

М.В. ВЛАСЬЕВ<sup>1</sup>, Г.Ф. ДЕМЕШКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

## ФОРМИРОВАНИЕ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕВОЗКИ СЖАТОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА (CNG-ТЕХНОЛОГИЯ)

Изложен алгоритм формирования транспортно-технологической системы перевозки природного газа с учетом свойств сжатого газа, технико-эксплуатационных характеристик CNG-танкеров, географо-климатических и технологических характеристик элементов обеспечивающей инфраструктуры. Разработанная логистическая модель доставки природного газа с помощью CNG-судов позволяет производить расчеты состава флота для любого географического региона мира с обеспечением заданного объема поставки газа.

**Ключевые слова:** CNG, сжатый (компримированный) природный газ, танкер, логистическая система, грузовые баллоны.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Власьев М.В., Демешко Г.Ф. Формирование морской транспортно-технологической системы перевозки сжатого природного газа (CNG-технология). Труды Крыловского государственного научного центра, 2018; Специальный выпуск 2: 160–168.

УДК 656.614.3.073.436

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-160-168

M.V. VLASYEV<sup>1</sup>, G.F. DEMESHKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Krylov State Research Centre, Moskovskoe shosse, 44, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> St. Petersburg State Marine Technical University, Lotsmanskaya str., 3, St. Petersburg, Russia

## DEVELOPMENT OF TRANSPORTATION & TECHNOLOGICAL SYSTEM FOR COMPRESSED NATURAL GAS (CNG) SHIPPING

This paper describes development algorithm for transportation & technological system taking into account the properties of compressed gas, technical and performance parameters of CNG tankers, geographic & climatic and technological parameters for elements of support infrastructure. The logistical model suggested in this study for CNG shipping can calculate fleet composition for any region of the world, ensuring required scope of CNG deliveries.

**Key words:** CNG, compressed natural gas, tanker, logistical system, cargo high-pressure vessel.

Author declares lack of the possible conflicts of interest.

For citations: Vlasyev M.V., Demeshko G.F. Development of transportation & technological system for compressed natural gas (CNG) shipping. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; Special issue 2: 160–168 (in Russian).

UDC 656.614.3.073.436

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-S-I-160-168

## Введение

Морская транспортировка природного газа в сжатом виде (CNG) на период перевозки предполагает доведение его давлений до значений 175–275 бар, когда его плотность возрастает до 300 раз. В этом состоянии газ перевозится на специализированных CNG-судах, оборудованных особыми емкостями высокого давления, чаще всего цилиндрической формы, изготавливаемыми преимущественно из стандартных стальных труб (из высокопрочных сталей, например, типа X-70, X-80, X-90). Производство подобных труб для нужд газотранспортных компаний широко освоено, в том числе и в России. Такие цилиндрические баллоны должны размещаться на CNG-судне вертикально или горизонтально.

Базовая концепция CNG-технологии предполагает сжатие природного газа, поступающего из подводящей магистрали или хранилища, на специальном компрессорном оборудовании перед загрузкой на специализированное судно. Ключевую роль здесь играют два основных параметра загружаемого на судно газа: его температура и давление, а также их производная – плотность, увеличение которой пропорционально величине избыточного давления по сравнению с естественными условиями.

## Природный газ как объект морской транспортировки

Природный газ представляет собой смесь множества газообразных компонентов, среди которых

от 50 до 99 % может приходиться на метан ( $\text{CH}_4$ ); свойства любого смешанного состава газа всегда заметно отличаются от свойств чистого метана. По существу, каждое газовое месторождение имеет свой собственный состав газовой смеси, и потому стандартов на состав газа устанавливать не принято.

