

С. И. Логачев,
М. М. Николаев

Суда для перевозки сжиженных газов

У 3100/12



Издательство
«Судостроение»
Ленинград
1966

В книге впервые систематизированы материалы, опубликованные в отечественной и зарубежной периодической литературе, по проектированию судов для перевозки сжиженных газов. Описаны особенности судов-газовозов, обусловленные специфическими свойствами транспортируемого груза. Рассмотрены основные типы конструкций газотранспортной постройки, влияние выбора главных параметров этих судов, грузоподъемности и скорости хода. Подробно освещен вопрос о выборе типа судовой цистерны для сжиженного газа, материала для ее изготовления, а также выбора формы и кривизны, изоляции и способа крепления цистерн к трюму. Кроме того, в книге освещаются вопросы безопасности морской транспортировки газа.

Книга рассчитана на инженерно-технический рабочий судостроительной промышленности. Она может быть использована студентами морского строительного факультета, а также персоналом морского флота.

От авторов

В современную эпоху имеют огромную важность проблемы развития энергетики, связанные с быстрым ростом потребления энергии в промышленности, транспорте и сельском хозяйстве.

С давних времен и в качестве основного источника энергии человечество использовало каменный уголь. В начале этого столетия получила развитие нефтедобывающая промышленность, покрывавшая в настоящее время примерно 40% мировой потребности в первичной энергии. Сравнительно новым источником энергии является газ, практическое применение которого было освоено лишь в 20-х годах текущего столетия. Особенно быстро стала развиваться газовая промышленность в послевоенные годы. В связи с этим возникла проблема создания средств транспортировки газов из удаленных районов их добычи. Появились первые морские и речные суда-газовозы. Нет сомнений в том, что начавшееся всего 10—15 лет назад морские перевозки газа имеют большое будущее, и поэтому пополнение газозавозов следует считать таким же важным событием, как создание в конце прошлого века первых нефтяных судов.

В настоящее время строительство газозавозов находится еще в начальной стадии своего развития, характеризующейся поисками наиболее эффективных способов транспортировки газа на судах, а также анализом опыта постройки и эксплуатации первых газозавозов. Интерес к морскому способу транспортировки газа проявляется во многих странах и поэтому мировой флот судов-газовозов увеличивается из года в год.

Специфические свойства газа обуславливают целый ряд отличительных особенностей газозавозов по сравнению с другими транспортными судами. К этим особенностям относятся установка вкладных цистерн для перевозки газа, выделение на судне балла-

Введение

ствах шестери, трудность обеспечения остойчивости из-за высокого расположения центра тяжести владных шестери и т. д. Проектирование этих судов осложняется и тем, что приходится решать ряд специфических вопросов — выбор наиболее рационального способа перевозки газа, типа шестери, материала для их изготовления, выбор коалиции, разработка крепления шестери в корпус судна, обеспечение пожаро- и взрывобезопасности и т. п.

Все вышесказанное свидетельствует о целесообразности и необходимости обобщения имеющегося зарубежного и отечественного опыта в области проектирования и постройки судов-газовозов.

Написанию настоящей книги предшествовала многолетняя работа авторов по систематизации и критическому анализу публикуемых в периодической печати материалов, а также рассмотрению разработанных у нас в стране и за рубежом проектов газовозов.

Авторы выражают глубокую признательность доктору технических наук проф. В. В. Ашмору, инж. Е. Г. Фраду за ценные замечания, сделанные в процессе рецензирования рукописи, и работникам Центральной научно-технической библиотеки Министерства судостроительной промышленности СССР за помощь в подборе материалов для книги.

Введение, главы I—IV и VI написаны С. Н. Зогановым; главы V — М. М. Николаевым.

Авторы с благодарностью примут все краткие замечания и пожелания по книге.

Отзывы о книге просьба направлять по адресу: Ленинград, Д-65, ул. Гоголя, д. 8, издательство «Судостроение».

В последние годы большое распространение получило использование в промышленности и в быту природного и попутного (извлекающегося при добыче нефти) газов, которые приобретают все большее значение в экономике, так как представляют собой высококалорийное дешовое топливо и ценное сырье для химической промышленности.

Советский Союз обладает огромными запасами газа. На 1 января 1961 г. потенциальные запасы газа в нашей стране оценивались в 60 трлн кубометров, что примерно в два раза больше, чем потенциальные запасы газа в США [43].

В течение прошедшего десятилетия добыча и производство газа в нашей стране возросли в 4,3 раза. В соответствии с Директивой XXIII съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР в 1970 г. у нас будет произведено 225—240 млрд. кубометров газа.

В последние годы резко увеличивается доля газа в топливно-энергетическом балансе СССР. Если в 1955 г. в общем топливно-энергетическом балансе нашей страны газ занимал лишь 2%, то в 1965 г. его доля составляла 15—16%. Этот рост объясняется технико-экономическими преимуществами добычи и использования газа по сравнению с другими видами топлива. В среднем по СССР себестоимость добычи газа в 1958 г. была в 18 раз ниже себестоимости добычи угля и в 4 раза ниже себестоимости добычи нефти [38], причем этот показатель продолжает уменьшаться. Так, в 1965 г. себестоимость добычи газа была в 22 раза ниже себестоимости добычи угля и в 4,5 раза ниже себестоимости добычи нефти.

Кроме того, газ по сравнению с другими видами топлива обладает еще и более высокой теплотворной способностью. Ниже для сравнения приводятся средние теплотворная способность различных видов топлива (в ккал/кг):

Газ	10 000—12 000	Уголь	8480
Бензин	10 000—11 500	Торф	2500
Мазут	10 000—11 000	Сланцы	1900
Керосин	10 000	Древесина	1800

Газообразное топливо каменного эффективнее твердого и жидкого топлива. При его сжигании в печах достигаются более высокие температуры, которые легко поддерживаются и регулируются в необходимых пределах. Газ применяется в стекловом, керамическом,

ческом и других производствах, требующих частого пламени без копоти.

Отсутствие копоти при сгорании уменьшает загрязнение воздушного бассейна промышленных городов и рабочих поселков, где газ используется как топливо для промышленных и коммунально-бытовых нужд.

Использование газа в качестве топлива значительно упрощает и удешевляет точечные устройства, повышает коэффициент полезного действия печей, ускоряет технологический процесс и улучшает качество продукции.

В быту газ позволяет экономить время и средства и облегчает труд миллионов советских граждан.

Применение газа в качестве моторного топлива для двигателей автомобилей и тракторов способствует повышению коэффициента полезного действия двигателей, увеличению их мощности и моторесурса, снижению расхода горючего.

Наряду с промышленным использованием газа в качестве источника энергии огромным достижением современной науки и техники является химическая переработка газов. Химические продукты стали необходимыми и незаменимыми во многих отраслях народного хозяйства: в машиностроении и энергетике, на транспорте и в строительстве, в легкой промышленности и в сельском хозяйстве. Поэтому немаловажно возросло значение газа как химического сырья.

Химическая переработка газов, возникшая всего 25—30 лет назад, уже сейчас обеспечивает выпуск почти 30% всей мировой химической продукции, а в ближайшие 10—15 лет как в нашей стране, так и за рубежом не менее 50% всех химических продуктов будет производиться из газа [7].

Значение газа как химического сырья состоит прежде всего в высоком содержании в нем углеводородов, взятые превращения которых обуславливают множество способов получения химических продуктов.

Большим преимуществом газа как химического сырья является возможность получения на его основе чистых исходных продуктов, что особенно важно в синтезе полимеров.

Народнохозяйственное значение химической переработки углеводородных газов заключается еще и в высвобождении больших количеств пищевого сырья, на основе которого долгое время базировалось производство ряда химических продуктов.

Одним из наиболее крупных потребителей углеводородных газов становится отрасль химической промышленности, обеспечивающая производство синтетического каучука.

Весьма эффективным выходом химической переработки углеводородных газов является производство сахаров, получаемых из них пор из пищевых продуктов: зерна и картофеля. Интересно отметить, что себестоимость синтетического спирта почти

в три раза ниже себестоимости спирта, получаемого из пищевого сырья.

Из всех используемых в промышленности горючих газов наибольшую ценность представляют собой природные и попутные газы.

Природные газы добываются из газовых месторождений. В их состав входит метан (до 97—98%), незначительное количество этана, пропана, бутана и высших углеводородов (1,5—2%), азот, углекислый газ и сероводород [8].

Природный газ в основном используется в качестве промышленного и бытового топлива (до 95,7% — по данным на 1965 г.). Остальная часть добытого газа идет на химическую переработку и на изготоление сажи.

Попутные газы являются побочным продуктом добычи нефти. Состав их весьма различен и зависит от типа месторождения и условий добычи нефти. Содержание метана в попутных газах составляет 31—73%; этана 1—23%, пропана 0,3—25%, бутана 2,5—10%, изобутана 0,2—10%, пентана 2—4%, изопентана 0,2—2,0% и тяжелых газов до 12% [8].

Примерное распределение попутных газов по статьям расхода в процентах (по данным на 1965 г.) выглядит следующим образом [8]:

Использование в качестве бытового и промышленного топлива	31,6
Химическая переработка	15,1
Изготоление высококалорийного бензина	10,2
Расход на другие цели	3,3

Как видно из приведенных данных, довольно большое количество попутных газов идет на нужды химической промышленности.

Серьезным препятствием к широкому использованию газа в промышленности и в быту являются трудности транспортировки его от места добычи к потребителю. Основной способ транспортировки газа — подача по газопроводам — обходится очень дорого. Прокладка газопроводов требует большого количества металла (~200 т/км), огромных капиталовложений (~70 тыс. руб./км) и больших затрат времени [36]. К тому же не везде можно проложить газопровод, особенно, если путь к потребителю проходит через моря и океаны. В связи с этим огромное количество газа сжигается или выбрасывается в атмосферу из-за невозможности использования на месте. Каждый год в Венесуэле, например, сжигается около 30 млрд. кубометров природного и попутного газов. Столько же газа сжигается ежегодно в странах Среднего Востока.

