

РОССИЙСКИЙ МОРСКОЙ



РЕГИСТР СУДОХОДСТВА

НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ СБОРНИК

ВЫПУСК

30

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2007

Редакционная коллегия Российского морского регистра судоходства:

Н.А. Решетов, (председатель) В.И. Евенко, В.П. Карпенко, С.С. Коцкий (заместители председателя), А.Е. Сазонов, С.А. Быстров, А.А. Захаров, С.В. Кириллов, М.Ф. Ковзова, И.Н. Копилец, М.Н. Кринская, М.А. Кутейников, В.Б. Мачульский, А.С. Михайлов, Е.Б. Мюллер, А.А. Сергеев, В.А. Хоботов, В.Г. Чернов.

А.Н. Блинков, А.А. Власов, А.В. Лицис, В.К. Шурняк

CNG – НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗА: СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ПРОБЛЕМЫ

1. Преимущества транспортировки газа на судах CNG

Мировой спрос на природный газ стабильно растет. Одновременно происходит истощение запасов природного газа в традиционных регионах добычи, что предопределяет стабильно высокий спрос на введение в коммерческий оборот новых месторождений. Разведанные запасы природного газа распределены по территории планеты весьма неравномерно. Основная их часть расположена на удалении свыше 500 – 1000 морских миль от основных рынков-импортеров природного газа. До 50 % запасов мирового природного газа приходится на малые и средние месторождения, расположенные на континентальном шельфе и в прибрежной зоне.

Используемые в настоящее время технологии транспортировки природного газа по морским трубопроводам или в сжиженном виде на судах LNG (Liquefied Natural Gas) экономически нерациональны для ввода значительной доли таких месторождений в коммерческий оборот. Это стимулирует поиск экономически эффективных технологий транспортировки природного газа на основные рынки.

Технология морской транспортировки сжатого природного газа на судах-газовозах специальной постройки – судах CNG (Compressed Natural Gas – CNG) – это новая перспективная технология транспорта газа, которая в обозримой перспективе может стать экономически эффективной альтернативой традиционным технологиям транспортировки газа по морским трубопроводам и в сжиженном состоянии на судах-газовозах LNG. Это предопределяет повсеместный интерес к применению новой технологии транспортировки сжатого природного газа на судах CNG со стороны международных энергетических и судоходных компаний.

Особенность новой технологии заключается в том, что природный газ можно загружать на суда CNG непосредственно с месторождения, а разгружать – непосредственно в потребительскую сеть (рис. 1).

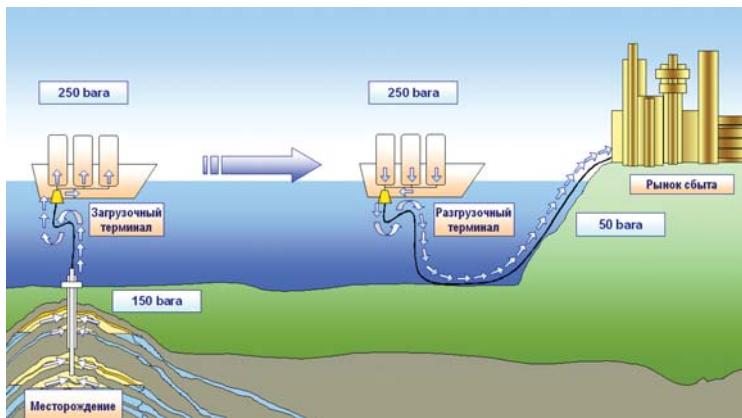


Рис. 1
Схема применения технологии CNG

Это исключает необходимость значительных капитальных вложений в строительство морских трубопроводов или заводов по сжижению газа для доставки его на рынок на судах LNG. Основной объект капиталовложений в новой технологии – сами суда CNG.

Наиболее привлекательна технология CNG для ввода в коммерческий оборот морских (оффшорных) месторождений природного газа. Одной из предпосылок для реализации проектов транспорта сжатого природного газа непосредственно с шельфовых месторождений на судах CNG является наличие освоенных технологий обустройства морских месторождений на глубинах до 2500 м в различных регионах мира.

Другая предпосылка – широкое применение в мировой практике технологий беспричальной загрузки углеводородного сырья на суда с оффшорных терминалов. Примером могут быть подводные загрузочные/разгрузочные комплексы типа STL (Submerged Turret

Loading) компании Advanced Production and Loading AS (APL), Норвегия.

Это означает, что действительно новым элементом технологии морской транспортировки сжатого природного газа с морских месторождений являются сами суда CNG.

Международными и национальными организациями, компаниями-разработчиками технологии CNG и судовладельческими компаниями к настоящему времени выполнен большой объем технико-экономических исследований целесообразных областей применения технологии CNG. Результаты этих исследований свидетельствуют об экономической предпочтительности применения технологии CNG для транспортировки природного газа в различных регионах мира по отношению к традиционным технологиям транспорта газа по морским трубопроводам или перевозки его в сжиженном виде на судах LNG при объемах транспортировки до 4–5 млрд. м³ природного газа в год на дистанциях от 250–300 морских миль до 2500–3000 морских миль (рис. 2).

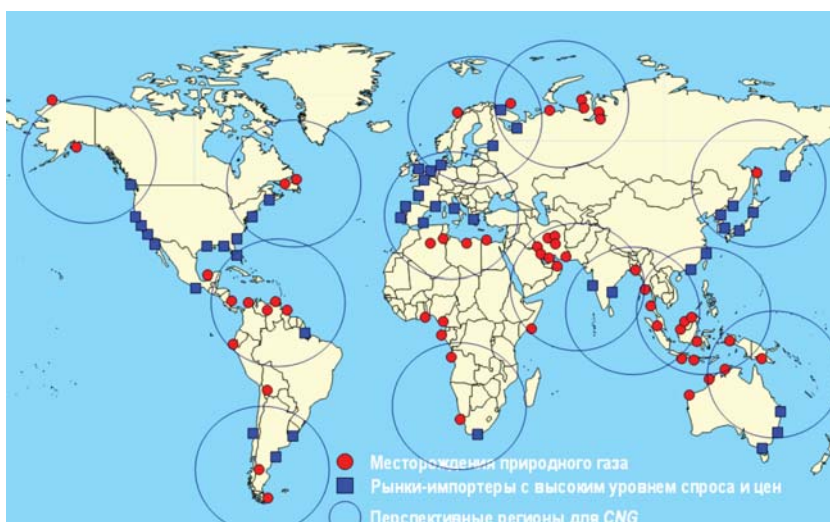


Рис. 2

Возможные регионы экономически эффективного применения технологии морской транспортировки сжатого природного газа на судах CNG

В настоящее время в разных стадиях разработки находится около 20 международных проектов морской транспортировки сжатого природного газа на судах CNG.

При успешном продвижении анонсированных проектов первые коммерческие перевозки природного газа на судах CNG могут начаться в 2010–2011 гг.

Анализ динамики роста числа международных проектов применения технологии CNG в различных регионах мира также свидетельствует о росте интереса к новой технологии.

Особенность современного этапа в развитии технологии CNG состоит в переходе компаний, заинтересованных в реализации проектов морской транспортировки сжатого природного газа, от концептуального анализа к детальной конструкторской проработке основных элементов транспортной цепи и формированию международных консорциумов для практической реализации CNG проектов в различных регионах мира.

Свидетельством высокой степени готовности технологии CNG к практической реализации может служить следующий факт: когда в марте 2006 г. крупнейшая энергетическая компания Индии GAIL Ltd объявила о заинтересованности в использовании судов CNG для транспорта природного газа с месторождения в Бирме, сразу восемь международных консорциумов и отдельных компаний заявили о своем намерении участвовать в тендере. В том числе:

Консорциум EnerSea Transport LLC (США), Mitsui и K-Line (Япония) и ряда других компаний;

Консорциум TransCanada (Канада) и ряда других компаний;

Компания Knutsen OAS Shipping AS (Норвегия);

Malaysia International Shipping Corporation (MISC) (Малайзия);

Forbes Bumi Armada Ltd. (Малайзия) совместно с Trans Ocean Gas Inc. и BMT Fleet Technology Ltd. (Канада), Wilhemsen Marine consultants (Норвегия) и ряд других компаний;

Ardeشير B. Cursetjee & Sons Ltd, Mumbai;

Marubeni Corporation (Япония) совместно с Sea NG Management Corporation (Канада);

Exmar Marine NV (Бельгия).