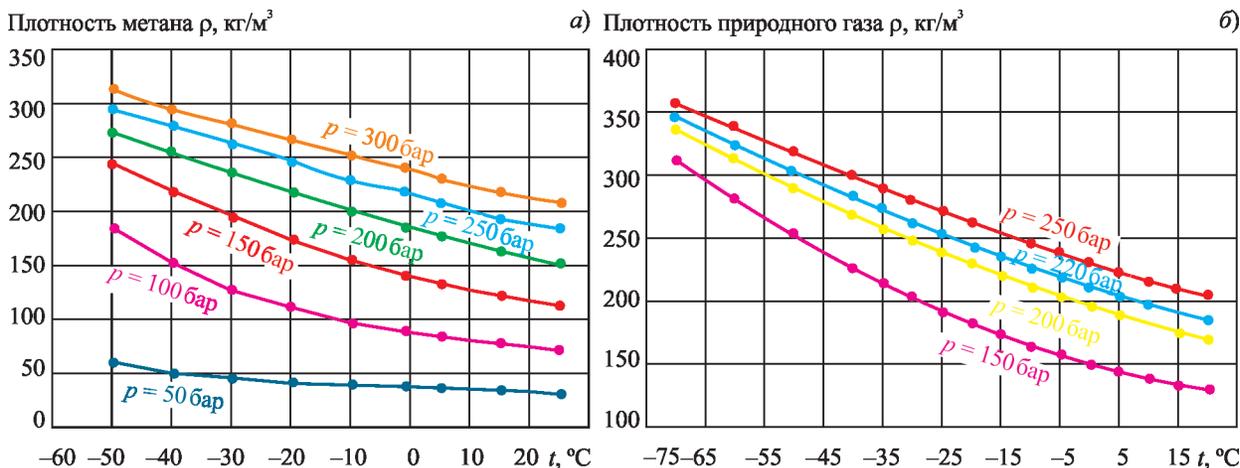
Как объект транспортировки природный газ обладает свойствами, подверженными значительным изменениям при варьировании его состава и основных термодинамических параметров – температуры и давления. С практической точки зрения это в первую очередь касается его плотности, от величины которой зависит количество газа, закачиваемого в грузовые емкости. На рис. 1 видно, как сильно для каждого фиксированного значения давления газа  $P$  повышается плотность газа при понижении его температуры. Действительно, снижая температуру газа при названном давлении от +15 до –15 °С, удается повысить его плотность более чем на 20 %, т.е. на столько увеличивается масса перевозимого газа на конкретном судне.

Плотность газа с определенным смешанным составом  $\rho$  при известном  $Z$ -факторе может быть определена с использованием выражения

$$\rho = PM/ZRT \quad (1)$$

где  $Z$ -фактор – коэффициент, который учитывает отклонения реального газа от уравнения состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона) и представляет собой функцию температуры и давления.

**Рис. 1.** Плотность чистого метана и природного газа смешанного состава «Северный поток» в зависимости от их температуры и давления [5]: а) зависимость плотности чистого метана ( $\text{CH}_4$ ) от давления и температуры, измеренной в °С; б) зависимость плотности природного газа от температуры и давлений для смешанного состава, который имеет место в газопроводе «Северный поток» ( $\text{CH}_4$  – 98,18 %)



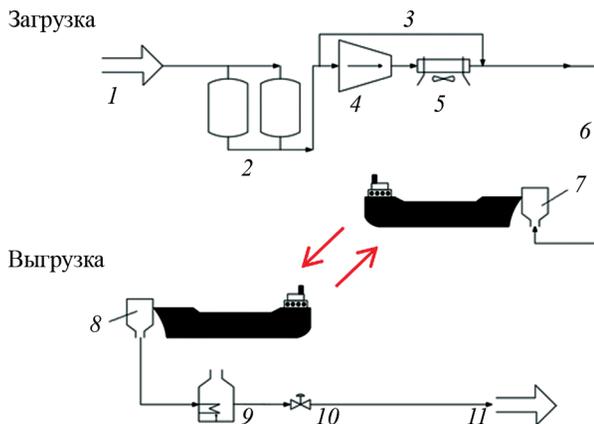
Сказанное дает основание утверждать, что повышение эффективности CNG-транспортировки достигается увеличением давления газа в баллонах и максимально возможным понижением его температуры. В то же время очевидно, что повышать давление в баллонах выше 250–275 бар нецелесообразно, т.к. это сопряжено с резким увеличением металлоемкости грузовой системы из-за роста необходимых толщин стенок баллонов, а доля газа, перевозимого при этом на CNG-судне в составе его полной массы, значительно снижается.

### Состав комплектующего оборудования береговой инфраструктуры, необходимой для реализации CNG-проектов

Особенностью CNG-технологии является отсутствие необходимости разработки принципиально новых обеспечивающих технических средств и технологий для осуществления такого рода морских транспортных операций. Необходимое оборудование грузовой системы CNG-судна и компонентов береговой инфраструктуры – сами баллоны, скрубберы, адсорберы, компрессоры, охладители и подогреватели газа, детандеры, трубопроводы высокого давления, запорные краны, соединительные муфты, вертлюги и т.п. – уже широко применяются в нефтегазовой промышленности, а потребности рассматриваемых здесь CNG-проектов потребуют лишь обоснования требований к ним в отношении их соответствия. Современные рейдовые системы причального и беспричального налива сжиженного газа и нефтепродуктов также могут быть адаптированы для CNG-технологий. На рис. 2 представлена схема систем загрузки/выгрузки сжатого газа для CNG-судна.