В то же время многие страны Западной Европы, Япония испытывают острую нехватку энергетического сырья, а бурно развивающейся химической промышленности этих стран все в большем количестве требуется углеводородное сырье, получаемое из природных и попутных газов.

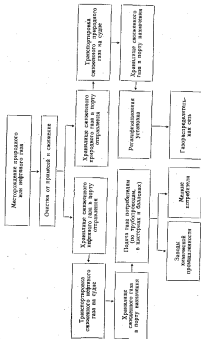


Рис. 1. Стадии провозимого газа от места добычи до потребителя.

Доставка газа потребителям независимо от их местонахождения становится возможной при переводе его в жидкое состояние. В этом случае газ может перевозиться в автомобильных, железнодорожных или судовых цистернах. При сжижении объем газа уменьшается в 250—600 раз. Сжижение пропана и бутана, входящих в качестве основных компонентов в состав попутного газа, можно осуществлять охлаждением до температуры кипения, повышением давления при обычной температуре или одновременно охлаждением и повышением давления (комбинированный способ). Сжижение метана, составляющего 75—98% природного и 30—70% попутного газа, возможно лишь при очень низкой температуре (порядка минус 160°С).

На рис. 1 показаны стадии, через которые проходит газ на пути от места добычи до потребителя.

Последние годы характеризуются значительным ростом производства и потребления сжиженных нефтяных газов (бутана и пропана) во всех странах (табл. 1).

Таблица 1
Рост потребления сжиженных нефтяных газов в различных странах (тыс. т)

Страны	Годы			
	1960	1968	1980	1982
США	7150	15 570	17 740	19 570
Франция	120	600	870	1 090
Япония	—	140	470	1 060
ФРГ	40	210	510	810
Италия	40	520	540	780
Мексика	—	410	580	740
Канада	60	370	420	600
Бразилия	—	230	350	500
Бельгия	20	190	280	360
Англия	40	90	160	300
Голландия	20	140	170	220
Дания	—	80	100	130
Аргентина	—	70	90	100
Прочие страны (Вост. ЦСР)	310	450	430	790
Всего	7860	19 080	22 420	27 050

Примерно 60% потребленного бутана и пропана производится из попутного нефтяного газа, 20% из природного газа и 20% при переработке нефти. При переработке одной тонны нефти, кроме нефтепродуктов, получают ~21 кг бутана и ~7 кг пропана.

Большая часть сжиженных нефтяных газов обычно идет на бытовые нужды, хотя в последние годы сильно возросло потребление этих газов в химической промышленности (табл. 2).

С ростом потребления сжиженных газов все большую роль приобретает транспорт, доставляющий эти газы потребителям.

Применение судов для перевозки сжиженных газов позволяет быстро освоить их месторождения, расположенные вблизи

водных путей, осуществлять широкую газификацию приморских городов и поселков (прокладка газопроводов, к которым экономически нецелесообразно из-за малого объема потребляемого газа), обеспечивать регулярные поставки газа в страны, имеющие выход к морю.

Таблица 2

Потребление сжиженных нефтяных газов за рубежом в 1950 и 1952 гг. (по статям расхода, врезульты)

Статьи расхода	США		Западная Европа		Япония
	1950	1952	1950	1952	1950
Бытовые нужды	58	42	94	51	75
Нужды земледельческой промышленности	31	40	2	19	22
Автотранспорт	4	11	—	3	—
Прочие расходы	7	7	4	27	3

Глава I

Развитие перевозок сжиженных газов

§ 1

Краткий очерк истории развития газопроводов и их классификация

Первые сведения о перевозках сжиженных газов морем относятся к 1929—1931 гг., когда компания Шелл временно переоборудовала танкер «Meraga» дедефитом около 11 тыс. м в судно для перевозки сжиженного газа и построила в Голландии судно «Agripa» дедефитом 4,5 тыс. м, предназначенное для одновременной перевозки нефти, сжиженного газа и серной кислоты.

На судне «Agripa» в 12 грузовых танках было установлено 12 вертикальных цилиндрических цистерн, выступающих над верхней палубой. Пространство в танках, не занятое цистернами, заполнялось нефтепродуктами. Главным двигателем служил дизель, позволявший судну развивать скорость около 13 узл. Танкер «Agripa» перевозил сжиженные газы с о. Кюрасао (Карибское море) в западноевропейские страны. Во время второй мировой войны это судно погибло.

Широкое развитие морские перевозки сжиженных газов получили лишь после окончания второй мировой войны. Первоначально для перевозок использовались суда, переоборудованные из танкеров или сухогрузных судов. Так, в 1947 г. был переоборудован танкер «Esso el Salvador» (рис. 2). Корпус танкера удлинили на 4,2 м и в 8 грузовых танках установили 8 горизонтальных цилиндрических цистерн длиной 6,1 м диаметром 4,5 м. Общая вместимость цистерн составляла 780 м³. Остаточное пространство в танках заполнялось нефтью. После переоборудования танкер имел следующие основные элементы:

Длина между перпендикулярами, м	77,7
Ширина, м	13,9
Осадка, м	4,5
Дедвейт	2570
Скорость хода, узл.	10,9

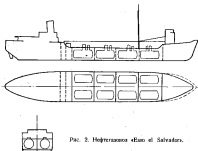


Рис. 2. Нефтеотсос «Esso el Salvador».

Судно «Esso el Salvador» эксплуатировалось в Карибском море [186].

В 1947—1949 гг. для норвежских судовладельцев было переоборудовано несколько сухогрузных судов в суда для перевозки сжиженных газов. Переоборудование заключалось в том, что в трюмах этих судов устанавливались вертикальные цилиндрические цистерны, горловины которых выводились на верхнюю палубу. Количество устанавливаемых в трюмах судна цистерн достигало 68. Примером может служить судно «Mindoga West» (рис. 3), переоборудованное в 1947 г. из американского стандартного сухогрузного судна типа CI-A постройки 1944 г. [190]. В трех носовых и двух кормовых трюмах судно установили 68 вертикальных цилиндрических цистерн общей вместимостью 6250 м³. Цистерны устанавливались по четыре в ряд. При этом две средние выступали над верхней палубой, а у бортовых на палубу выводились лишь горловины. Судно имеет следующие основные элементы:

Длина между персидскими шпанделями, м	119,0
Ширину, м	34,3
Осадка, м	7,5
Дедвейт, т	5440
Водоизмещение, т	11 900

Главным двигателем служит паровая турбина мощностью 4450 л. с., позволяющая судну развивать скорость хода 14 узл.

Круг стран, заинтересованных в развитии морских перевозок газа, из года в год расширялся. В 1952 г. во Франции в экспери-

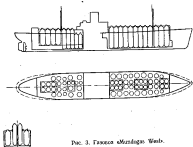


Рис. 3. Газовик «Mindoga West».

ментальных целях был переоборудован танкер «Shellphat» длиной около 3,5 тыс. м. В центральном трюме этого судна была установлена цилиндрическая цистерна для бутана. В 1962 г. на этом судне установили напорную цистерну для перевозки газа в охлажденном состоянии.

Первым специально спроектированным газовозом являлось построенное в 1953 г. в Швеции для датских судовладельцев судно «Rasmus Tholstrup» (рис. 4), которое имеет следующие основные элементы и характеристики [150]:

Длина между персидскими шпанделями, м	45,90
Ширину, м	10,10
Осадка, м	5,80
Дедвейт, т	445
Грузовместимость, м ³	670
Скорость хода эксплуатационная, узл.	10,5

Сжиженный газ перевозится на судне в 12 вертикальных цилиндрических цистернах, установленных в трюме в два ряда. Цистерны, диаметром 3,3 м и высотой 7,1 м, рассчитаны на давление 98 кг/см², толщина обшивки цистерн 34 мм.

Главный двигатель судна — дизель МАН максимальной мощностью 520 л. с. при 375 об/мин.

Первые газовозы как специальной постройки, так и переоборудованные из судов других типов, предназначались для перевозки сжиженных нефтяных газов (пропана и бутана) и аммиака в цистернах высокого давления. Накопленный опыт проектирования, постройки и эксплуатации первых газовозов позволил перейти

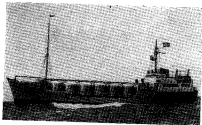


Рис. 4. Газовоз «Raisa Tholstrup».

к поискам наиболее выгодных способов транспортировки названных газов.

В 1959 г. во Франции был построен газовоз «Desarles» (рис. 5), перевозивший сжиженный газ в изолированных горизонтальных цилиндрических цистернах комбинированным способом, т. е. под небольшим давлением с соответствующим охлаждением [135].

В конце 1961 г. в Японии был построен газовоз «Bridgestone Maru» (рис. 6), предназначенный для перевозки сжиженного газа, охлажденного до температуры кипения, в восьми изолированных танках [129].

Перевозки метана, который может сохраняться в сжиженном состоянии лишь в условиях глубокого охлаждения (до минус 161°C), начались значительно позже, чем перевозки бутана, пропана и аммиака. Экономические и технические исследования возможности транспортировки метана в сжиженном виде на судах начались в 1950 г., когда американцами был разработан проект перевозки сжиженного метана в специальных баржах по р. Миссисипи из Луизианы к холодильникам скотобоен в Чикаго. В 1964 г. закончилась постройка первых двух барж. Однако разрешение на их эксплуатацию получено не было, и они в течение почти пяти лет использовались для проведения всевозможных экспериментов и испытаний по программе, включающей океанские перевозки сжиженного метана [99].

Проведенные исследования позволили выработать предварительные требования к конструкции судна, перевозивших газы при низкой температуре, и приступить к постройке экспериментального судна для перевозки сжиженного метана.

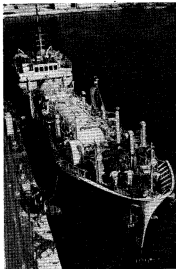


Рис. 5. Газовоз «Desarles».