Каждый из потенциальных участников будущего тендера имеет в активе, как минимум, концептуальные проекты судов CNG, полу-

чившие одобрение (Approval in Principal) классификационных обществ DNV, ABS или Lloyds Register.

В 2006 г. компания Sea NG стала первой из числа разработчиков проектов судов CNG, получившей от ABS полное одобрение проекта (Approval for Construction). Судну присвоен класс «A1 CNG Carrier». Это позволяет компании приступить к строительству судов CNG.

Основные особенности концептуальных подходов разработчиков систем морской транспортировки сжатого природного газа к выбору технических решений по элементам системы проиллюстрированы рис. 3.



Рис. 3
Концепции судов CNG

Разрабатываемые концепции морской транспортировки природного газа на судах CNG различаются подходами к решению задачи выбора оптимального конструктивного типа емкостей для транспортировки сжатого газа и параметров газа при транспортировке (табл. 1).

Основные параметры разрабатываемых концепций судов LNG

Характеристика	Компания-разработчик (концепция)						
	EnerSea (VOTRANS)	TransCanada (GTM)	Knutson (PNG)	SETech	Trans Ocean Gas (CPFR)	Sea NG (Coselle)	
1	2	3	4	5	6	7	
Тип емкостей для транспортировки сжатого газа	Цилиндрические сосуды высокого давления	Цилиндрические сосуды высокого давления	Цилиндрические сосуды высокого давления	Цилиндрические сосуды высокого давления	Цилиндрические сосуды высокого давления	Труба, навитая на катушку (карусель)	
Схема размещения судов на судне	Вертикально	Горизонтально	Вертикально	Горизонтально	Вертикально	Вертикально в катушках (каруселях)	
Материал	Стальные трубы большого диаметра	Стальные трубы большого диаметра с композитным усилением	Стальные трубы большого диаметра	Стальные трубы большого диаметра	Пластиковые трубы с усилением из фибргласса	Стальные трубы	
Диаметр, мм	От 914,4 до 1066,8 (36"-42")	1066,8 (42")	1066,8 (42")	1066,8 или 1219,2 (42"-48")	1066,8 (42")	168,3 (6,625")	
Длина	24,4 м; 36,6 м	24,4 м;	18,0 м; 38,0 м	220 м	12,0 м	16 км (11 миль)	
Давление газа в емкостях, МПа	До 15	20-25	25	25	10-25	25	

Характеристика	Компания-разработчик (концепция)					
	EnerSea (VOTRANS)	TransCanada (GTM)	Knutsen (PNG)	CETech	Trans Ocean Gas (CPFR)	Sea NG (Coselle)
1	2	3	4	5	6	7
Температура газа в емкостях, °C	От -20 до -29	нормальная	нормальная	нормальная	От -5 до -40	10
Состояние разработки проекта	Approval in Principal	Approval in Principal	Approval in Principal	Approval in Principal	Approval in Principal	Approval for Construction

Для сопоставительных оценок грузовых емкостей различных типов и выбора наиболее перспективного варианта могут быть применены критерии массового совершенства конструкций, широко используемые в различных областях техники.

2. Об эффективности перевозки сжатых газов на судах CNG

Эффективность перевозки любого груза на судах зависит прежде всего от способа его перевозки и обработки в пунктах отправки и назначения. В качестве критерия экономической эффективности чаще всего используют срок окупаемости постройки судна, но для оценки экономической эффективности требуется довольно много данных, которые в условиях рыночных отношений постоянно меняются, например стоимость перевозимого груза, фрахтовые ставки, стоимость металла и постройки судов, величины налогообложения. Все эти показатели меняются не только во времени, но и в зависимости от региона. Кроме того, поскольку в настоящее время нет перевозок сжатых газов, то и нет рынка фрахтовых ставок для этого вида груза, а следовательно корректные оценки экономической эффективности таких перевозок затруднены.

Для неэкономической оценки эффективности перевозки сжатого газа необходимы другие критерии. Предлагаются следующие критерии оценки эффективности перевозки сжатых газов:

отношение массы груза $M_{\text{газа}}$ в грузовой емкости к массе пустой грузовой емкости $M_{\text{сосуда}}$ (назовем его G);

отношение массы груза в грузовой емкости к массе заполненной грузовой емкости (назовем его η);

отношение массы груза, перевозимого на судне (используя конкретный тип емкости) к водоизмещению судна (назовем его W).

Далее предлагается исследование критерия G для цилиндрической емкости со сферическими днищами:

$$G = M_{\text{ГАЗА}} / M_{\text{СОСУДА}} \quad (1)$$

Используя формулу Менделеева-Клаперона для идеального газа $PV = M / \mu RT$, получим:

$$M_{\text{ГАЗА}} = PV\mu / RT, \quad (2)$$

где V – внутренний объем грузовой емкости;
 P – рабочее давление в грузовой емкости при транспортировке;
 T – абсолютная температура при транспортировке;
 μ – молярная масса перевозимого газа;
 R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,31441 \cdot 10^3$ Дж/кмоль·град.

Необходимо отметить, что все выше описанные зависимости основаны на уравнении идеального газа. Свойства метана отличаются от идеального газа, что становится заметно при низких температурах и высоких давлениях, так как критическая точка метана 190 °К. Реальное повышение эффективности за счет понижения температуры будет несколько больше, если учесть этот фактор.

Для реального газа необходимо учитывать его сжимаемость в зависимости от температуры и давления, которую можно найти в [1, 2] в виде таблиц. Сжимаемость газа – отношение pV для метана по отношению к pV при 0 °С и 760 мм рт. ст. – назовем $S(p, t)$. Для удобства пользования табличные данные из [1, 2] были переведены в систему СИ и представлены в виде семейства графиков. График функции сжимаемости метана для различных температур показан на рис. 4. При этом выражение (2) для массы газа в грузовой емкости примет следующий вид:

$$M_{\text{ГАЗА}} = PV\mu / RS(p, t) T_0, \quad (2-1)$$

где $T_0 = 273$ °К.

Внутренний объем грузовой емкости V определим как сумму объема цилиндрической части и сферических днищ:

$$V = L \frac{\pi D^2}{4} + \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2} \right)^3, \quad (3)$$

где L – длина цилиндрической части грузовой емкости;
 D – внутренний диаметр грузовой емкости.

Массу грузовой емкости определим как объем грузовой емкости, умноженный на плотность материала ρ . При расчете объема

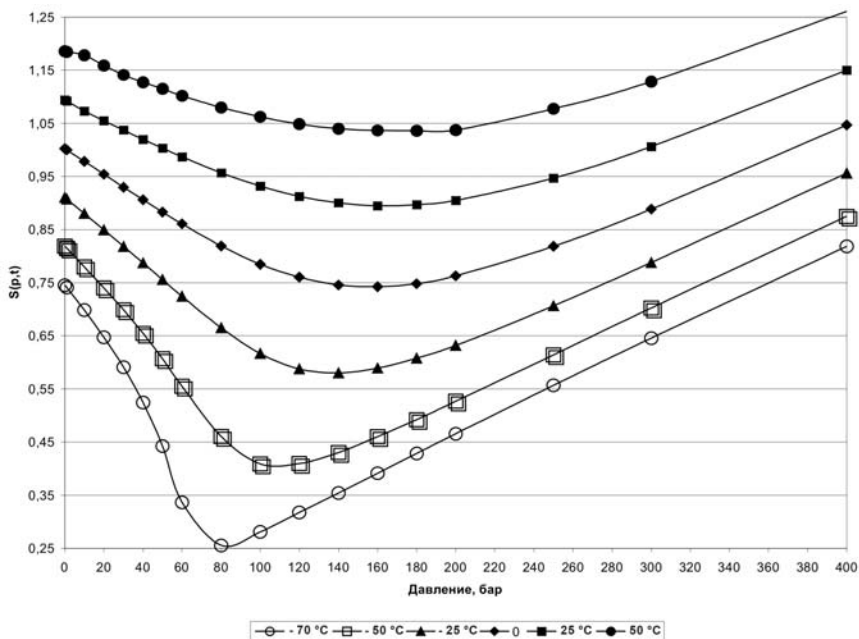


Рис. 4
 Значение функции сжимаемости метана $S(p,t)$ – отношение pV при различных температурах и давлениях по отношению к pV при 0 °C и 760 мм рт. ст.