По системе магистральных трубопроводов газ поступает к специальному оборудованию для его подготовки к транспортировке (рис. 2). Технология морской транспортировки подаваемого к загрузочному терминалу природного газа предполагает после его очистки и осушки «дожатие» от давления в 50–100 бар, с каким он находится в подводящей газотранспортной сети, до давлений, принимаемых для газа в баллонах (175–250 бар), что может производиться на компрессорной станции – береговой или на борту CNG-судна.

Природный газ, поступающий из скважины, включает примеси, содержание которых в процессе его транспортировки и потребления жестко регламентируется и которые удаляются специальным обо-



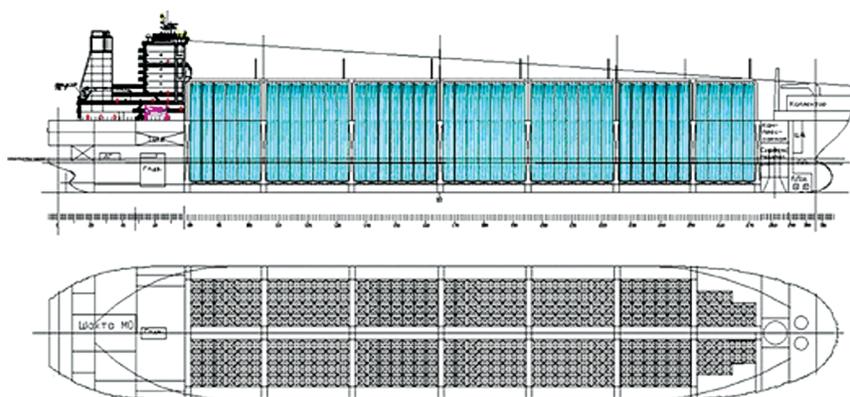
**Рис. 2.** Технологическая схема систем загрузки/выгрузки сжатого газа для CNG-судна [2, 5]:

1 – поступающий газовый поток (из скважин; от магистрального газопровода), 2 – система осушки (адсорбционная); 3 – трубопровод для низконапорного потока газа; 4 – компрессорное оборудование; 5 – установки воздушного охлаждения (теплообменники); 6 – грузовая магистраль, ведущая на CNG-судно; 7 – загрузочный буй / береговое причальное сооружение; 8 – разгрузочный буй / береговое причальное сооружение; 9 – станция понижения давления и подогрева газа; 10 – дросселирующий клапан; 11 – газ, поставляемый потребителю / в хранилище

рудованием еще перед подачей в газотранспортную магистраль. В первую очередь речь идет о песке, пыли, влаге, углекислоте, соединениях серы, тяжелых углеводородах, присутствие которых вызывает выход из строя арматуры газотранспортной сети и требует постоянного контроля и мер по очистке от них газа. В частности, наличие воды в газе при определенных соотношениях давления и температуры вызывает увеличение коррозии металлов, образование конденсата и водяных пробок, выпадение гидратов, которые представляют опасность и для наземного газового оборудования, и для судового, в том числе и для самих газотранспортных емкостей. Условие невыпадения газовых гидратов определяется температурой точки росы по влаге: подача газа при температуре более низкой, чем в данной точке, нежелательна, т.к. в этом случае и произойдет выпадение газовых гидратов. Механические примеси удаляют в специальных сепараторах, а влагу – в абсорберах или адсорберах.

Заполнение баллонов газом после его прохождения через компрессорную станцию согласно дрос-

**Рис. 3.** Схема размещения цилиндрических грузовых баллонов на CNG-судне при установке их в вертикальном положении [1, 5]



сельному эффекту начинается с резкого снижения температуры поступившего в баллон газа, но затем происходит значительное повышение его температуры, которая растет за счет увеличения энтальпии при теплообмене с баллоном. Это становится причиной и источником перегрева газа, в связи с чем снижается его плотность, что приводит к уменьшению количества газа, оказавшегося в баллоне. Повышение температуры газа в баллоне в итоге вызывает перепад температур, достигающий 50–60 °С. Такой перепад может быть снижен каскадным способом заполнения баллона, представляющим собой двух- или трехступенчатое повышение давления в баллоне до расчетного, хотя это, как очевидно, значительно усложняет и удорожает конструктивную и компоновочную схемы загрузки CNG-судна. Данный способ подачи газа в баллоны позволяет также снизить мощность, потребляемую дожимными компрессорами.