В 1968 г. на верфи в г. Мобил (США) началось переоборудование сухогрузного судна «Norman» в судно для перевозки метана [196]. Переоборудование проводилось в соответствии с временными требованиями Береговой охраны США и было согласовано с Американским бюро судоходства и Английским Регистром Ллойд. Стоимость переоборудования судна составила около



Рис. 6. Газовоз «Bridgford Gasconne».

3 млн. долл. В начале 1969 г. первое судно для перевозки метана, получившее название «Methane Pioneer» (рис. 7), с грузом около 2000 т сжиженного газа на борту вышло в рейс из США в Англию. Судно совершило 7 опытных рейсов с грузом сжиженного метана (табл. 3).

В процессе переоборудования судна с целью увеличения его грузоподъемности была увеличена высота борта. Ухудшение начальной остойчивости из-за этого компенсировалось во время рейсов приемом водного балласта в цистерны двойного дна.

Сжиженный метан перевозился на судне в пяти изолированных цистернах из алюминисно-магниевого сплава, установленных в двух трюмах.

В феврале 1962 г. начались испытания французского экспериментального судна «Beauvais», переоборудованного из американского стандартного сухогрузного судна типа «Liberty» и предназначенного для опытных перевозок сжиженного метана [195].

Целью переоборудования являлась проверка в условиях эксплуатации различных конструктивных материалов, применяемых для изготовления цистерн, а также проверка различных теплоизоляционных материалов, насосов и т. п. На судне были установлены три цистерны — прямоугольной, цилиндрической и сложной формы (так называемой многодолевой). Общая емкость этих цистерн составила около 700 м³. Прямоугольная и цилиндрическая

цистерны были изготовлены из алюминисно-магниевого сплава AG-4, а многодолевая — из стали с 9%-ным содержанием никеля. В качестве изоляции испытывались различные напыляемые и пористые материалы, бальзовое дерево и асбест.

После завершения экспериментальных работ во Франции и в Англии началось строительство металловозов.

В Советском Союзе перевозки сжиженного газа начались в декабре 1960 г., когда в первый рейс вышел танкер «Фрунзе», переоборудованный для одновременной перевозки нефти и аммиака [20]. Переоборудование танкера заключалось в установке на палубе железнодорожных цистерн для аммиака, закрепленных на специальных фундаментах с осадками.

Танкер «Фрунзе» является серийным танкером типа «Казбек» и имеет следующие основные элементы:

Длина между перес.	
Государства, м . . .	138,0
Ширину, м	19,2
Высоту борта, м . . .	10,4
Осадка, м	8,5
Мощность главных двигателей, л. с. . .	4000
Скорость хода, узл. .	13,0



Рис. 7. Первое экспериментальное судно для перевозки метана «Methane Pioneer».

Железнодорожные цистерны для аммиака в количестве 21 ед. размещены на судне тремя группами. Первую группу разместили в нос от средней рубки, вторую и третью — в корму. В связи с установкой цистерн непосредственно на палубо-надпалубный борт судна был увеличен до 3,0 м (против 1,9 м у одностанных танкеров, перевозящих нефть и нефтепродукты) и установлен неизменным как для зимних, так и для летних условий. Суммарный вес цистерн составил 420 т. Для нормальной дифференциации и обеспечения судну достаточной остойчивости в носовой балластный отсек принято 110 т постоянного балласта. Дедейт и грузоподъемность танкера «Фрунзе» в процессе переоборудования изменялись следующим образом:

	До переоборудования	После переоборудования
Дедейт, м	11 800	9490
Грузоподъемность, м	10 200	7000
по нефти	—	580—588
по аммиаку	—	—

Таблица 3

Результаты первых сплн рейсов экспериментального метановоза «Мейхан Ригель»

Номер рейса	Продолжительность рейса, сут.	Средняя скорость, узл.	Время рейса, сут. 1/2	Количество перевезенного метана, т	Количество сжиженного метана, т	Среднее давление, атм.
1	5064 5238	9,42 8,80	•	2234 86	— 2105	0,450 —
2	4919 5083	9,87 9,77	18	2234 130	1532 1500	0,450 —
3	4637 4768	10,33 9,52	13	2205 —	920 2100	0,449 —
4	4925 5183	10,60 10,56	12	2218 153	960 916	0,474 —
5	4899 5310	10,08 10,50	12	2228 184	917 917	0,490 —
6	5329 5590	9,35 9,19	27	1835 60	1353 2095	0,536 —
7	4965 5224	10,32 10,30	16	1257 —	895 1480	0,490 —

Установленные на судне цистерны, характеризуются следующими данными:

Длина, м	2660
Диаметр, мм	2600
Толщина стенки, мм	26
Рабочее давление, кг/см ²	20
Пробное гидравлическое давление, кг/см ²	30
Емкость, м ³	51
Вес, т	29

В каждую цистерну можно принять 25—28 т жидкого аммиака.

Первые специализированные газовозы «Кегуи» и «Красная» (рис. 8), построенные по заказу Советского Союза в Японии, вступили в строй в 1965 г. Каждое судно перевозит в четырех сферических цистернах примерно по 1000 т сжиженных газов (пропана и бутана) 151.

К настоящему времени сформировались три основных типа судов для перевозки сжиженных нефтяных газов и аммиака, а именно:

— с прочными цистернами, рассчитанными на перевозку газа, сжиженного путем повышения давления при нормальной температуре;

— с изолированными цистернами, рассчитанными на перевозку газа, сжиженного путем некоторого понижения давления с соответствующим охлаждением;

— с изолированными цистернами, рассчитанными на перевозку газа, сжиженного путем охлаждения до температуры кипения при нормальном давлении.

Суда для перевозки сжиженного бутана и пропана, а также метана обычно объединяют под общим названием «Суда для перевозки сжиженных нефтяных газов» (Liquid Petroleum Gas—LPG—carriers), так как физико-химические свойства аммиака, хотя он и не входит в состав попутных нефтяных газов, близки к свойствам пропана и бутана.

По форме устанавливаемых на судно цистерн газовозы могут быть разделены на суда, оборудованные цилиндрическими, сферическими и прямоугольными цистернами.

Поскольку природный газ представляет собой в основном метан (содержание до 98%), то и суда для перевозки метана обычно называют судами для перевозки сжиженного природного газа (Liquid Natural Gas—LNG—carriers). К этим же судам можно отнести суда для перевозки сжиженного этана и этилена, т. е. их свойства довольно близки к свойствам метана.

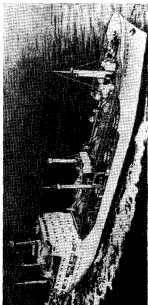


Рис. 8. Танкер «Хусавик».

Перевозки сжиженных газов морем

Развитие морских перевозок сжиженных газов непосредственно связано с ростом их производства и потребления. В 1962 г. производство сжиженных нефтяных газов по всему миру (без СССР) достигло 30 млн. т, т. е. увеличилось по сравнению с 1950 г. почти в 4 раза. Расширяется значение торговли сжиженными газами. Основными мировыми экспортёрами газа являются США, ФРГ, Голландия, Франция. Данные об экспорте сжиженных газов этими странами приведены в табл. 4.

Свыше 90% сжиженных нефтяных газов, экспортируемых из США в 1962 г., направлялось в Мексику и Канаду в основном по трубопроводам, а также в железнодорожных и автомобильных цистернах. Оставшаяся часть экспортируемого газа (в количестве примерно 13 тыс. т) транспортировалась морем в Аргентину, ФРГ, Италию, Англию и Японию.

Франция примерно 60% экспортируемых сжиженных нефтяных газов (~160 тыс. т) направляет морским путем в Алжир и другие африканские страны.

Основными мировыми импортёрами сжиженных нефтяных газов являются Бельгия, США, Япония, Дания и Голландия. В табл. 5 приведены данные об импорте сжиженных газов этими странами.

Морской транспорт уже в настоящее время играет большую роль в снабжении некоторых стран газом. В первую очередь это относится к скандинавским странам (в силу их географического

Таблица 4

Экспорт сжиженных нефтяных газов некоторыми капиталистическими странами (в тыс. т)

Страны	Годы		
	1961	1960	1962
США	246	258	334
ФРГ	110	184	226
Голландия	125	133	177
Франция	97	136	172
Бельгия	16	21	28
Италия	10	14	17
Прочие страны	46	94	134

Таблица 5

Импорт сжиженных нефтяных газов некоторыми капиталистическими странами (в тыс. т)

Страны	Годы		
	1961	1960	1962
Бельгия	122	157	246
США	—	141	194
Япония	14	50	124
Дания	72	88	92
Голландия	36	58	64
Франция	—	30	32
Италия	53	36	32
ФРГ	36	17	26

возложений). Например, почти весь потребляемый в Дании газ (~100 тыс. т) импортируется морем, причем стоимость его самая низкая в Европе.

В Европе на морских перевозках сжиженных нефтяных газов специализируется ряд компаний, в частности, датская Косвагаз, итальянские — Сипм и Отенгаз и норвежская — Лоренцен.

Большое количество сжиженных газов возится морским путем в Японию. В 1962 г. импорт газа в Японию составил 124 тыс. т, или 11,4% всего потребляемого в этой стране газа. В 1963 г. импорт газа морем возрос до 230 тыс. т (~16% всего потребляемого газа), а в 1965 г. составил ~600 тыс. т. По предварительной оценке импорт сжиженных газов в Японию уже в 1967 г. превысит 1 млн. т, а в 1970 г. — 1,5 млн. т. Доля анимозного в Японию газа морским путем в общем объеме потребляемого газа также увеличится и достигнет в 1970 г. ~23%.