грузовой емкости определим его как площадь поверхности, умноженную на толщину стенки t :

$$M_{\text{сосуда}} = (L\pi D + \pi D^2) t \rho.$$

Необходимую толщину стенки цилиндрической части емкости определим по известной из сопротивления материалов котловой формуле, в основе которой лежит третья теория прочности, используемая в расчетах на прочность Ростехнадзором, Российским морским регистром судоходства и другими классификационными обществами:

$$t = \frac{PD_{cp}}{2[\sigma]\varphi} + c, \quad (4)$$

где D_{cp} – средний диаметр;
 c – прибавка на коррозию;
 $[\sigma]$ – допускаемые напряжения;
 φ – коэффициент прочности.

Средний диаметр $D_o = D + t = D(1 + t/D) = DA$, где A коэффициент, характеризующий тонкостенность сосуда $A = 1 + t/D$. Для сосуда под давлением с внутренним диаметром 1 м и толщиной стенки 40 мм $A = 1,04$.

Прибавку на коррозию c можно принять равной нулю с учетом низкой коррозионной активности метана и нанесением на внутреннюю поверхность сосуда антикоррозионного покрытия.

С учетом того, что коэффициент прочности φ можно принять равным единице, так как сварные швы должны выполняться с полным проваром и 100 % рентгенографическим контролем, а любые отверстия должны быть подкреплены, масса сосуда $M_{\text{сосуда}}$ будет равна:

$$M_{\text{сосуда}} = (L\pi D + \pi D^2) \frac{PDA}{2[\sigma]} \rho. \quad (5)$$

После подстановки (2), (3) и (5) в (1), сокращений и преобразований получаем:

$$G = \frac{M_{\text{газа}}}{M_{\text{сосуда}}} = \frac{\mu}{R} \cdot \frac{[\sigma]}{\rho} \cdot \frac{1}{S(p, t) T_0} \cdot \frac{1}{A} \cdot \frac{0,5L/D + 1/3}{L/D + 1}. \quad (6)$$

Таким образом, критерий эффективности G может быть представлен как произведение пяти сомножителей, каждый из которых характеризует определенный параметр, влияющий на эффективность перевозки сжатого газа:

$$G = M_{\text{ГАЗА}} / M_{\text{СОСУДА}} = \prod_{i=5}^{i=1} Y_i \quad (7)$$

1.

$$Y_1 = \mu / R. \quad (8)$$

Параметр Y_1 характеризует свойства перевозимого груза, влиять на него невозможно. Его можно использовать только для сравнения эффективности перевозки различных газов в сжатом виде. В табл. 1 приводятся показатели Y_1 для различных газов. Из таблицы следует, что в одной и той же емкости перевозить метан в два раза менее эффективно, чем кислород и в 8 раз эффективнее, чем водород.

Таблица 2

Газ	μ , кг/моль	Y_1
Метан	16,03	0,001928
Кислород	32,0	0,003849
Водород	2,016	0,000242
Азот	28,02	0,00337
CO ₂	44	0,005292

2.

$$Y_2 = [\sigma] / \rho. \quad (9)$$

Параметр Y_2 характеризует свойства материала, из которого изготовлена грузовая емкость. При этом необходимо помнить, что допускаемые напряжения $[\sigma]$ представляют собой характеристику прочности материала, разделенную на коэффициент запаса прочности, т. е. $[\sigma] = \sigma_B / n_B$ или $[\sigma] = \sigma_T / n_T$ в зависимости от того, что меньше. Таким образом, параметр эффективности Y_2 можно представить в виде произведения двух параметров, один из которых будет характеризовать свойства материала, а другой будет полностью характеризоваться коэффициентом запаса прочности:

$$Y_2 = [\sigma] / \rho = \sigma / \rho \cdot 1 / n = Y_2' \cdot Y_2'' \quad (9-1)$$

где σ – характеристика прочности материала;

n – коэффициент запаса прочности по указанной характеристике.

В качестве характеристики прочности материала, как правило, используется предел прочности (временное сопротивление σ_b). Предел текучести может найти применение для сталей с низким значением предела текучести (отношением предела текучести к пределу прочности менее 0,6) – высокопластичных малоуглеродистых или аустенитных сталей. Однако маловероятно, что такие материалы могут найти применение для грузовых емкостей судов CNG.

Для повышения эффективности перевозки путем повышения Y_2 требуется применение материалов с высокими прочностными характеристиками при низкой плотности. Наилучшие показатели отношения допустимых напряжений к плотности имеют композитные материалы, за ними следуют алюминиевые и титановые сплавы, затем высокопрочные стали. Показатели удельной прочности σ_b/ρ для материалов труб: *композитный материал – титановый сплав BT1-0 – алюминиевый сплав АМГ – медно-никелевый сплав МНЖ5-1 – Сталь 3* – соотносятся как 10:9:8:3:2. В пользу применения высокопрочных титановых и алюминиевых сплавов и композитных материалов говорит и то, что не требуется производить внутреннее антикоррозионное покрытие, в отличие от углеродистых сталей. Сравнительную оценку экономической эффективности применения указанных материалов произвести сложно, так как цена материалов, так же как и их механические свойства, колеблется в широких пределах. В настоящее время в проектах судов CNG (см. табл. 1) нашли применение грузовые емкости из стали (самый дешевый материал из перечисленных) и из композитных материалов (материал с наибольшей удельной прочностью).

Выигрыш за счет применения материалов с высокой удельной прочностью во многом нивелируется требуемыми коэффициентами запаса прочности, так как для цветных металлов во всех нормативных документах коэффициенты запаса прочности больше. Так, например, в соответствии с международным Кодексом постройки и оборудования судов, перевозящих сжиженные газы наливом (Кодекс IGC) коэффициент запаса прочности для грузовых емкостей, изготовленных из алюминия составляет 4, а для грузовых емкостей, изготовленных из стали – 3.

Вопрос о назначении коэффициентов запаса прочности для грузовых емкостей судов CNG будет подробно рассмотрен ниже в разд. 3, а здесь отметим, что показатели эффективности емкости для перевозки сжатого газа на судах CNG зависит от них прямо пропорционально.

3.

$$Y_3 = 1 / S(\rho, t) T_0. \quad (10)$$

Параметр Y_3 характеризует условия перевозки: температуру, при которой производится загрузка и которая поддерживается во время транспортировки – показан на рис. 5 и 6.