### Определение основных элементов и характеристик CNG-судов

Специфика груза, каким здесь является сжатый природный газ, перевозимый в грузовых баллонах, и способ их установки на CNG-судне определяют схему его общего расположения и архитектурно-конструктивный тип этих судов (рис. 3).

Каждый грузовой баллон снабжается индивидуальным клапаном, который, удерживая газ, позволяет изолировать его от других сосудов и дает возможность в целях безопасности стравливать его при превышении предельных значений рабочего давления в сосуде. Группа цилиндрических баллонов в количестве от 6 до 24, как правило, объединяется в модуль, именуемый кассетой, образуя как бы один резервуар сжатого природного газа, причем этот мо-

дуль имеет общий манифольд. Такое размещение баллонов особенно целесообразно при их вертикальной установке в трюмах судна.

Грузовые кассеты с баллонами могут быть расположены на судне в закрытых или открытых грузовых пространствах (трюмах). Для открытых трюмов особое внимание уделяется защите грузовых емкостей от коррозии и пожара, а также надежным способам фиксации утечек газа из грузовой системы. Над грузовым трюмом, если он делается закрытым, устанавливается легкий защитный кожух, герметизирующий трюм от заливания водой и других воздействий внешней среды, который с целью его облегчения целесообразно изготавливать из композитных материалов.

Анализ существующих концептуальных проектов CNG-судов позволил установить, что доля перевозимого газа от полного водоизмещения CNG-судна находится в диапазоне

$$\eta_{\text{гр}} = 0,09 - 0,16. \quad (2)$$

Главные размерения CNG-судов  $L$  и  $B$  должны быть кратны числу располагаемых в трюмах грузовых кассет с баллонами по длине и ширине судна. Из анализа концептуальных проектов CNG-судов получена зависимость их водоизмещения  $D$  от объема газа  $V$  в грузовых емкостях судна:

$$D = 6048 \cdot V + 13055,$$

где  $V$  – объем газа, перевозимого на судне (оцененный при 0 °С, 0,1 МПа), млн м<sup>3</sup>.

Для размерений CNG-судов характерны следующие соотношения, приемлемые в первом приближении:

$$\begin{aligned} L/B &= 6D10^{-6} + 6,282; \\ B/T &= 6D10^{-6} + 3,746; \\ H/T &= D10^{-6} + 2,114. \end{aligned} \quad (3)$$

Далее, путем суммирования составляющих нагрузки, определяется масса CNG-судна порожнем (в виде совокупности укрупненных разделов) и величина дедвейта судна. По этим величинам уточняются полученные в первом приближении значения водоизмещения судна и его главные размерения. Определив затем коэффициент общей полноты  $\delta$ , можно вычислить осадку судна  $T$  и отношения  $V/T$ ,  $H/T$ , удовлетворяя требованиям остойчивости судна и Правил о грузовой марке. Возможна необходимость корректировки главных размерений судна.

Область приемлемых решений ограничивается условиями транспортировки газа как груза, требованиями заказчика, классификационных обществ и т.п., а также стремлением получить удовлетворительные мореходные качества – остойчивость, ходкость, качку и т.п.

### Алгоритм транспортной модели доставки газа с помощью CNG-судов

Транспортировка конкретных объемов природного газа с максимальной экономической эффективностью на заданном направлении с использованием CNG-судов требует определения состава флота CNG-судов (количества судов с соответствующей вместимостью и скоростью хода). Транспортная модель разрабатывается с учетом транспортно-технологических (годовой объем газа, характеристики береговой инфраструктуры, время нахождения судна в рейсе и в портах) и географо-климатических требований и характеристик судоходной линии (протяженность линии и метеорологические условия в регионе). Транспортная модель доставки газа с помощью CNG-судов может быть представлена в виде блок-схемы, приведенной на рис. 4.

В блоке 1 производится ввод исходных данных, включающих:  $Q$  – годовой объем транспортировки природного газа на заданном направлении;  $n_{пр}$  – количество причалов, обслуживающих данную линию;  $Pr_i$  – пропускная способность в портах на одном причале в сутки, млн м<sup>3</sup>/сут.;  $L_{эксп}$  – протяженность судоходной линии, мор. миль;  $L_{пк}$  – длина подходного канала, мор. миль;  $T_{шт}$  – потери эксплуатационного времени из-за штормовых условий, сут.;  $k_{потер}$  – коэффициент, учитывающий потери скорости хода судна, с учетом ветро-волнового режима в районе плавания;  $T_{рем}$  – продолжительность докового ремонта судна, сут.;  $T_{пр}$  – время, затрачиваемое на негрузовые операции.