Сжиженный нефтяной газ доставляется в Японию из Персидского залива несколькими крупными судами-газовозами. Одно из них — судно «Shigouma Maru» — имеет грузоподъемность более 46 000 м³. Газовозы курсируют между портами Саудовской Аравии (Рас-Танура) и Кувейта (Мена-эль-Ахмада), в которых построены заводы по сжижению газа, и крупными базами сжиженного газа в японских портах Кавасаки и Токио. Сооружение завода по сжижению нефтяных газов (бутана и пропана) путем охлаждения до температуры кипения в Рас-Тануре в 1962 г. обошлось примерно в 7,5 млн. долл. Его производительность составляет 200 м пропана и 220 м бутана в сутки. Завод располагает шестью изотермическими резервуарами для хранения сжиженных газов при пониженной температуре. Перекачка газа из суда осуществляется по изолированному трубопроводу длиной 1370 м и диаметром 56 см. Интенсивность потока равна 800 м пропана в час. Аналогичный завод, построенный в 1961 г. в Мена-эль-Ахмаде, производит 250 м пропана в сутки. Для хранения сжиженных газов на заводе используются два сферических резервуара емкостью по ~10 тыс. м³, изготовленных из высокопрочной стали (с пределом текучести 70 кг/мм²).

В порту Кавасаки построено три базы сжиженного газа. Первая имеет три изотермических хранилища вместимостью по 12 тыс. м и шесть цистерн для хранения газа под давлением вместимостью 20—200 м; на второй базе — два изотермических хранилища на 700 и 3500 м и четыре цистерны высокого давления вместимостью от 100 до 500 м. На третьей базе (сооружение которой обошлось в 2,22 млн. долл.) установлено два изотермических хранилища емкостью по 5000 м и восемь цистерн для хранения газа под давлением вместимостью от 100 до 200 м. На базе в порту Токио оборудовано два изотермических хранилища на 7000 и 5000 м и установлены две цистерны высокого давления вместимостью по 300 м. Из цистерн высокого давления газ подается на



Рис. 9. Основные направления перевозок сжиженного газа морскими судами.

небольшие суда-газовозы, осуществляющие перевозки газа под давлением между японскими портами. В этих перевозках участвуют суда грузоподъемностью от 70 до 500 м.

Основные направления транспортировки газов морем показаны на рис. 9.

Перевозки сжиженного природного газа (метана), как уже упоминалось, осуществлялись в опытных порядках в 1959 г. По ориентировочным данным, в 1970 г. западноевропейским странам может быть продано ~82 млрд. кубометров газа, в Японию — 26 млрд. кубометров. Ожидается, что доля природного газа в топливно-энергетическом балансе стран Западной Европы к этому времени достигнет 10% [191], [119]. Одна треть требуемого количества газа в сжиженном виде будет доставляться в Европу на судах. В Англию, например, начиная с 1964 г., возмется ежегодно около 700 тыс. т метана. Это количество покрывает более 10% потребности страны в газовом топливе [107], [118]. В настоящее время сжиженный метан доставляют в Англию из Алжира, причем перевозки осуществляют двумя судами грузоподъемностью по 1 000 т.

Франция ввозит из Алжира ежегодно около 350 тыс. т сжиженного метана. Перевозки осуществляются одним судном грузоподъемностью около 10 000 м. Для приема газа в Гавре сооружены пять подземных хранилищ емкостью по 10 тыс. м³, а также уста-

новка для перевода газа из сжиженного в газообразное состояние [107], [191].

Большой интерес проявляется и перевозкам сжиженного метана в Японии. Так, Токийская газовая компания намечает с 1967 г. вывозить из США в Японию ежегодно 400—450 тыс. м сжиженного метана. Компания предполагает построить для себя специальное судно-метановоз. С этой целью решено ассессорам изучить опыт постройки и эксплуатации первых французских и английских метановозов.

К 1 июля 1966 г. мировой флот судов, перевозящих сжиженные газы, достиг 139 единиц. Суммарная вместимость цистерн для газа на этих судах составила около 540 тыс. м³. В табл. 6 показано распределение мирового флота газозов по странам [22].

Наибольший по грузоместимости флот газозов имеет Япония, у которой еще в 1969 г. вообще не было специализированных судов для перевозки газа. Только три японских газовоза переоборудованы из танкеров, остальные газозоны специально спроектированы и построены с учетом их назначения.

Английский флот газозов значительно увеличил свою грузоместимость за счет двух судов специальной постройки, сданных в эксплуатацию в 1964 г.

В составе флота газозов Франция находится одно из крупнейших специализированных судов — метановоз «Jules Verne» грузоместимостью более 25 тыс. м³.

Норвежский флот газозов состоит в основном из переоборудованных старых сухогрузных и наливных судов. Лишь в последние годы торговый флот Норвегии пополнился такими специально спроектированными газозонами как «Mundogas Brasilia», «Gaston Micaud», «Nordform» и др.

Под флагом Панамы плавают одна из крупнейших нефтегазовозов мира «Esso Puerto Rico» грузоместимостью около 13 тыс. м³, построенный в 1969 г.

Торговый флот Бразилии пополнился в 1963 г. тремя построенными в Японии газозонами грузоместимостью по 4 тыс. м³.

Датский флот газозов состоит в основном из небольших судов специальной постройки, имеющих цистерны вместимостью до 2 тыс. м³.

Из 139 находящихся к 1 июля 1965 г. в эксплуатации газозов 98 относились к судам специальной постройки, а 41 газозов был переоборудован из наливных и сухогрузных судов. Среди газозов только шесть («Methane Princess», «Methane Progress»,

* При анализе флота газозов правительственные оперировать вместимостью цистерн для газа, а не наливной вместимостью судна или его декейта. Дело в том, что среди газозовых имеются суда, переоборудованные с газа и нефти. Кроме того, некоторая часть газозов переоборудована из судов другого назначения и потому их наливная вместимость значительно уступает специально спроектированным судам.

Таблица 6

Распределение мирового флота газозов по странам

Страна	По состоянию на 1 января					
	1959 г.	1962 г.	1963 г.	1964 г.	1965 г.	1966 г. (по 1 июля)
	количество судов, тыс. м ³	количество судов, тыс. м ³	количество судов, тыс. м ³	количество судов, тыс. м ³	количество судов, тыс. м ³	количество судов, тыс. м ³
Япония	—	—	6	16	68,6	105,0
Англия	—	—	1	3	16,1	23,3
Франция	—	—	1	3	32,3	60,8
Норвегия	—	—	10	25	62,0	99,5
Панама	—	—	6	22	38,6	58,3
Швейцария	—	—	1	1	1,1	25,9
США	—	—	—	—	—	25,4
Бразилия	—	—	3	6	39,0	19,0
Испания	—	—	3	1	1,2	16,2
Нидерланды	—	—	3	3	35,5	3
Дания	—	—	10	18	39,8	11,9
Италия	—	—	7	10	8,3	9,7
Дания	—	—	3	3	6,0	3,3
Дания	—	—	3	3	5,4	5,4
СССР	—	—	—	—	—	—
Аргентина	—	—	—	—	1,2	1,2
Греция	—	—	—	—	0,5	0,5
Греция	—	—	—	—	0,4	0,4
Всего	48	96	354,9	101	271,2	471,0
						139

«Jules Verne», «Pythagore», «Methane Pioneer» и «Beauvais») могут перевозить сжиженный метан, а остальные 133 судна предназначены для перевозки сжиженных нефтяных газов и аммиака. Из общего количества газозвон 119 могут транспортировать только сжиженный газ, 19 перевозят газ и нефть, а одно судно, кроме цистерн для газа, имеет сухогрузный трюм. Большинство газозвон во всех странах (60% по числу судов и около 80% по суммарной грузоподъемности) построено за последние пять лет (табл. 7).

Ниже приводится распределение газозвон по вместимости цистерн для сжиженного газа (по состоянию на 1 июля 1965 г.)

Вместимость цистерн для газа, м³	Количество судов со вместимостью от 0 до 2 тыс. м³ (в процентах от общего количества)
До 250	14 (10,0)
250—500	9 (6,5)
501—1000	33 (23,8)
1001—2000	24 (17,3)
2001—5000	31 (22,3)
5001—10 000	16 (11,5)
10 001 и более	17 (12,0)

Всего . . . 139 (100,0)

Как видно, около 60% газозвон имеет вместимость цистерн для газа менее 2 тыс. м³.

В табл. 8 приведены данные о распределении газозвон по скорости хода. Разброс скоростей в широких пределах (от 8 до 17 узл.) объясняется большим различием в размерах газозвон — от судов длиной 23 м и грузоподъемностью 40 м до судов длиной 190 м и грузоподъемностью более 20 тыс. т.

Таблица 7

Распределение мирового флота газозвон по возрастному составу

Время постройки (годы)	Количество судов		Средняя вместимость цистерн для газа	
	количество	% от общего числа	тыс. м³	% от общей вместимости
До 1953	15	10,8	44,8	8,3
1953—1955	13	9,4	12,1	2,2
1957—1960	27	19,5	52,1	9,7
1961—1965	84	60,3	427,7	79,8
Всего	139	100,0	536,7	100,0

На 118 газозвон в качестве главных двигателей используются дизели, а на остальных — паровые турбины, паровые машины и турбоэлектрические установки. Силовые установки последних двух типов сохраняются на газозвон, переоборудованных из старых сухогрузных и наливных судов.

Таблица 8

Распределение мирового флота газозвон по скорости хода

Вместимость цистерн для газа, м³	Скорость хода, узл.										Общая вместимость судов, тыс. м³
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
До 250	1	4	1	—	—	—	—	—	—	—	6
250—500	—	5	3	—	—	—	—	—	—	—	8
501—1000	—	2	25	9	3	—	—	—	—	—	30
1001—2000	—	1	3	8	11	2	—	—	—	—	29
2001—5000	—	—	—	4	7	11	6	—	—	—	28
5001—10 000	—	1	2	1	2	3	4	2	—	—	15
10 000 и более	—	—	—	—	—	—	1	3	3	5	12
Всего	1	12	24	17	25	35	11	5	3	5	119

Примечание: В таблице не учтены 29 газозвон, скорость которых выше 17 узлов.

Общие вопросы проектирования газовозов

§ 3

Физико-химические свойства газов

Газы по своим свойствам резко отличаются от любых других грузов, перевозимых на морских судах. Их свойства оказывают большое влияние на выбор элементов судна и его архитектурно-конструктивного типа.