На рис. 6 прерывистой линией показаны точки, соответствующие оптимальным значениям критериев эффективности грузовой

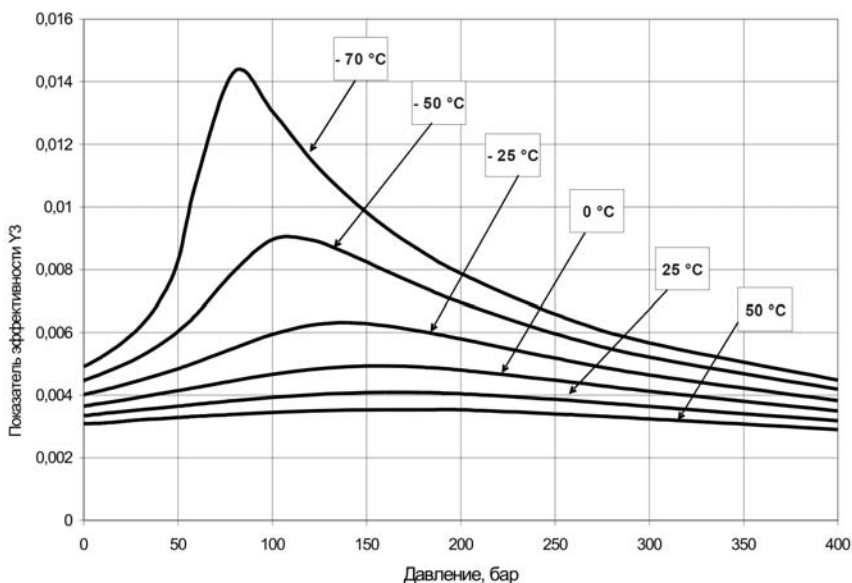


Рис. 5

Показатель эффективности грузовой емкости Y_3 в зависимости от температуры и давления груза во время перевозки метана

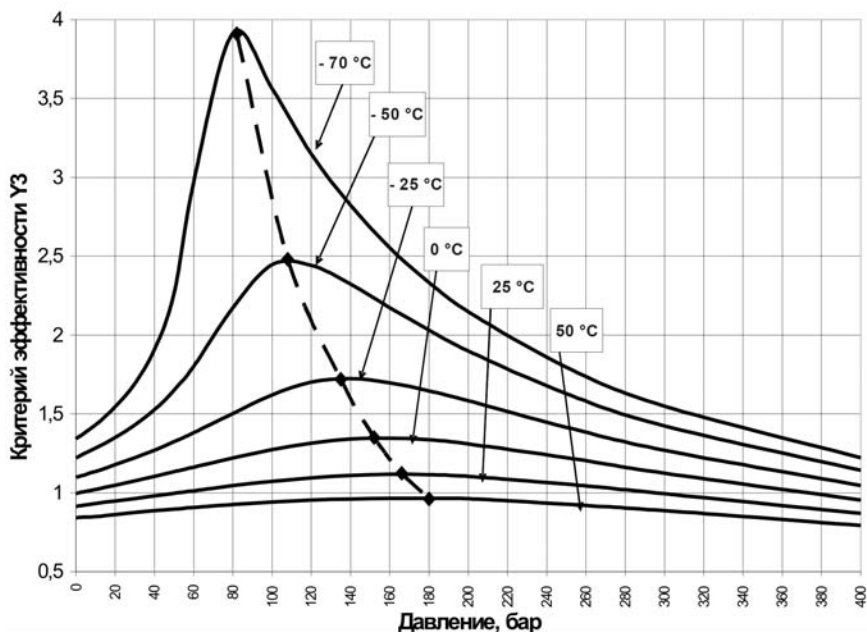


Рис. 6

Относительное изменение показателя эффективности емкости Y_3 в зависимости от температуры перевозимого груза и давления метана. За единицу принята эффективность при 0 °C и 1 бар

емкости. Эта же кривая, соответствующая оптимальным значениям показателя эффективности в зависимости от температуры и давления показана на рис. 7. В пределе при охлаждении груза до -83 °C произойдет его сжижение при давлении 46 бар, что соответствует критической точке метана.

Однако охлаждение груза потребует холодильной установки очень большой холодопроизводительности. Так, для охлаждения 1 млн. м³ метана в процессе загрузки, например на 40 °C за 10 часов, потребуется рефустановка с холодопроизводительностью порядка 20 МВт. Из этого следует, что перевозка груза с охлаждением возможна только, если груз будет поступать охлажденным береговыми средствами до погрузки. Поддержание такой или более глубокой температуры во время рейса не представляется принципиально

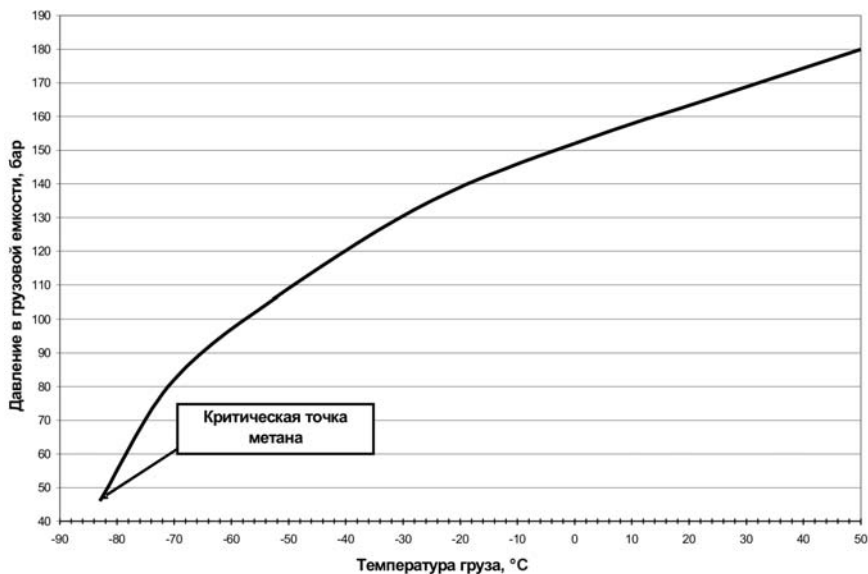


Рис. 7
Зависимость оптимального значения
давления перевозимого груза от температуры

сложной задачей. Для этого можно использовать имеющиеся в настоящее время проекты судовых рефрижераторных установок или системы кондиционирования по замкнутому контуру. Однако использования такого способа повышения эффективности потребует тепловой изоляции трюмов. Кроме того, использование охлаждения груза приводит к нескольким дополнительным опасностям, поэтому требования к резервированию систем охлаждения должны обязательно присутствовать в требованиях классификационных обществ, что и нашло отражение в Правилах DNV и ABS.

Определенный интерес представляет критическая точка метана $-83\text{ }^{\circ}\text{C}$ при 46 бар. Достижение этой точки позволяет скачкообразно повысить показатели эффективности грузовой емкости, так как плотность жидкого метана при этих параметрах составит $212,5\text{ кг/м}^3$ по сравнению с $145,3\text{ кг/м}^3$ в газовой фазе при тех же параметрах (т. е. увеличивается почти в полтора раза) [3]. Перевозка

груза при критических параметрах по затратам и по сложности осуществления проекта по всей видимости заняла бы промежуточное положение между LNG и CNG.

4.

$$Y_4 = 1 / A, \quad (11)$$

где $A = 1 + t/D$.

Параметр Y_4 характеризует влияние геометрии емкости (ее тонкостенности).

Для сосуда под давлением с внутренним диаметром 1 м и толщиной стенки 40 мм $A = 1,04$, а $Y_4 = 0,96$. Влиять на эффективность путем изменения отношения толщины стенки к диаметру практически невозможно, так как толщина стенки, рабочее давление, диаметр и допускаемые напряжения взаимосвязаны (см. (4)), изменять параметр Y_4 возможно только применяя более прочный материал, однако и это мало влияет на параметр Y_4 . Например, уменьшение в два раза толщины стенки за счет более прочного материала (допускаемые напряжения увеличились в 2 раза) приведет к изменению параметра Y_4 для сосуда под давлением с внутренним диаметром 1 м и толщиной стенки 40 мм приведет к изменению с 0,96 до 0,98, то есть всего на 2 %.

5.

$$Y_5 = \frac{0,5L/D + 1/3}{L/D + 1}. \quad (12)$$

Параметр Y_5 характеризует влияние геометрии емкости (соотношение длины цилиндрической части грузовой емкости L к ее диаметру D). В общем виде параметр Y_5 представляет функцию, которая изменяется в зависимости от величины выпуклости дна и толщины стенки. Для выпуклых эллиптических дна с толщиной стенки, равной толщине стенки обечайки с высотой дна h , функция Y_5 примет следующий вид:

$$Y_5 = \frac{0,5L/D + 2h/3D}{L/D + 2h/D}, \quad (13)$$

где h – высота днища.