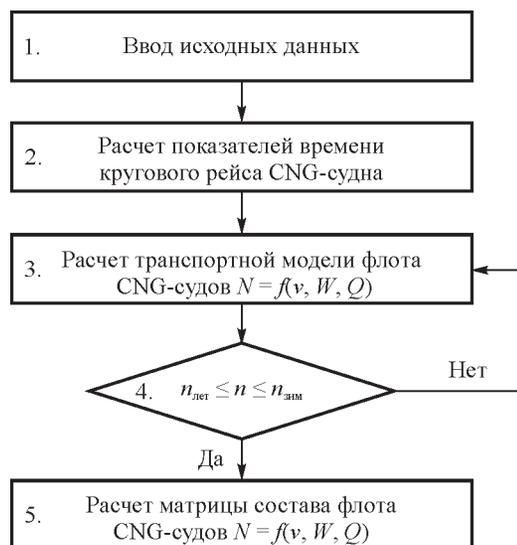


Рис. 4. Блок-схема формирования транспортной модели доставки газа с помощью CNG-судов

В блоке 2 производится расчет продолжительности кругового рейса CNG-судна. Время кругового рейса  $T_{кр.рейс}$  разбивается на интервалы, каждый из которых описывает определенный этап функционирования транспортной системы доставки. Продолжительность кругового рейса  $T_{кр.рейс}$  может быть представлена формулой

$$T_{кр.рейс} = T_{ход} + T_{пк} + T_{ст} + T_{пр}, \quad (4)$$

где  $T_{ход}$  – ходовое время в составе кругового рейса в открытом море, ч;  $T_{пк}$  – время плавания по подходным каналам, ч.;  $T_{ст}$  – время стоянки судна в портах под погрузкой и выгрузкой, ч.;  $T_{пр}$  – время, затрачиваемое на негрузовые операции, ч.

Ходовое время кругового рейса с учетом потерь скорости, обусловленной ветро-волновым режимом в районе эксплуатации судна:

$$T_{ход} = \frac{L_{эксп}}{v_{эксп}} + \frac{L_{эксп}}{v_{бал}}, \quad (5)$$

где  $L_{эксп}$  – длина судоходной линии, на которой эксплуатируется судно в открытом море между портами, мор. миль;  $v_{эксп}$  – эксплуатационная скорость CNG-судна во время грузового перехода, уз;  $v_{бал}$  – скорость CNG-судна во время балластного перехода, уз.

В случае если на маршруте транспортировки газа имеются участки, покрытые ледовыми образованиями либо дрейфующими льдами, формула (5)

приобретает особый вид для летнего и зимнего периодов. Для зимнего периода маршрут следования разделяется на участки с ледовыми образованиями и без них, скорость движения судна в ледовых условиях принимается равной  $\sim 2$  уз.

Время плавания судна по подходным каналам  $v_{пк}$  за круговой рейс:

$$T_{пк} = \frac{L_{пк1}}{v_{пк1}} + \frac{L_{пк2}}{v_{пк2}}, \quad (6)$$

где  $L_{пк1}$ ,  $L_{пк2}$  – длины подходных каналов в портах отправления и доставки соответственно, мор. миль;  $v_{пк1}$ ,  $v_{пк2}$  – допустимые скорости судна по подходным каналам в портах отправления и доставки соответственно, уз.

Время стоянки судна в портах  $T_{ст}$  за круговой рейс складывается из времени грузовых операций при погрузке  $t_{пр}$  и разгрузке  $t_{рз}$ :

$$T_{ст} = t_{пр} + t_{рз}. \quad (7)$$

В таком случае продолжительность грузовых операций можно представить выражением

$$T_{ст} = t_{пр} + t_{рз} = \frac{W}{Pr_1} + \frac{W}{Pr_2}, \quad (8)$$

где  $W_n$  – вместимость  $n$ -го CNG-судна по газу, млн  $m^3$ ;  $Pr_1$  и  $Pr_2$  – общая производительность берегового грузового оборудования на причале в порту погрузки и порту выгрузки соответственно, млн  $m^3/сут$ .

Время пребывания судна в порту погрузки  $T_{пр}$  под негрузовыми операциями включает в себя время, затрачиваемое на выполнение следующих операций: маневрирование судна в акватории порта, оформление судовых документов, бункеровка судна, определение количества принятого на судно груза, осмотр грузового оборудования и грузовых емкостей, время охлаждения емкостей в процессе их загрузки.