В табл. 9 приведены основные физико-химические свойства газов, транспортировка которых осуществляется в настоящее время морем. В месте с углеводородными газами (метаном, этаном, пропаном, бутаном и т. п.) в таблице приведены свойства аммиака. По целому ряду свойств аммиак близок к некоторым углеводородным газам, в частности к бутану и пропану. Поэтому суда, для перевозки бутана и пропана могут перевозить аммиак.

Сжижаемые газы являются насыщенными (кипящими) жидкостями, у которых давление паров изменяется в зависимости от температуры жидкой фазы. Упругость (давление) паров является одной из важнейших характеристик газа, по которой определяется расчетное давление, необходимое для конструирования грузовых цистерн. Упругость газов является величиной строго определенной для данной температуры. На рис. 10 показана зависимость упругости насыщенных паров некоторых газов от температуры.

Для определения параметров состояния газа в любых условиях существуют специальные диаграммы состояния (1171, 1331, 1351). По этим диаграммам можно определить упругость (давление) паров при различной температуре, удельный объем и удельный вес жидкой и газообразной фаз, теплоту парообразования, теплоемкость жидкости и пара, температуру газа при сжатии, эффект охлаждения жидкости и газа при снижении давления (дросселировании) и т. п.

Важной характеристикой газа, влияющей на выбор вместимости цистерн, является его удельный вес. Большое значение имеет

Таблица 9
Основные физико-химические характеристики некоторых газов, перевозка которых осуществляется морским путем

Физико-химические характеристики	Углеводородные газы					Аммиак (NH ₃)
	метан (CH ₄)	этан (C ₂ H ₆)	пропан (C ₃ H ₈)	бутан (C ₄ H ₁₀)	изобутан (C ₄ H ₁₀)	
Относительный удельный вес	0,554	1,000	1,522	1,882	2,054	0,600
Относительный объем газа к объему жидкости при температуре кипения и нормальном атмосферном давлении	413	254	340	272	220	820
Удельный вес жидкости при температуре кипения и нормальном атмосферном давлении	0,416	0,544	0,566	0,566	0,594	0,620
Температура кипения при нормальном атмосферном давлении, °C	-161,6	-88,3	-102,7	-62,1	-0,6	-33,4
Критическая температура, °C	-82,1	32,3	9,7	66,8	152,0	133,7
Критическое давление, кг/см ²	45,8	48,2	50,9	42,3	34,5	38,3
Объемная теплота сгорания при нормальном атмосферном давлении, ккал/м ³	122	116	115	105	93	328
Нижняя теплота сгорания, ккал/м ³	11 690	11 260	11 190	10 970	10 850	10 850
Температура воспламенения, °C	640	508	485	310	475	490
Температура воспламенения газа в смеси с воздухом при 0° C	110	136	100	195	95	190
и нормальном атмосферном давлении, при котором сгорание является беспламенным, °C	5,3105,0	3,2125,5	3,2104,0	2,3192,5	1,618,4	1,618,4
Температура воспламенения газа в смеси с воздухом при 0° C	110	136	100	195	95	190
и нормальном атмосферном давлении, при котором сгорание является беспламенным, °C	5,3105,0	3,2125,5	3,2104,0	2,3192,5	1,618,4	1,618,4

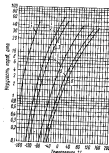


Рис. 10. Зависимость упругости паров метана (1), этилена (2), азота (3), пропана (4), изобутана (5) и бутана (6) от температуры.

В табл. 9 указано еще несколько физико-химических характеристик газов, которые необходимо учитывать при проектировании или эксплуатации судов-газовозов. В частности, указана теплоемкость газа, знание которой необходимо для определения характеристик регазификационных установок и продолжительности нагрева или охлаждения цистерн при изменении температуры внешней среды. Зависимости теплоемкостей некоторых газов от температуры и давления приводятся в работе [17]. Теплота парообразования, т. е. количество тепла, затраченное на испарение 1 кг жидкости, определяет скорость испарения газа на противотопки рейсы.

Приведенные в табл. 9 данные по теплоте сгорания и октановым числам характеризуют сжиженные газы как высококачественные топлива для судовых двигателей.

§ 4

Выбор способа транспортировки газа

Способ транспортировки сжиженных газов на судах определяется их физико-химическими свойствами. Поскольку, например, метан может сохраняться в сжиженном состоянии лишь при



Рис. 11. Изменение удельного веса бутана (1), изобутана (2), пропана (3) и азота (4) в зависимости от температуры.

также отношении удельного веса газа к удельному весу воздуха, называемому относительным удельным весом газа (табл. 9). Особенностью сжиженных газов является то, что их удельный вес значительно меняется с температурой (рис. 11) в отличие от большинства обычных жидкостей, которые при изменении температуры почти не изменяют своего удельного веса.

чрезвычайно низкой температуре (около минус 160° С), перевозка его должна осуществляться в условиях глубокого охлаждения.

При проектировании судов, предназначенных для транспортировки сжиженных нефтяных газов и аммиака, правильный выбор способа перевозки газов представляет собой серьезную проблему. Дело в том, что этот выбор зависит от целого ряда технических и экономических факторов, связанных не только с размерами и конструкцией судна, но и с условиями хранения сжиженного газа на берегу. В частности, от того, насколько соответствуют условиям хранения газа на берегу условиям перевозки его на судне, зависят продолжительность грузовых работ, а следовательно, и годная производительность судна. Французский специалист Далоом показал, что в случае хранения сжиженного газа на берегу при температуре плюс 35° С и высоком давлении (~ 15–16 атм), суда, перевозившие газ в изолированных цистернах при пониженном давлении, оказываются в невыгодном положении [49]. Чтобы погрузить газ на эти суда, приходится с помощью береговой или судовой рефрижераторной установки приводить температуру и давление газа, хранящегося на берегу, в соответствие с условиями перевозки его на судне. Последнее вызывает увеличение стоимостного арзеса этих судов по сравнению с судами, перевозившими газ в цистернах высокого давления.

На рис. 12 в качестве примера показана зависимость тепла погружки пропана от его температуры в береговых хранилищах, приведенная Шарраком [111]. В связи с различием условий хранения сжиженного газа на берегу грузовые системы судов часто приспособляют для приема сжиженного газа, имеющего разную температуру и давление. Примером может служить газовоз «Gaston Micaud» (табл. 32). Хотя цистерны этого судна рассчитаны на перевозку сжиженного газа при температуре, не превышающей плюс 25° С (соответствующей давлению пропана 9 кгс/см²), на судно можно принимать газы, хранящиеся на берегу при самых разнообразных температурных условиях [134]. При этом будет изменяться лишь темп грузовых работ.

При погрузке пропана, имеющего температуру выше плюс 25° С, он поступает в цистерны после соответствующего охлаждения заборной водой в сжиженном давлении до величины, не превышающей расчетную. В случае погрузки пропана охла-



Рис. 12. Зависимость тепла погружки пропана на судно, перевозившее сжиженный газ при температуре плюс 35° С и давлении 6,5 атм, от температуры газа в береговых хранилищах (при постоянной величине электрической мощности 100 кВт).

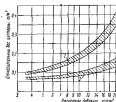


Рис. 13. Зависимость относительного веса цистерны от расчетного давления.

1 — танк; 2 — цистерна.

увеличивается с понижением его температуры, объем цистерны у судов, перевозящих газ при пониженной температуре, при заданной грузоподъемности будет меньше, чем у судов, перевозящих газ под давлением. Кроме того, из-за уменьшения расчетного давления газа снижались вес цистерны (рис. 13). Цистерна для пропана вместимостью 1000 м³, рассчитанная на перевозку сжиженного газа только под давлением, весит около 300 т. Цистерна такой же емкости предназначенная для транспортировки газа под давлением с одновременным охлаждением до плюс 5° С, весит только 120 т и стоит примерно на 40% меньше.

Выбору целесообразного способа транспортировки сжиженного газа на судах посвящено много статей, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе [25], [49], [122]. В частности, уже упоминавшийся Аллом при выборе способа транспортировки сжиженного газа рассматривал суда двух типов, а именно: суда, предназначенные для перевозки газа под давлением при максимальной температуре плюс 45° С, и суда, предназначенные для перевозки газа под давлением с охлаждением до температуры плюс 5° С.

Отношение общей емкости цистерны судна, предназначенного для перевозки газов под давлением с охлаждением ($V_{жж}$), к общей емкости цистерны судна, предназначенного для перевозки газов под давлением ($V_{газ}$), выражается зависимостью

$$\frac{V_{жж}}{V_{газ}} = \frac{d_{жж}}{d_{газ}}, \quad (1)$$

где $d_{жж}$ и $d_{газ}$ — удельный вес жидкого пропана при температуре 45° и 5° С, равный соответственно 0,47 и 0,52 г/см³.

денного до минус 42° С, он приблизительно обеспечивается в оборудованной с насосом отделении судна теплообменной установкой.

Для пропана темп погружки зависит от его температуры следующим образом:

Температура, °С . . . 40 35 30 27
Темп погружки, м/час 50 63 90 119

Суда, перевозящие газ при пониженной температуре и небольшом давлении, имеют ряд преимуществ перед судами, транспортирующими газ в цистернах высокого давления. В связи с тем, что удельный вес сжиженного газа увеличивается с понижением его температуры, объем цистерны у судов, перевозящих газ при пониженной температуре, при заданной грузоподъемности будет меньше, чем у судов, перевозящих газ под давлением. Кроме того, из-за уменьшения расчетного давления газа снижались вес цистерны (рис. 13). Цистерна для пропана вместимостью 1000 м³, рассчитанная на перевозку сжиженного газа только под давлением, весит около 300 т. Цистерна такой же емкости предназначенная для транспортировки газа под давлением с одновременным охлаждением до плюс 5° С, весит только 120 т и стоит примерно на 40% меньше.

Выбору целесообразного способа транспортировки сжиженного газа на судах посвящено много статей, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе [25], [49], [122]. В частности, уже упоминавшийся Аллом при выборе способа транспортировки сжиженного газа рассматривал суда двух типов, а именно: суда, предназначенные для перевозки газа под давлением при максимальной температуре плюс 45° С, и суда, предназначенные для перевозки газа под давлением с охлаждением до температуры плюс 5° С.