Если высота днища равна половине диаметра, то есть выпуклое эллиптическое днище становится сферическим, (13) примет вид (12). Формула (13) верна только для таких значений h , при которых не требуется увеличение толщины стенки днища более толщины стенки обечайки из соображений прочности, т. е. для $0,5D \geq h \geq 0,25D$. Применение плоских днищ возможно только для труб небольшого диаметра.

Влияние соотношения L/D на массовую эффективность грузовой емкости показано на рис. 8.

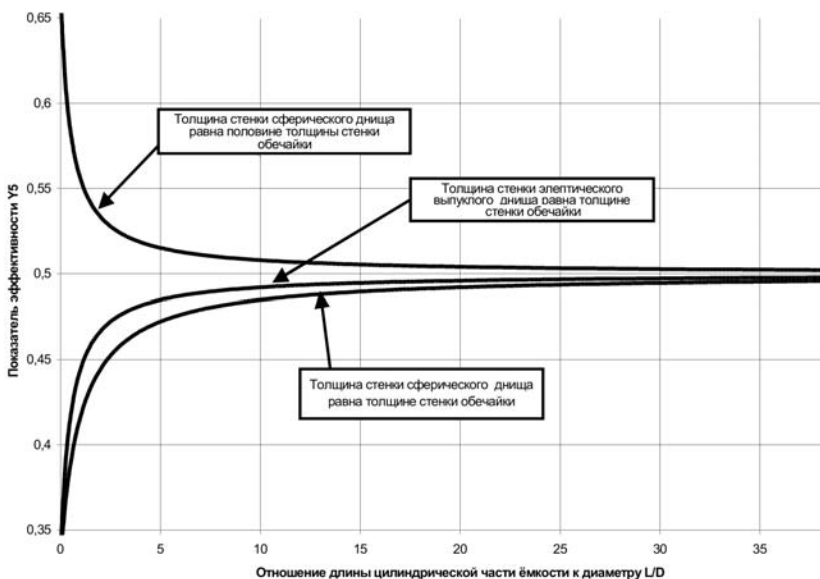


Рис. 8

Изменение показателя эффективности грузовой емкости Y_5 от соотношения размеров грузовой емкости для различных вариантов днищ

Критерий эффективности G не очень удобен для восприятия, так как является отношением газа к весу емкости и теоретически может принимать значения выше 1. Более удобен для восприятия критерий η , который является отношением полезной массы груза к массе загруженной емкости, т. е. аналогичен коэффициенту полезного действия. Зная G можно легко найти η , так как они связаны следующим соотношением:

$$\eta = \frac{1}{1 + 1/G}. \quad (14)$$

В заключение предлагается несколько вариантов расчета массовой эффективности емкостей различных конструкций, результаты приводятся в табл. 3, в которой показаны следующие варианты грузовых емкостей.

Вариант 1. Емкость изготовлена из стальной трубы внутренним диаметром 1000 мм, толщиной стенки 40 мм, допускаемые напряжения 200 МПа ($\sigma_b > 520$ МПа, $\sigma_t > 320$ МПа), с эллиптическим днищем с $h/D = 0,25$ при температуре 20 °С. Рабочее давление составляет 20 МПа. При указанных исходных данных критерий эффективности $G=0,0944$, критерий $\eta=0,08629$, а промежуточные показатели приведены в табл. 3.

Вариант 2, 3, 4. Емкость изготовлена из титанового сплава ПТ-3В, обечайки сварены из листа внутренним диаметром 500 мм длиной 10 м, допускаемые напряжения – 200 МПа ($\sigma_b > 833$ МПа, $\sigma_t > 588$ МПа), с эллиптическим днищем с $h/D = 0,25$.

Рассмотрены три варианта условий перевозки: при температурах 20 °С, – 25 °С и – 70 °С при давлениях 20 МПа, 15 МПа и 8 МПа соответственно. Критерии эффективности перевозки показаны в табл. 3.

Вариант 5, 6. В качестве грузовой емкости рассмотрен композитный баллон БЦМ-35-19,6-362/995, серийно изготавливаемый Котласским электромеханическим заводом. В расчетах показателей эффективности использованы данные производителя. Поскольку данные о материале отсутствуют, но имеются данные о вместимости и весе серийных образцов, некоторые промежуточные показатели эффективности опущены.

Таблица 3

Вариант	Конструкция грузовой емкости	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	G	η
1	стальная труба $D=1000$ мм, $t=40$ мм, $\sigma_b > 520$ МПа, $\sigma_T > 320$ МПа, эллиптические днища, отношение $L/D = 36$, температура = 20 °С, давление = 20 МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	$2,564 \cdot 10^4$	$4,05 \cdot 10^{-3}$	0,96	0,4975	0,0944	0,0863
2	из титанового сплава ПТ-3В $\sigma_b > 833$ МПа, $\sigma_T > 588$ МПа, эллиптические днища, отношение $L/D = 20$, температура = 20 °С, давление = 20 МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	$4,444 \cdot 10^4$	$4,05 \cdot 10^{-3}$	0,96	0,496	0,165	0,142
3	из титанового сплава ПТ-3В $\sigma_b > 833$ МПа, $\sigma_T > 588$ МПа, эллиптические днища, отношение $L/D = 20$, температура = -25 °С, давление = 15 МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	$4,444 \cdot 10^4$	$6,26 \cdot 10^{-3}$	0,97	0,496	0,258	0,205
4	из титанового сплава ПТ-3В $\sigma_b > 833$ МПа, $\sigma_T > 588$ МПа, эллиптические днища, отношение $L/D = 20$, температура = -70 °С, давление = 8 МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	$4,444 \cdot 10^4$	$1,43 \cdot 10^{-2}$	0,98	0,496	0,596	0,373
5	композитный баллон температура = 20 °С, давление = 20 МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	–	$4,05 \cdot 10^{-3}$	–	0,456	0,267	0,21
6	композитный баллон температура = -25 °С, давление = 20 МПа	$1,928 \cdot 10^{-3}$	–	$6,26 \cdot 10^{-3}$	–	0,456	0,413	0,292

Рассмотрены два варианта условий перевозки: при температурах 20 °С и – 25 °С при давлении 20 МПа. Эти условия соответствуют допускаемым условиям эксплуатации баллона, которые по данным производителя предусматривают до – 45 °С.

Из сопоставления грузовых емкостей различных типов по показателям массового совершенства можно сделать выводы, что на показатели массового совершенства грузовых емкостей наиболее существенно влияют три фактора:

- удельная прочность материала;
- температура газа при транспортировке;
- соотношение размеров грузовой емкости (отношение длины емкости к диаметру).

Варьируя эти факторы, можно добиваться существенного повышения показателей массового совершенства грузовых емкостей. Однако высокое значение показателей массового совершенства конструкций не является достаточным для окончательного выбора в пользу применения грузовых емкостей того или иного типа. Рациональность использования емкостей определенного типа требует более детального рассмотрения применительно к условиям конкретного проекта морской транспортировки сжатого природного газа.

3. О назначении коэффициентов запаса грузовых емкостей судовых CNG

Анализ требований, предъявляемых к судам для транспортировки сжатого природного газа и устанавливаемому на них технологическому оборудованию для подготовки, загрузки, транспортировки и разгрузки газа, в документах международных организаций и классификационных обществ показал, что основополагающим документом для проектирования и строительства судов CNG является международный Кодекс IGC.

Хотя Кодекс IGC не является обязательным для судов CNG, однако он может быть использован при разработке нормативных документов для судов CNG и при их проектировании. При этом следует исходить из положения, что уровень безопасности вновь проектируемого судна не должен быть ниже уровня безопасности существующих конвенционных судов, т. е. – судов LNG.

Требования Кодекса IGC включены в Правила по газовозам всех классификационных обществ – членов МАКО. Большая часть этих требований может быть применена для судов CNG без ущерба для безопасности.

