для перевозки сжиженных природных газов // Труды ЦНИИМФ. 1976. Вып. 208. С. 83.
15. *Крестьянцев А.Б., Луцкевич А.М.* Нормативная база для создания бункеровочных баз и бункеровщиков СПГ, а также проведения операций по бункеровке СПГ газотопливных судов. Доклад в рамках презентации «МАРИНТЕК». СПб., 2014.
16. *Павловский В.А., Скуднев С.А., Топаж А.Г.* Динамическая модель транспортировки сжиженного природного газа в судовых танках // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015). 21–23 октября 2015. Москва, Россия.
17. *Демешко Г.Ф., Рюмин С.Н., Власьев С.Н., Крестьянцев А.Б.* Проектные исследования по созданию судов для транспортировки природного газа в сжатом состоянии // Oil Market. 2011. № 4. С. 15.

Сведения об авторах

Павловский Валерий Алексеевич, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Телефон: +7 (812) 415-40-72. E-mail: v.a.pavlovsky@gmail.com.

Реуцкий Александр Сергеевич, инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Телефон: +7 (812) 415-40-72. E-mail: reuckii_aleksandr@mail.ru.

Поступила / Received: 09.03.18
Принята в печать / Accepted: 03.05.18
© Коллектив авторов, 2018