В блоке 3 производится реализация транспортной модели – части функционально-стоимостного анализа работы флота CNG-судов. Функциональными элементами транспортной модели являются следующие:  $n$  – количество CNG-судов, работающих на линии;  $W_n$  – вместимость флота  $n$  CNG-судов;  $v_n$  – скорость хода судов.

CNG-суда в течение года выполняют транспортировку количества газа  $Q$  на заданном направлении транспортировки  $i$ :

$$F(n, W, v) = Q_i. \quad (9)$$

Необходимое количество CNG-судов для транспортировки годового количества газа  $Q$ :

$$n = Q_i / P_{суд}, \quad (10)$$

где  $P_{суд}$  – годовая провозная способность одного CNG-судна, млн  $m^3$ .

Годовая провозная способность одного CNG-судна:

$$P_{суд} = n_{рейс} \cdot W, \quad (11)$$

где  $n_{рейс}$  – количество круговых рейсов, которое совершает одно CNG-судно за год:

$$n_{рейс}^{год} = \frac{T_{эксп}}{T_{кр.рейс}}. \quad (12)$$

Годовой эксплуатационный период судна  $T_{эксп}$ , сут.:

$$T_{эксп} = 365 - T_{рем} - T_{шт}, \quad (13)$$

где  $T_{рем}$  – суммарная продолжительность ежегодного текущего ремонта, распределенная на один год (продолжительность докового ремонта судна принята равной 20 сут.);  $T_{шт}$  – потери эксплуатационного времени из-за ограничения плавания по штормовым условиям и заходами в порты.

Количество CNG-судов на линии  $n$  можно определить, используя представленные выше формулы:

$$n = \frac{Q_i}{n_{рейс}^{год} \cdot W_n}. \quad (14)$$

В блоке 4 производится проверка количества CNG-судов на линии с учетом возникновения обстоятельств, которые могут привести к нарушению расписания движения судов на линии. Если это условие не выполняется, то производится пересчет количества судов на линии в блоке 3.

В первую очередь к обстоятельствам, которые ведут к сбою графика движения, относится, например, неравномерность работы объектов причальной инфраструктуры, что заставляет суда ожидать очереди на операции по погрузке либо выгрузке. Вследствие этого в модель вводится условие, которое позволит ограничить максимально допустимое количество CNG-судов на линии плетн в летний период навигации и пзим в зимний период навигации.

Схема работы транспортной линии, обслуживаемой  $n$  CNG-судами, представлена на рис. 5.

Рассмотрим, например, время кругового рейса «Судно 1», которое условно может быть разделено на ряд периодов: первый – время погрузки газа на CNG-судно, второй – время транспортировки, далее время выгрузки газа с CNG-судна и время балластного перехода (рис. 5). Основное условие надежной работы судоходной линии CNG-судов без непредвиденных простоев и ожиданий в портах погрузки состоит в том, чтобы время кругового рейса каждого из

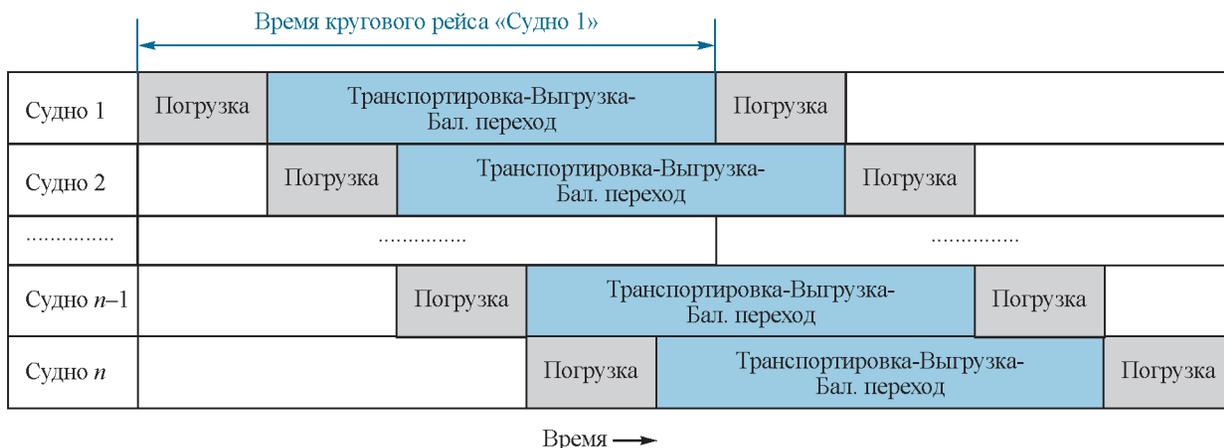


Рис. 5. Схема работы транспортной линии, обслуживаемой CNG-судами

последующих судов на линии, таких как «Судно 2», «Судно 3», ... «Судно n», сдвигалось, как показано на рис. 5. Данное условие работы линии может быть записано так:

$$(n-1)t_{пр} \geq T_{ход} + T_{пр} + T_{пк} + T_{рз}, \tag{15}$$

где  $t_{пр}$  – время погрузки судна.