При проектировании судов CNG к перечисленным в Кодексе IGC опасностям следует добавить опасности, связанные с высоким давлением в грузовых емкостях. Хотя опасность такого рода учитывается в Кодексе IGC для грузовых танков типа С, которые являются сосудами под давлением, для судов CNG она многократно возрастает и появляются новые опасности, связанные с возможными утечками из грузовых танков.

В частности:

хотя груз не перевозится при криогенных температурах, остается опасность переохлаждения и температурного холодного удара для судовых конструкций в случае утечки газа за счет охлаждения газа при расширении;

хотя Кодекс IGC определяет границы опасных зон, для судов CNG они должны быть пересмотрены, так как в возможных источниках утечки груза присутствуют гораздо большие давления, а следовательно – районы распространения и концентрации смесей будут другими;

при возникновении утечки газа на судне CNG время достижения взрывоопасной концентрации будет значительно меньше, чем на судне LNG, так как для сжиженного газа требуется время на испарение;

по этой же причине при утечке газа на судне CNG значительно быстрее, чем на судне LNG, будет подниматься давление в окружающем грузовой танк помещении, что увеличивает опасность повреждения корпусных конструкций и требует большей производительности предохранительных устройств;

в случае возникновения на судне CNG возгорания груза при его утечке сценарий развития пожара будет отличаться от аналогичного пожара на судне LNG, так как давление и скорости истечения газа будут значительно больше, а следовательно – требования по противопожарной защите и средствам тушения должны быть пересмотрены, но, учитывая специфику тушения газа, необходимости применения дополнительных систем тушения нет, но имеет смысл повышения требования к конструктивной противопожарной защите.

С учетом перечисленных дополнительных опасностей, требования Кодекса IGC могут быть применены к судам CNG.

Специфические аспекты проектирования судов CNG регламентируются специальными Правилами DNV и ABS по судам CNG.

Наиболее принципиальным при проектировании судов CNG является вопрос установления приемлемого по критериям безопасности коэффициента запаса прочности по допускаемым напряжениям для грузовых емкостей. При подтверждении комплексом предусмотренных Правилами DNV экспериментальных исследований соответствия уровня безопасности грузовых емкостей требуемым стандартам, для грузовых емкостей судов CNG может быть применен коэффициент запаса общей прочности в пределах 1,6–1,8 по величине временного сопротивления σ_v , что позволяет проектировать экономически эффективные суда CNG.

Приступая к проектированию судна CNG необходимо предварительно согласовать с классификационным обществом и Морской Администрацией следующие вопросы:

назначение коэффициентов запаса прочности грузовых емкостей и объем исследования образцов грузовых баллонов;

применение требований Кодекса IGC.

Такое согласование может быть выполнено в форме специального документа, в котором бы нашли отражение перечисленные вопросы – проекта временных требований Регистра для газозовов CNG, который можно будет согласовать с Морской Администрацией России. Такой документ может быть разработан на основе настоящего исследования.

3.1 Сравнение требований нормативных документов по расчетам на прочность

Результаты анализа формул для расчета допускаемого рабочего давления в цилиндрических сосудах под давлением в различных нормативных документах, при их кажущемся внешнем различии, говорит о том, что в основу расчета положены одни и те же зависимости.

В качестве критерия разрушения в большинстве нормативных документов используется третья теория прочности (наибольших касательных напряжений), где эквивалентные напряжения опре-

деляются как разность наибольших и наименьших главных напряжений. Анализ формул для расчета по различным нормативным документам (ASME Code, ГОСТ 14249-89, ОСТ 108.031.08-85, часть X «Котлы, теплообменные аппараты и сосуды под давлением» Правил Регистра и т. д.) показывает, что если используются одинаковые значения допускаемых напряжений, то разница в результатах составляет не более 2 %.

Исключение составляют требования Кодекса IGC и требования Правил классификационных обществ по газозовам LNG, которые повторяют требования Кодекса IGC, где используется четвертая теория прочности (формула Мизеса). Разница в результатах по сравнению с первой группой документов составляет около 13 % (в меньшую сторону). Видимо это обстоятельство отражается в величине коэффициентов запаса прочности: согласно Кодексу IGC, коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению для углеродистых сталей равен 3, что, если разделить на 1,13, составит 2,655 и соответствует требованиям Регистра для сосудов под давлением.

Из выше сказанного можно сделать вывод, что причины разброса в результатах расчета лежат не в различиях методик расчета, а в величине коэффициентов запаса прочности, требуемых различными документами для определения допускаемых напряжений.

Сравнение требований различных нормативных документов к величине коэффициентов запаса прочности для сосудов под давлением приводится в табл. 2. Для того, чтобы провести такое сравнение, пришлось все указанные требования привести к единому привычному для нас виду, где допускаемые напряжения определяются как наименьшие из нескольких характеристик прочности материала, разделенных на коэффициент запаса. Так как во многих документах для береговых и подводных объектов используются специфические коэффициенты, учитывающие несвойственные для судовых сосудов под давлением факторы (сейсмостойкость, воздействие волн и т. д.), эти коэффициенты не учитывались. Результаты сравнения коэффициентов запаса прочности по пределу текучести и временному сопротивлению приведены на рис. 1, где в виде диаграммы приводятся данные табл. 2.

Таблица 4

**Сравнение требований нормативных документов
к величине коэффициентов запаса прочности оболочек, работающих под внутренним давлением**

Документ	Коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению σ_B	Коэффициент запаса прочности по пределу текучести σ_T	Примечания	
1	2	3	4	
ASME Code	– для нормальных температур;	$0,85\sigma_B/4 = \sigma_B/4,7$	$\frac{2}{3} \frac{\sigma_T}{0,85\sigma_T} = \frac{\sigma_T}{1,76}$	1, 2
	– для повышенных температур;	$1,1 \frac{0,85\sigma_B}{4} R_T = \frac{\sigma_B}{4,3} R_T$	$\frac{2}{3} \frac{\sigma_T}{0,85\sigma_T} R_T = \frac{\sigma_T}{1,76} R_T$ $0,9 \cdot 0,85\sigma_T R_T = \frac{\sigma_T R_T}{1,3}$	*) – при проведении гидравлических испытаний
IGC Кодекс (для грузовых танков типа C)*	Углеродистые и никелевые стали	$\sigma_B/3$	$\sigma_T/2$	*) Требования Правил классификационных обществ (Регистра, ABS и DNV) для газозавозов LNG повторяют Кодекс IGC
	Аустенитные стали	$\sigma_B/3,5$	$\sigma_T/1,6$	
	Алюминиевые сплавы	$\sigma_B/4$	$\sigma_T/1,5$	

1	2	3	4	5
ГОСТ 14249-89 ⁵	Углеродистые и никелевые стали	$\sigma_B/2,4$	$\sigma_T/1,5$, но не более $\sigma_T/1,1$ при гидравлических испытаниях	1
	Аустенитные стали	$\sigma_B/3$		
ОСТ 108.031.08-85 ⁶	часть X «Котлы, теплообменные аппараты и сосуды под давлением» Правила Регистра	$\sigma_B/2,7$	$\sigma_T/1,6$	
		–	$\sigma_T/2$	3
Руководство ABS по подводным трубопроводам				
СНиП 2.05.06-85 по сухопутным магистральным трубопроводам		От $\sigma_B/1,5$ до $\sigma_B/2,4$	От $\sigma_T/1,2$ до $\sigma_T/1,8$	3, 4, 8
Правила классификации и постройки морских подводных трубопроводов Регистра		$\sigma_B/2,6$	$\sigma_T/1,5$	3, 7
Правила DNV по подводным трубопроводам		$\sigma_B/1,5$	$\sigma_T/1,3$	3
Примечания:				
1. Общие требования. Для конкретных марок сталей даются меньшие значения.				
2. R_T – коэффициент, учитывающий изменение свойств материала под воздействием температуры.				
3. Без учета коэффициентов воздействия различных внешних факторов, не относящихся к судам CNG.				
4. Для газопроводов рабочим давлением не более 10 МПа в зависимости от участка, свойств материала и технологии сварки.				
5. Нормы расчета на прочность стационарных сосудов под давлением.				