Отношение общей емкости цистерны судна, предназначенного для перевозки газов под давлением с охлаждением ($V_{жж}$), к общей емкости цистерны судна, предназначенного для перевозки газов под давлением ($V_{газ}$), выражается зависимостью

$$\frac{V_{жж}}{V_{газ}} = \frac{d_{жж}}{d_{газ}}, \quad (1)$$

где $d_{жж}$ и $d_{газ}$ — удельный вес жидкого пропана при температуре 45° и 5° С, равный соответственно 0,47 и 0,52 г/см³.

С учетом этого $\frac{V_{жж}}{V_{газ}} = 0,9$, т. е. емкость цистерны судна, предназначенного для перевозки газа под давлением с охлаждением, составляет примерно 90% емкости цистерны судна, предназначенного для перевозки газа под давлением.

Сравнивая собственный вес цистерны ($B_{жж}$ и $B_{газ}$), имеющих одинаковую форму (вертикальные цилиндрические) и изготовленных из одинаковой стали, и считая, что толщина стенки цистерны пропорциональна работе давления, получаем

$$\frac{B_{жж}}{B_{газ}} = (0,9)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{P_{жж}}{P_{газ}}, \quad (2)$$

где $P_{жж}$ и $P_{газ}$ — рабочее давление в цистернах судна, предназначенного для перевозки газа соответственно под давлением с охлаждением и только под давлением.

В рассматриваемом случае $\frac{B_{жж}}{B_{газ}} = 2,37$, с учетом же веса набора цистерн, внутренних переборок и т. д. $\frac{B_{жж}}{B_{газ}} = 1,95 \div 2,00$.

Таким образом, вес цистерны для перевозки газа под давлением с охлаждением приблизительно в два раза меньше веса цистерны для перевозки газа только под давлением.

Затраты на изготовление цистерн, предназначенных для перевозки сжиженного газа, охлажденного до плюс 5° С, на 35—45% меньше затрат на цистерны высокого давления.

При одинаковой грузоподъемности размеры и стоимость самого судна для перевозки газа под давлением с охлаждением будут значительно меньше по сравнению с судном для перевозки газа только под давлением. Однако для охлаждения газов требуется холодильная установка, мощные компрессоры, конденсаторы, дополнительная арматура, большая мощность судовой электростанции и т. д. Все это может привести даже к некоторому возрастанию стоимости судна для перевозки газа под давлением с охлаждением.

Исследование способов транспортировки газа морским путем Аллом проводил для судов, имеющих чистую грузоподъемность 500 и 2500 т. Принималось, что сжиженный газ хранится на берегу при температуре плюс 38° С. Предполагалась эксплуатационный период равный 335 суткам, Аллом определял провозоспособность судов (табл. 10) и их экономические показатели для рейсов продолжительностью 8 и 4 суток.

Из табл. 10 видно, что годовая провозоспособность судна для перевозки газа только под давлением на 8—15% выше годовой провозоспособности судна для перевозки газа под давлением с одновременным охлаждением.

Сравнительные расчеты себестоимости перевозки морским путем одной тонны сжиженного газа показали, что суда для перевозки газа под давлением с одновременным охлаждением до

плюс 5° С могут соперничать с судами, перевозящими газ только под давлением лишь при грузоподъемности свыше 2500 т. Однако эта «критическая» грузоподъемность может изменяться в значительных пределах в зависимости от продолжительности рейса и принятого срока окупности судна. При определенных условиях величина «критической» грузоподъемности возрастает вдвое.

Проведенные Аллоном исследования позволили ему сделать следующие выводы:

— морские перевозки сжиженного газа в цистернах высокого давления (т. е. без охлаждения) экономически целесообразны лишь на судах небольших размеров. Максимальная грузоподъемность этих судов, как правило, не должна превышать 500 т;

— суда, перевозящие сжиженный газ под давлением с охлаждением до температуры плюс 5° С, могут конкурировать с судами, перевозящими газ только под давлением при грузоподъемности более 2500 т. При охлаждении газа до указанной температуры цистерны для бутана можно не изолировать, так как даже при температуре плюс 45° С давление паров бутана не превышает 6,5 кг/см². В случае установки на судне горизонтальных цилиндрических цистерн, цистерны для бутана размещаются на верхней палубе. Цистерны же для пропана изолируются и размещаются в трюмах;

— в процессе проектирования судов грузоподъемностью 500—2500 т при выборе расчетного давления в грузовых цистер-

Таблица IV

Сравнительные эксплуатационные и экономические показатели судов, транспортирующих сжиженный газ под давлением с охлаждением, и только под давлением

Характеристики	Рейс	Грузоподъемность судна, т			
		500		2500	
		перевозка газа под давлением с охлаждением	перевозка газа только под давлением	перевозка газа под давлением с охлаждением	перевозка газа только под давлением
Холодное время, суток	A	36,00	36,00	16,00	16,00
Стоимое время, суток	B	4,00 2,66	4,00 1,25	8,00 3,33	8,00 1,33
Общая провозная способность рейса, суток	A	18,66	17,25	10,25	17,50
	B	10,66	9,25	11,33	9,50
Количество рейсов в год	A	18,00	19,4	17,4	19,1
	B	31,2	36,1	29,8	35,2
Годовая провозная способность, т	A	9 000	6700	43 500	47 750
	B	15 600	18 900	74 500	85 000

нах следует учитывать температурные условия района эксплуатации. Так, для северных стран Европы, где температура воздуха редко поднимается выше плюс 25° С за расчетное давление целесообразно принимать давление паров пропана при указанной температуре, т. е. ~9 кг/см². Таким образом, суда, предназначенные для эксплуатации в северных районах Европы, будут иметь цистерны, рассчитанные на несколько пониженное давление. Эти суда, благодаря отмеченному обстоятельству, совместят в себе преимущества газозисов с цистернами высокого давления и газозисов, транспортирующих газ в изолированных цистернах под небольшим давлением. Поскольку условия хранения газа на берегу соответствуют условиям его транспортировки на таких судах, их стоимостное время не увеличится, а вес и стоимость грузовых цистерн уменьшится.

Выводы Аллона, конечно, не могут быть распространены на все разнообразие условий эксплуатации газозисов, поэтому вопрос о целесообразном способе перевозки газа должен рассматриваться в каждом случае отдельно.

Перевозка газа в охлажденном состоянии при атмосферном или близком к нему давлении требует оборудования портов отправления специальными установками для сжижения газа путем охлаждения, а также изолированными цистернами для хранения сжиженного газа и изолированными трубопроводами для его перекачки на судно. Затраты на это дополнительное оборудование могут окупиться лишь при больших грузопотоках газа. Поэтому суда, предназначенные для перевозки газа в охлажденном состоянии при атмосферном или близком к нему давлении, имеют большую грузоподъемность. Следует отметить, что перевозка газа таким способом отличается от других способов целым рядом преимуществ. В частности, на газозисах в этом случае лучше используется кубатура трюма, так как изолированными цистернами, находящимися под нормальным давлением, можно придавать форму, в наибольшей степени соответствующую обводам корпуса судна. Кроме того, удельный вес сжиженного газа при температуре кипения больше удельного веса газа, находящегося в сжиженном состоянии под давлением. Поэтому при той же вместимости цистерн грузоподъемность судна, перевозящего газ в охлажденном состоянии, будет больше грузоподъемности судна, перевозящего газ под давлением.

Для оценки целесообразности перевозки больших количеств сжиженного газа в изолированных цистернах при температуре кипения компания Везер (ФРГ) провела подробное исследование [122], объектом которого было построенное в 1958 г. судно для односторонней перевозки нефти и газа «Esso Puerto Rico» (рис. 14).

Это судно имеет 58 вертикальных и горизонтальных цилиндрических цистерн для газа общей емкостью около 12 800 м³. Нефть перевозится в грузовых танках общей емкостью 33 600 м³.

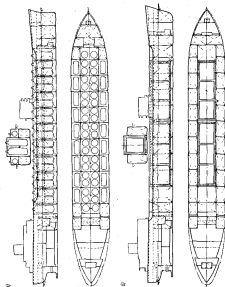


Рис. 14. Сторонние и внутренние продольные и поперечные разрезы танков «Esso Puerto Rico» (а) и «Esso Gulfport» (б).

Специалисты компании Везер рассмотрели две модификации судна «Esso Puerto Rico» (проект А и проект Б). В обеих модификациях предусматривалась перевозка сжиженного газа при температуре кипения. В табл. 11 даны сравнительные характеристики судна «Esso Puerto Rico», его двух модификаций и аналогичного по размерам танкера.

По проекту А (рис. 14, б) вместимость танков для нефти предусмотрена такой же, как на судне «Esso Puerto Rico». Двойное дно под кистерными для газа может быть использовано для хранения топлива. Высвобождающаяся в связи с приемом топлива в двойное дно одна из двух носовых топливных цистерм может использоваться для перевозки дополнительного количества нефти.