Таким образом, с учетом этого факта количество CNG-судов будет следующим:

- для летней навигации

$$n_{лет} \geq \frac{\left( \frac{L_{экспл}}{v_{экспл}} + \frac{L_{экспл}}{v_{бал}} \right)}{t_{пр}} + \frac{T_{пр} + \left( \frac{L_{пк1}}{v_{пк1}} + \frac{L_{пк2}}{v_{пк2}} \right) + \frac{W}{Pr_2}}{t_{пр}} + 1; \tag{16}$$

- для зимней навигации

$$n_{зим} \geq \frac{\left( \frac{L_{б.л}}{v_{экспл}} + \frac{L_{б.л}}{v_{бал}} + 2 \times \frac{L_{л}}{v_{л}} \right)}{t_{пр}} + \frac{T_{пр} + \left( \frac{L_{пк1}}{v_{пк1}} + \frac{L_{пк2}}{v_{пк2}} \right) + \frac{W}{Pr_2}}{t_{пр}} + 1. \tag{17}$$

В блоке 5 строится матрица состава флота в зависимости от грузоподъемности и скорости  $n = f(W_p, v_i)$  для обслуживания заданного годового объема газа  $Q$

в заданный период навигации, с учетом ограничений по количеству CNG-судов на линии.

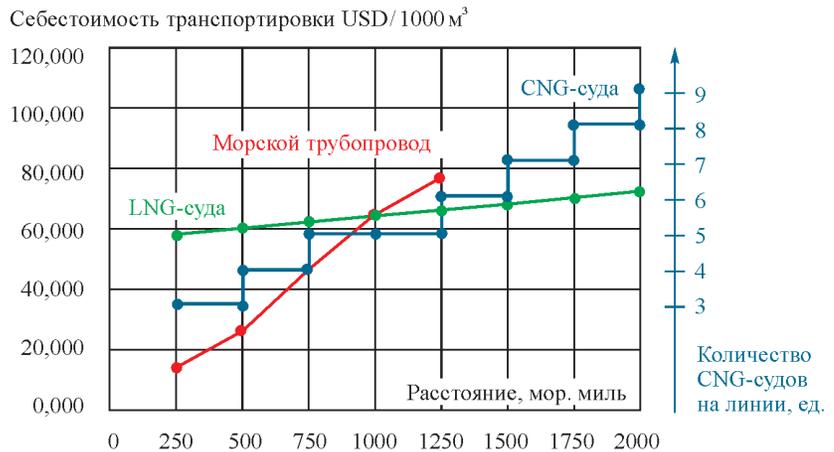
Как показано в работах [1, 3], посвященных исследованию особенностей доставки природного газа с помощью CNG-судов, эти транспортные системы конкурентоспособны по отношению к LNG-танкерам на линиях малой протяженности (до 2000 мор. миль) и при небольших объемах транспортировки (3–5 млрд м<sup>3</sup> в год).

Выбор оптимального состава флота CNG-судов напрямую связан с критерием, по которому будут оптимизироваться размерения будущих судов. Для выбора оптимального состава флота CNG-судов используется широко применяемый в газовой индустрии экономический критерий – себестоимость транспортировки 1000 м<sup>3</sup> природного газа, в данном случае на CNG-судне.

В работах [1, 3] выполнена экономическая оценка себестоимости транспортировки природного газа в сжатом состоянии на CNG-судах с годовым грузопотоком 5 млрд м<sup>3</sup>, с максимальным расстоянием транспортировки 2000 мор. миль, для судов вместимостью  $W = 20$  млн м<sup>3</sup> при расчетной скорости хода  $v = 15$  уз (рис. 6). Себестоимость транспортировки природного газа на CNG-судах сравнивалась с себестоимостью альтернативных способов доставки газа, а именно по морскому трубопроводу и LNG-танкерами. На графике рис. 6 указаны значения себестоимости перевозки такого же объема газа рассматриваемыми видами транспорта.