6. Нормы расчета на прочность стационарных паровых котлов.
7. Коэффициенты запаса могут быть уменьшены при условии проведения специальных расчетов местной и общей прочности с учетом расположения на грунте.
8. Больше значение соответствует требованиям для переходов через водные преграды.

Сравнение требуемых различными стандартами коэффициентов запаса прочности представлено на рис. 8.

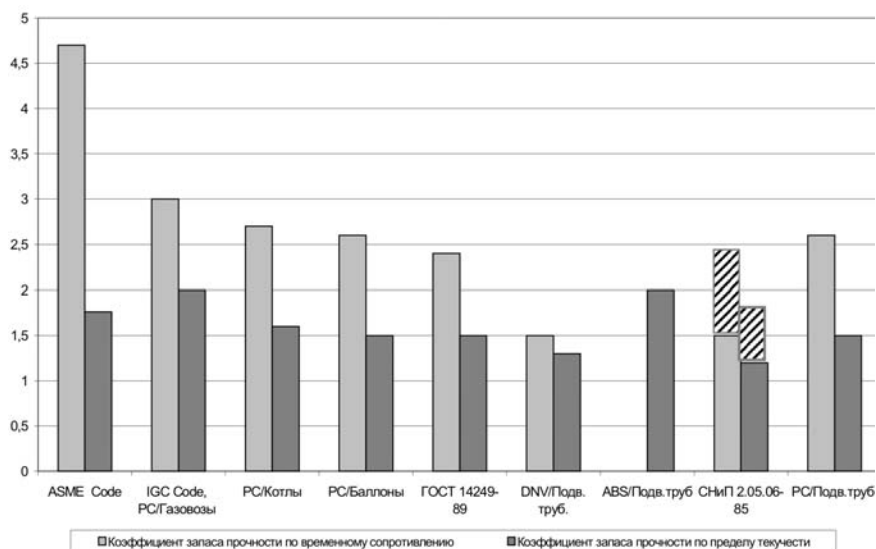


Рис. 8
Сравнение коэффициентов запаса прочности, требуемых различными стандартами

В табл. 3 приводятся результаты сравнения допускаемого различными стандартами расчетного давления для цилиндрической емкости (баллона), выполненной из стальной трубы диаметром 1067 мм (42”) с толщиной стенки 33,5 мм, сталь Х80.

Таблица 5
Допустимое расчетное давление для баллона заданных габаритов

Документ	Расчетное давление, МПа
1	2
ISO 13628-7	27,5
DNV-OS-F201 Safety Class High	26,0

1	2
DNV-OS-F101 Safety Class High	25,0
ISO/DIS 13623	25,0
CSA Z662, Canada Class 4	15,0
CSA Z662, Canada Class 3	17,5
CSA Z662, Canada Class 2	25,0
CSA Z662, Canada Class 1	27,5
B 31.8, US-class 4	14,0
B 31.8, US-class 3	17,5
B 31.8, US-class 2	21,0
B 31.8, US-class 1	27,5
API-RP1111.US	24,5
ANCC Code, Italy	23,0
AD-Merkblätter, Germany	23,0
BS 5500, UK	16,0
ASME BPVC VIII, US-div.3	17,5
ASME BPVC VIII, US-div.2	13,0
ASME BPVC VIII, US-div.1	11,0
DNV Ship Rules pt.4 ch.3 sec.	14,0

3.2 Назначение допускаемых напряжений для грузовых емкостей

Если сравнивать грузовые емкости для судов LNG и CNG, то нельзя не отметить одно очень важное принципиальное отличие: грузопместимость судов CNG напрямую зависит от внутреннего давления в грузовой емкости, в отличие от судов LNG, где давление определяется точкой фазового перехода при температуре перевозки. То есть, для LNG, в отличие от CNG, не имеет смысла повышать давление в грузовых емкостях выше давления насыщения при температуре перевозки, так как это не приведет к увеличению грузопместимости. Применение существующих общепринятых норм для судов LNG и, в частности, коэффициентов запаса прочности для назначения допускаемых напряжений грузовых емкостей судов CNG не целесообразно экономически и нуждается в глубоком переосмыслении.

Существующие нормативные документы в области обеспечения прочности грузовых емкостей для судов-газовозов разработаны с ориентацией на суда для перевозки сжиженного природного газа – суда LNG. Как правило, расчетные внутренние давления в грузовых емкостях судов LNG относительно невелики и определяются точкой фазового перехода при стандартной температуре перевозки –162 °С. Коэффициенты запаса прочности, установленные существующими нормативными документами для назначения допускаемых напряжений в грузовых емкостях судов-газовозов, основаны на специфике работы грузовых емкостей в этих условиях.

Для грузовых емкостей судов CNG более характерны другие условия работы – существенно более высокие внутренние давления и существенно менее экстремальные температуры транспортируемого природного газа. В связи с этим, применение существующих общепринятых норм для судов LNG, в частности – коэффициентов запаса прочности, для назначения допускаемых напряжений в грузовых емкостях судов CNG нуждается в глубоком переосмыслении.

Коэффициент запаса прочности (КЗП), по своей сути, есть не что иное, как «коэффициент незнания» свойств конструкции, ожидаемых нагрузок и возможных последствий аварии. КЗП можно разложить на произведение нескольких сомножителей, каждый из которых будет отражать «коэффициент незнания» какого-либо фактора, влияющего на вероятность безаварийной работы. Применительно к сосудам под давлением основными такими факторами будут следующие (см. табл. 6).

Таблица 6

**Факторы,
влияющие на вероятность безаварийной работы грузовых емкостей**

Фактор	Методы снижения влияния фактора на вероятность безаварийной работы
1	2
«Коэффициент незнания» метода расчета, т. е. коэффициент, учитывающий аппроксимацию формы сосуда и местных деталей, влияющих на усталостную прочность	Может быть уменьшен путем применения более совершенных численных методов расчета (МКЭ), учетом не только внутреннего давления, но и местных нагрузок, реакций опор и термических напряжений

1	2
«Коэффициент незнания» характера разрушения данной конструкции	Может быть уменьшен путем проведения испытаний полномасштабного образца до разрушения. Кроме того, значительным резервом уменьшения коэффициента может быть проверка соответствия конструкции принципу «течь-разрушение», для чего требуется исследование свойств трещиностойкости материала
«Коэффициент незнания» свойств материала конкретного сосуда, т. к. есть определенный технологический разброс свойств материала и в расчетах учитывается минимально возможное значение	Может быть уменьшен за счет контроля действительных размеров толщины стенок грузовых емкостей и испытания образцов материала каждой трубы, идущей на производство емкостей
«Коэффициент незнания» изменений свойств материала под действием усталостных нагрузок	Может быть уменьшен путем испытания образцов на усталость и построения кривой Велера
«Коэффициент незнания» изменений нагрузок за время жизни и, как следствие, неконтролируемый расход ресурса	Может быть уменьшен путем мониторинга изменения внутреннего давления
«Коэффициент незнания» интенсивности коррозии, протекающей во время эксплуатации	Может быть уменьшен путем применения антикоррозионного покрытия и контроля состояния конструкции во время эксплуатации
«Коэффициент незнания» величины термических напряжений	Может быть уменьшен путем принятия мер по уменьшению колебаний температуры
«Коэффициент незнания» последствий аварии	Может быть уменьшен путем построения дерева отказов и проведения анализа риска

Основным и единственным способом борьбы с незнанием является получение нового знания, т. е. исследование тех свойств, влияние которых на прочность и надежность конструкции вызывает законное опасение. Глубокое исследование свойств конструкции требует проведения дорогостоящих экспериментальных исследований, что в случае CNG полностью экономически оправданно,

т. к. вместимость грузовых емкостей и эффективность перевозки груза напрямую зависят от коэффициентов запаса прочности.