Сравнение характеристик судна «Esso Puerto Rico» с одной из его модификаций (проект А) показывает, что за счет уменьшения

Таблица 11

Сравнительные характеристики судна «Esso Puerto Rico», его двух модификаций (проект А и проект Б) и аналогичного по размерам танкера «Esso Gulfport»

Характеристики	Нефтеналивное судно «Esso Puerto Rico»	Проект А	Проект Б	Танкер «Esso Gulfport»
Длина между перпендикулярами, м	201,2	201,2	201,2	201,2
Ширину, м	27,4	27,4	27,4	27,4
Высота борта, м	14,3	14,3	14,3	14,3
Высота трюма, м	2,6	2,6	2,6	—
Осадка, м	11,1	11,1	11,1	10,8
Водоизмерение в гру- пу, м	49 073	49 073	49 073	48 556
Водоизмерение порож- ним, м	16 356	13 212	13 439	12 150
Длинейт, м	32 617 (160,7%)	35 664 (169,2%)	35 634 (169,6%)	36 448 (171,9%)
Вместимость кистер- ов для газа, м³	12 786 (100,0%)	14 200 (111,1%)	19 300 (151,0%)	—
Грузоподъемность по проезду, м	6310 (100,0%)	8390 (130,7%)	11 200 (177,8%)	—
Вместимость танков для нефти, м³	33 600 (100,0%)	33 650 (100,0%)	26 350 (78,4%)	44 625 (133,0%)
Грузоподъемность по нефти, м	22 500 (100,0%)	23 600 (104,9%)	20 400 (90,7%)	32 445 (144,0%)
Запасы топлива, воды, масла и др., м	4000	4000	4000	4000

веса кластера грузоподъемность судна по проекту А может быть увеличена на 3000 т. При этом грузоподъемность по газу (пропану) увеличивается примерно на 30%, а по нефти — приблизительно на 5%.

При разработке проекта Б исходили из необходимости использования под цистерны для сжиженного газа всей центральной части судна. Это приводит к уменьшению вместимости танков для нефти, однако значительно увеличивается вместимость цистерн для газа. Увеличение грузоподъемности судна по проекту Б по сравнению с судном «Esso Puerto Rico» примерно такое же, как в проекте А, с тем отличием, что в последнем случае грузоподъемность по газу увеличивается примерно на 80%, а по нефти — уменьшается на 9%.

Анализ данных, приведенных в табл. 11, показывает целесообразность транспортировки сжиженного газа в больших количествах в охлажденном состоянии, тем более, что стоимость судна по проектам А и Б вряд ли превышает стоимость судна «Esso Puerto Rico» благодаря отсутствию необходимости в дорогостоящих материалах для изготовления грузовых цистерн.

В Советском Союзе разработан проект речного судна-газовоза [16], причем проектировщики — Центральное технико-конструкторское бюро МРФ РСФСР совместно с Ленинградским — использовали в качестве прототипа танкер с пятью впадинами цилиндрическими цистермами диаметром около 6,4 м. Проведенные исследования показали, что более экономичной для речных газовозов является перевозка сжиженных газов в условиях глубокого охлаждения. В этом случае строительная стоимость судна снижается на 10–11%, грузоподъемность увеличивается примерно на 17%, а себестоимость перевозок уменьшается на 14–15%.

Для более детального рассмотрения преимуществ и недостатков того или иного способа перевозки сжиженного газа на речных судах ЦТКБ были разработаны три варианта газовозов (табл. 12). В первом варианте для перевозки сжиженного газа предусматривались большие цилиндрические цистерны (изолированные с наружной стороны и несколько усиленные с тем, чтобы они могли выдерживать избыточное давление 0,25 кг/см²).

В остальных двух вариантах предусматривалась установка 10 стандартных бутановых и пропановых цистерн диаметром 2,4–3,0 м. Во втором варианте бутановые цистерны изолированы и рассчитаны на перевозку сжиженного газа под давлением 7 кг/см² с односторонним охлаждением до температуры плюс 12° С. Пропановые цистерны в третьем варианте рассчитаны на перевозку газа только под давлением. Из табл. 12 видно, что с переходом к способу перевозки сжиженного газа под давлением вес цистерн увеличивается в 2–3 раза, а грузоподъемность судна снижается на 16–28%. Расчет эксплуатационно-экономических показателей, резуль-

таты которого приведены в табл. 13, показал, что по себестоимости более выгодной является перевозка газа под давлением с односторонним охлаждением, в по показателю приведенных затрат — перевозка под охлаждением. Однако при выполнении указанных расчетов не учитывались увеличение стояночного времени судов, перевозимых газ под охлаждением, а также капитальные затраты на дополнительное судовое и береговое оборудование, связанные

Таблица 12

Сравнительные характеристики трех конструктивных вариантов (I–III) речных судов-газовозов

Характеристики	Способ перевозки сжиженного газа		
	под охлаждением	под давлением с односторонним охлаждением	под давлением
	I	II	III
Длина, м	62,0	62,0	62,0
Ширина, м	9,2	9,2	9,2
Осадка, м	1,62	1,75	1,62
Водоизмещение, т	738	860	860
Мощность главного двигателя, л. с.	360	360	360
Скорость хода, км/час	17,6	17,3	17,1
Цистерны (цилиндрические):			
тип	вертикальный	горизонтальный	вертикальный
количество	5	10	10
диаметр, м	6,4	2,4–3,0	2,4–3,0
общая емкость, м ³	675	467	667
Вес металла цистерн, т	42,5	139,0	267,0
Вес цистерн с изоляцией, т	63,0	185,0	267,0
Расчетный коэффициент заполнения цистерн	0,92	0,90	0,80
Удельный вес груза, т/м ³	0,56	0,51	0,46
Грузоподъемность, т	360 (300%)	300 (83%)	260 (73%)
Относительный вес цистерн с изоляцией на 1 т груза	0,225 (100%)	0,616 (274%)	1,026 (468%)
Относительный вес цистерн с изоляцией на 1 м ³ вместимости, т/м ³	0,120 (100%)	0,382 (318%)	0,407 (338%)

Таблица 13

Заслуживающие внимания показатели речных судов-газовозов (см. табл. 12)

Характеристики	Средний уровень сжиженного газа		
	под давлением	под давлением с одновременным охлаждением	под давлением
	I	II	III
Строительная стоимость, тыс. руб.	350 (100%)	273 (80%)	358 (80%)
Исследованные расходы за год, тыс. руб.	64,8 (100%)	51,2 (79%)	29,3 (70%)
Прокладочность за год (наивысшая прокладочность 1990 км), тыс. м	6,30 (100%)	5,06 (82%)	4,32 (70%)
Собственность, км/л/км	0,55 (100%)	0,54 (98%)	0,60 (109%)
Показатель приведенных затрат, км/л/км	0,94 (100%)	0,97 (103%)	1,07 (104%)

Таблица 14

Распределение газопроводов в эксплуатации по способу перевозки сжиженного газа (за I полу 1965 г.)

Емкость цистерны для газа, м³	Средний уровень сжиженного газа		
	под давлением	под давлением с охлаждением	под давлением с одновременным охлаждением
До 500	14	—	—
500—500	9	—	—
500—1000	24	3	6
1000—2000	18	1	5
2000—3000	9	—	11
3000—5000	5	—	6
5000—7000	6	2	1
7000—10 000	4	2	1
10 000—13 000	1	2	—
13 000 и более	1	8	—
Всего	91	18	30

с погрузкой и выгрузкой охлажденного газа. Учет указанных факторов, по-видимому, привел бы к изменению полученных результатов.

В дополнение к сказанному о выборе наиболее выгодных способов транспортировки сжиженных газов на судах различных размеров в табл. 14 приведены статистические данные по реализации того или иного способа перевозки на газозавозах в зависимости от их грузоемкости. Из табл. 14 видно, что суда вместимостью до 500 м³ строятся для перевозки газа только под давлением, а свыше 10 000 м³ — в основном для перевозки газа под охлаждением.

Суда грузоемкостью 500—10 000 м³ стро-

ятся для перевозки сжиженного газа только под давлением (~63%), под давлением с одновременным охлаждением (~29%) и только под охлаждением (~8%).

§ 5

Выбор типа цистерны

Сжиженные газы транспортируются на судах в вертикальных и горизонтальных цилиндрических, сферических и прямоугольных цистернах.

На выбор типа цистерны определенное влияние оказывает принятый способ транспортировки газа. Так, при перевозке газа под охлаждением (при температуре кипения и атмосферном давлении) цистернам можно придавать любую форму. В этом случае обычно используют прямоугольные цистерны, которые позволяют лучше использовать подпалубную кубатуру судна.

При перевозке газа под давлением или под давлением с одновременным охлаждением применяются лишь цилиндрические и сферические цистерны. При этом на судах, перевозящих газ только под давлением, используются главным образом вертикальные цилиндрические цистерны, а в том же время как при комбинированном способе перевозки (под давлением с одновременным охлаждением) применяются горизонтальные цилиндрические и сферические цистерны. Последние объясняется тем, что при одной и той же вместимости на судне размещается значительно меньшее количество горизонтальных цилиндрических или сферических цистерн, чем вертикальных цилиндрических. В связи с этим становится меньше изолируемые поверхности и расход дорогостоящей изоляции, а следовательно, уменьшается и стоимость самого судна. Для судна грузоемкостью около 2000 м³ уменьшение количества цистерн и изолируемой площади будет следующим:

	Вертикаль- ная цилиндри- ческая цистерна	Горизонталь- ная цилиндри- ческая цистерна	Сферическая
Количество цистерн	17	6	4
Площадь наружной изолирующей цистерн, м²	1900	1750	1260

О распространении цистерн той или иной формы на газозавозах можно судить по данным табл. 15.

Как видно из табл. 15, наибольшее распространение получили суда с вертикальными и горизонтальными цилиндрическими цистернами. Основное преимущество вертикальных цилиндрических цистерн — удобно размещаться и установка их на судне, простота монтажа трубопроводов и арматуры. При неизменных газа-

ных размерениях и коэффициентах полноты высота вертикальных цистерн, а следовательно и грузоподъемность судна, ограничиваются условиями казальной остойчивости.

Весовые и объемные характеристики горизонтальных и вертикальных цилиндрических цистерн при установке их на судно приблизительно одинаковы. Однако при использовании горизонтальных цистерн их число будет меньше, а следовательно, и уменьшится потребное количество дорогостоящей арматуры.

Горизонтальные цистерны обычно размещаются в трюмах и на верхней палубе судна, что усложняет их монтаж и приводит к некоторому удорожанию судна.

Сферические цистерны не получили широкого распространения на судах. Хотя их вес приблизительно в полтора раза меньше веса цилиндрических цистерн равного объема, относительное использование вместимости трюмов при установке сферических цистерн незначительно. Кроме того, технология изготовления этих цистерн весьма сложна. Цистерны такого типа установлены только на семи судах из общего количества находящихся в эксплуатации

Таблица 15

Распределение газопровозов в эксплуатации газопровозов по типу грузовых цистерн (на состояние на 1 июля 1966 г.)