Результаты расчета экономической эффективности свидетельствуют о целесообразности примене-

**Рис. 6.** Динамика изменения себестоимости транспортировки природного газа различными видами транспорта.  
Q = 5 млрд м<sup>3</sup>,  
W = 20 млн м<sup>3</sup> [1, 3]



ния CNG-судов как транспортных средств перевозки природного газа. Анализ результатов экономической эффективности перевозки газа на CNG-судах позволил сделать вывод о том, что наименьшую себестоимость транспортировки будет иметь флот CNG с минимальным количеством судов на линии. Однако такие суда имеют предпочтительный диапазон их использования. Данный вид транспортировки желательно применять на судоходных линиях с протяженностью, не превышающей 1250 мор. миль (рис. 6). Дальнейший рост расстояния требует увеличения количества судов на линии, что, в свою очередь, ведет к удорожанию себестоимости транспортировки газа с помощью CNG-судов, которые в таком случае теряют свое конкурентное преимущество по сравнению с альтернативными видами транспорта природного газа – морскими трубопроводами и LNG-танкерами.

В 2015 г. на верфи Jiangsu Hantong Shipyard (Китай) по заказу государственной энергетической компании Индонезии Perusahaan Listrik Negara началось

строительство первого в мире CNG-судна Jayanti Baruna (рис. 7). В мае 2016 г. оно было спущено на воду и на нем начались достроечные работы и наладка грузовых баллонов и систем [7]. Судно предназначено для транспортировки сжатого природного газа с завода на месторождении к индонезийскому острову, где газ будет использоваться в качестве топлива для электростанции. Грузовместимость судна составляет 0,7 млн м<sup>3</sup>. Сжатый газ перевозится в вертикально установленных грузовых баллонах в количестве 832 шт. Судно оснащено двухтопливным двигателем фирмы Wartsila, эксплуатационная скорость хода составляет 13,9 уз.

## Заключение

Описанный алгоритм формирования морской транспортно-технологической системы перевозки сжатого природного газа дает представление об определении основных элементов и характеристик CNG-судов с вертикально установленными грузовыми баллонами на ранних стадиях проектирования, позволяет учесть влияние размещаемых баллонов на элементы судна, а также рассчитать состав флота CNG-судов, обеспечивающего реализацию морской транспортировки заданного количества газа, с учетом характеристик береговой инфраструктуры и климатических особенностей рассматриваемой судоходной линии.

В настоящее время существуют реальные предпосылки к созданию в ближайшем будущем нового направления судов и направления индустрии для транспортировки природного газа. Одним из лидеров в этой сфере может стать Россия, которая имеет достаточный научно-промышленный потенциал для освоения новой технологии транспорта природного газа; отечественные же судостроительные заводы об-

**Рис. 7.** CNG-танкер Jayanti Baruna [7]



ладают достаточным опытом и производственными возможностями для строительства конкурентоспособных CNG-судов.

### Библиографический список

1. Демешко Г.Ф., Власьев М.В. Определение размеров и характеристик CNG-судов с вертикальным расположением грузовых кассет // Известия КГТУ. 2016. № 43. С. 229–238.
2. 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.
3. Власьев М.В. Алгоритм формирования транспортной модели морской доставки газа с использованием CNG-судов // Труды Крыловского государственного научного центра. 2014. Вып. 72(356). С. 180–184.
4. Демешко Г.Ф., Власьев М.В., Павловский В.А., Чистов А.Л. Определение параметров процесса наполнения грузовых емкостей природным газом на CNG-судне // Труды Крыловского государственного научного центра. 2013. Вып. 69(353). С. 35–47.
5. Демешко Г.Ф., Власьев М.В. Анализ CNG-технологии морской транспортировки природного газа // Труды Крыловского государственного научного центра. 2012. Вып. 66(350). С. 44–50.
6. Павловский В.А., Алексеев Ю.В., Власьев М.В. Термодинамика газового потока при заполнении и опорожнении сосудов // Морской вестник (Труды СПбГМТУ (ЛКИ)). 2012. Вып. 1(124). С. 17–18.
7. Новоселов А.Л., Новоселов И.А., Авраменко А.Л. Эколого-экономическая оценка морской транспортировки сжатого газа. М.: Изд-во НИИПЭ, 2017.

### Сведения об авторах

Власьев Максим Валерьевич, к.т.н., старший научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Телефон: +7 (812) 415-48-14. E-mail: valmax2006@yandex.ru.

Демешко Геннадий Федорович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой проектирования судов ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190008, Россия, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. Телефон: +7 (812) 714-28-74. E-mail: morcenter@mail.ru.

Поступила / Received: 06.03.18

Принята в печать / Accepted: 03.05.18

© Коллектив авторов, 2018