Таким образом, судовладелец и классификационное общество, рассматривая проект судна, должны определить и согласовать объем исследований, которые необходимо и экономически целесообразно проводить для подтверждения безопасной работы грузовых емкостей при установлении определенного значения коэффициента запаса прочности.

Кроме того, применение существующих общепринятых норм по назначению допускаемых напряжений для грузовых емкостей для судов CNG не целесообразно еще и потому, что объем возможной утечки газа при разгерметизации одной грузовой емкости для судов CNG значительно меньше по сравнению с аналогичной ситуацией для судов LNG, а следовательно – последствия наступления такого события менее опасны.

Также следует отметить, что указанные в Кодексе IGC значения коэффициентов запаса прочности даются для любых газов, указанных в главе 19 Кодекса IGC, вне зависимости от их свойств, т. е. по принципу максимального значения с учетом всех возможных опасностей и вреда который может нанести груз. Между тем можно и нужно учитывать, что метан не обладает одной из учитываемых Кодексом опасностей – токсичностью, и поэтому назначать для грузовых емкостей для метана такой же запас прочности, как и, например, для токсичного аммиака – не совсем обоснованно. Необходимо применение других способов обеспечения безопасности, например эквивалентной замены величины коэффициента запаса прочности. В качестве такой замены может быть рассмотрен комплекс мер, включающий:

.1 натурный эксперимент с разрушением образца грузовой емкости. В идеале такие испытания необходимо производить газобразной средой для того, чтобы можно было судить о характере разрушения;

.2 испытание образцов на усталость для построения (S-N) кривой Велера для материала, из которого изготавливаются грузовые емкости, и расчет усталостной прочности на ее основе;

.3 определение трещиностойкости (вязкости разрушения) материала для возможности проверки соответствия грузовых емкостей принципу «течь-разрушение»;

.4 возможность контроля состояния материала грузовой емкости в эксплуатации:

визуально (осмотр или телекамера);

с помощью ультразвукового контроля в сочетании с контролем акустической эмиссии или магнитодиагностикой;

с помощью периодических разрушающих испытаний одной или нескольких грузовых емкостей после определенного срока эксплуатации с определением изменения свойств материала;

.5 применение максимально простой формы грузовых емкостей, исключаяющей или предельно уменьшающей величины концентрации напряжений и, как следствие, амплитуду колебаний напряжений, – позволяет значительно уменьшить расход ресурса по усталости;

.6 точный учет циклов «погрузка-разгрузка» и непрерывный контроль давления в грузовых емкостях – позволяют отслеживать расход усталостного ресурса материала баллонов;

.7 контроль величины внутреннего давления в грузовых баллонах и наличие предохранительных клапанов достаточной пропускной способности – позволяют обезопасить грузовые емкости от избыточного давления;

.8 организацию загрузки сжатого природного газа в грузовые емкости судна CNG таким образом, чтобы избежать сколько-нибудь значительных колебаний температуры. Отсутствие в грузовых емкостях судов CNG термических напряжений, которые являются основным источником аварий, например, в судовых котлах, позволит говорить о том, что применение котельных норм прочности к грузовым емкостям CNG нецелесообразно.

В грузовых танках LNG термические напряжения также играют крайне серьезную роль из-за термического напряжения металла емкостей и необходимости крепления их к корпусу. Отсутствие термических напряжений в грузовых емкостях судов CNG позволит говорить о том, что применение норм прочности для танков судов LNG к грузовым емкостям CNG – также нецелесообразно;

.9 меры по подготовке газа и внутреннее антикоррозионное покрытие грузовых емкостей, что позволяет свести к минимуму коррозию и, как следствие, уменьшить запас на коррозию до нуля;

.10 контроль действительных размеров толщины стенок грузовых емкостей позволяет снизить запас на технологический разброс толщин;

.11 расчет напряжений в грузовых емкостях с использованием метода конечных элементов (МКЭ) с учетом внутреннего давления и реакций опор и определение таким образом действительной концентрации напряжений – позволяет снизить общий «коэффициент незнания» – коэффициент запаса прочности.

Оценка безопасности и анализ последствий взрыва одной грузовой емкости, который не должен приводить к дальнейшим повреждениям, пожарам и взрывам, а также все вышеперечисленное позволяет обсуждать применение для грузовых емкостей судов CNG коэффициента запаса общей прочности в пределах 1,6–1,8 по величине временного сопротивления σ_v .

Из изложенных выше материалов можно сделать следующие выводы.

1. Предложена математическая модель оценки эффективности грузовой емкости CNG. В результате ее исследования обнаружено, что на эффективность перевозки наиболее существенно влияют 3 фактора, а именно: удельная прочность материала, температура перевозки и соотношение размеров (длины и диаметра). Эти факторы определяют возможные способы формирования грузовых емкостей: применение высокопрочных и легких материалов, понижение температуры при транспортировке и использование цилиндрических или спиральных емкостей с высоким отношением длины к диаметру. По информации периодической печати, разрабатываемые в настоящее время типы грузовых емкостей подтверждают сделанные выводы об основных путях повышения их эффективности.

2. Грузовместимость судов CNG напрямую зависит от внутреннего давления в грузовой емкости, в отличие от судов LNG, где давление близко к атмосферному, а температура определяется точкой фазового перехода. То есть, для LNG, в отличие от CNG, не имеет смысла повышать давление в грузовых емкостях выше давления насыщения при температуре перевозки, так как это не приведет к увеличению грузоместимости. Применение существующих общепринятых норм для судов LNG и, в частности,

коэффициентов запаса прочности для назначения допускаемых напряжений грузовых емкостей судов CNG не целесообразно экономически и нуждается в глубоком переосмыслении. Для судовладельца экономически целесообразно проведение специальных исследований прочности конструкций грузовых емкостей судов CNG для возможности уменьшения коэффициентов запаса прочности без понижения уровня безопасности. Формирование требований к объему и методике таких испытаний и исследований – серьезная научная задача, которая встанет перед классификационными обществами в ближайшее время в связи с развитием технологии CNG.

3. В настоящее время отечественная промышленность обладает достаточным научно-производственным потенциалом для создания ключевого элемента новой технологии – судов CNG, а также основного оборудования для них. Результаты проведенных исследований показали техническую реализуемость и перспективность технологии CNG в качестве дополнительного инструмента для ввода в коммерческий оборот шельфовых месторождений природного газа и поставок природного газа на удаленные рынки. Технология транспортировки газа с помощью судов CNG активно развивается и для возможности применения этой прогрессивной технологии отечественными верфями и судовладельцами необходима соответствующая разработка нормативной базы Регистра, как это сделано ABS [6] и DNV [7].

Список литературы

1. Таблицы физических величин // Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.
2. Перри Дж. Справочник инженера-химика, т. 1. / Перевод с англ. под ред. акад. Жаворонкова Н.М. и чл.-корр. АН СССР Романкова П.Г. – Л.: Химия, 1969. – 640 с.
3. Акулов Л.А., Борзенко Е.Н. и др. Теплофизические свойства криопродуктов. – СПб.: Политехника, 2001. – 243 с.
4. Блинков А.Н., Власов А.А. Морская транспортировка сжатого газа. Новые возможности для освоения месторождений природного газа на шельфе // Морская Биржа. – 2006. – № 2. – С. 65 – 69.
5. Блинков А.Н., Власов А.А., Лицис А.В. Морская транспортировка сжатого газа. Возможности применения технологии CNG для транспорти-

ровки природного газа российских месторождений // Морская Биржа. – № 3. – 2006. – С. 82 – 87.

6. DNV. Offshore standard OS-F101. SUBMARINE PIPELINE SYSTEMS., Det Norske Veritas, Hovik, Norway, 2000, 264 с.

7. ABS. GUIDE FOR VESSELS INTENDED TO CARRY COMPRESSED NATURAL GASES IN BULK., American Bureau of Shipping, Houston, USA, 2005, 366 с.