Вместимость грузовых цистерн, м³	Тип и количество цистерн			
	цилиндрические			сферические
	вертикальные	горизонтальные	вертикальные	
До 250	—	14	—	1
250—500	1	7	1	—
500—1000	9	10	3	2
1000—2000	9	14	—	1
2000—3000	9	13	3	—
3000—5000	5	6	—	—
5000—7000	6	1	—	2
7000—10 000	4	—	1	2
10 000—13 000	1	—	—	2
13 000 и более	2	—	—	2
Всего	42	74	7	16

Таблица 16

Основные данные и характеристики цистерн газопровозов, вмещающих грузопровозы различных форм

Вместимость и грузоподъемность судна	Название судна, страна-строитель и год постройки				
	«Кетум» (Италия, 1961)	«Суп Сайе» (Филиппины, 1964)	«Малин Р.» (Тонкинг, 1965)	«Нид» (Франция, 1966)	«Нид» (Франция, 1966)
Грузовместимость, м³	2000	2000	2000	2000	2000
Тип грузовых цистерн и их количество	сферические (4)	вертикальные цилиндрические (17)	вертикальные цилиндрические (12)	вертикальные цилиндрические (8)	вертикальные цилиндрические (8)
Главные размеры, м:					
длина между перпендикулярами, L ₁₋₁	48,0	73,5	80,2	74,3	73,0
ширина, B	15,0	11,8	12,6	12,0	12,6
высота борта, H	7,5	5,4	6,8	6,6	6,6
осадка, Z	4,7	4,7	4,6	4,6	4,6
Мощность главного двигателя, л.с.	2080	1215	1550	2000	2080
Скорость хода, Узл.	13,2	11,5	13,0	13,5	14,0
Длина мидель-шпанделя	14 000	8000	—	9000	9000

зала, что в грузовом пространстве, выделенном для размещения цистерн, может быть установлено 16 вертикальных цилиндрических цистерн диаметром 4,8 м общей вместимостью около 2400 м³, либо 6 горизонтальных цилиндрических цистерн такого же диаметра вместимостью около 2280 м³. Установка цилиндрических цистерн потребовала бы изменения конфигурации балластных цистерн и потери вследствие этого некоторого количества (~250 м³) балластной емкости. Однако увеличение веса цилиндрических цистерн, а следовательно, и веса судна порожнем приводит к тому, что водоизмещение и балласт судов с цилиндрическими цистернами оказывается близким к «Кегумсу», либо даже большим, чем у него.

В табл. 17 приведены технико-экономические характеристики газозода «Кегумс» и сравнения с его возможными модификациями.

Таблица 17

Сравнительные технико-экономические характеристики газозода «Кегумс» и его модификаций с цилиндрическими цистернами

Характеристика	Газозод «Кегумс»	Его модификации	
		I	II
Тип цистерн и их количество	сферические (4)	вертикальные цилиндрические (16)	горизонтальные цилиндрические (6)
Вместимость цистерн, м³	2024	2400	2280
Вес судна порожнем, т	2230	2480	2420
Вес цистерн, т	430	640	600
Длина, м	2200	2420	2230
Водоизмещение в полном грузу, т	4620	4680	4750
Осадка в грузу, м	4,85	5,10	4,95
Вместимость балластных цистерн, м³	1049	800	830
Водоизмещение в балласте, т	4380	4400	4340
Средняя осадка в балласте, м	4,60	4,62	4,56
Скорость судна, %	100	105	104
Пропускная способность за рейс, т	1120 (100%)	1300 (116%)	1220 (110%)
Пропускная способность за год, %	100	114	109
Годовые эксплуатационные расходы, %	100	102	101
Себестоимость перевозки 1 т сжиженного газа, %	100	90	93

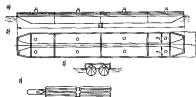


Рис. 15. Схема газозода с двумя секциями (водоизмещение в грузу 420 т, водоизмещение порожнем 120 т, осадка в грузу 2 м, размеры корпуса показаны в метрах): а — обшивка; б — пилуба; в — пилуба; г — схема укладки сжиженного газа.

(для случая с цилиндрическими цистернами). Как видно из таблицы, увеличение грузоподъемности судна при оборудовании его цилиндрическими цистернами повышает пропускную способность на 10—15% и снижает себестоимость перевозок на 7—10%. Таким образом, можно сделать вывод, что применение на судне «Кегумс» цилиндрических цистерн вместо сферических позволило бы значительно улучшить его экономические показатели.

Для повышения коэффициента использования объема грузового пространства судна было предложено объединить корпус судна с цистерной высокого давления [16], [25].

В работе [25] корпус судна предлагается проектировать в виде цистерны высокого давления. Более подробное описание предлагаемого судна-газовоза с цилиндрическим корпусом приведено в § 16. За счет использования цилиндрических цистерн коэффициент использования водоизмещения по грузоподъемности в этом случае увеличивается почти на одну треть, а стоимость постройки уменьшается.

В табл. 18 приведены сравнительные технико-экономические показатели газозода, оборудованного цистернами трех основных типов. Анализ таблицы показывает, что по себестоимости перевозки 1 т газа лучшим является судно с корпусом в виде прочной цистерны, а худшим — судно со сферическими цистернами.

Интересно отметить, что для перевозки сжиженных газов по рекам предложены плавучие цистерны диаметром 3 и длиной 30 м, объединенные в секционные составы [16]. Пример секционного состава из двух цистерн показан на рис. 15. Применение секционных составов, толкаемых буксиром-толкателем, позволяет снизить себестоимость перевозки 1 т сжиженного газа примерно в два раза по сравнению с обычным газозодом.

В последнее время для перевозки сжиженного газа предложены так называемые многодолевые цистерны [93]. Наиболее рациональными с точки зрения использования кубатуры грузового пространства являются шестидолевые цистерны (рис. 16), форма которых наилучшим образом соответствует обводам судна. Схемы размещения вертикальных и горизонтальных цилиндрических и многодолевых цистерн в трюме газозова приведены на рис. 17, а результаты сравнения их технических характеристик — в табл. 19.

При многодолевых цистернах лучше используется кубатура трюмов, но преимуществ в весовом отношении по сравнению с цилиндрическими цистернами они не имеют. Благодаря меньшей высоте многодолевых цистерн, остойчивость судна улучшается.

Таблица 18

Сравнительные технико-экономические показатели газозов, оборудованных грузовыми цистернами различных типов

Характеристика судна	Тип грузовых цистерн		
	вертикальные цилиндрические	сферические	цистерны-многодолевые корпус судна
Длина между перпендику- лярами, м	95,5	99,0	87,5
Ширину, м	15,3	15,2	13,4
Осадка, м	5,1	4,9	5,1
Водоизмещение, т	5550	5650	4300
Грузоподъемность, м	2000	2000	2000
Дальность плавания, миль	5000	5000	5000
Скорость хода, узл.	15,0	15,0	15,0
Вес цистерн, т	1050	700	—
Коэффициент использования кубатуры грузового про- странства, %	88	78	100
Коэффициент утяжеления водоизмещения за грузо- подъемности, %	0,36	0,35	0,46
Строительная стоимость судна, тыс. руб.	2770	2960	2030
Проектная стоимость за накатание, тыс. м	33,7	33,7	33,7
Эксплуатационные расхо- ды за накатание, тыс. руб.	469	425	384
Себестоимость перевозки 1 м, руб.	13,9 (100%)	14,6 (103%)	11,5 (82%)

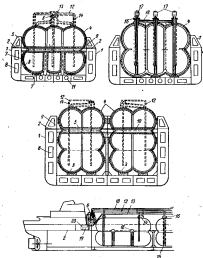


Рис. 16. Конструкция шестидолевых цистерн.

1 — корпус судна; 2 — верхняя палуба; 3 — цистерны; 4 — иллюминатор; 5 — герметичная палубная крышка; 6 — гидравлический цилиндр; 7 — прокладка; 8 — бортовые балластные танки; 9 — воздушный трубопровод; 10 — бонус; 11 — днищевые балластные танки; 12 — жидкостный трубопровод; 13 — газовый трубопровод; 14 — уравнивающий трубопровод; 15 — воздушный баллон; 16 — гидравлическая крышка герметизации; 17 — фланец клапана; 18 — сливной трубопровод; 19 — измерительный насос; 20 — компрессор.

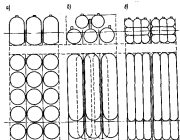


Рис. 17. Схемы расположения в трюме цистерн различного типа: а — сферических цилиндрических; б — горизонтальных цилиндрических; г — многоталовых.

Это способствует уменьшению принимаемого в порожнем рейсе водного балласта.

При горизонтальном расположении шестидесяти цистерн необходимо предусматривать доступ к настилу второго дна.

Одним из критериев при выборе типа цистерн для транспортировки сжиженных пропана, бутана и аммиака может служить относительная грузоплотность судна

$$\gamma = \frac{W}{LBN} \quad (3)$$

где L , B , H — главные размеры судна;

W — вместимость грузовых цистерн.

Анализ характеристик газопаров специальной постройки, результаты которого приведены на рис. 18, показывает, что у судов, оборудованных сферическими цистернами, коэффициент относительной грузоплотности значительно ниже, чем у судов с цилиндрическими и прямоугольными цистернами и колеблется в пределах 0,20—0,30. У судов, оборудованных цилиндрическими цистернами, относительная грузоплотность изменяется в весьма широких пределах (от 0,24 до 0,63). Судя по рис. 18, трудно отдать предпочтение вертикальному или горизонтальному расположению цилиндрических цистерн. Однако можно отметить, что на

Таблица 9
Сравнительные характеристики грузовых цистерн различного типа

Характеристики	Тип цистерн			
	вертикальные цилиндрические	горизонтальные цилиндрические	многоталовые	
Размеры трюма, м:				
длина	3,60	3,60	3,60	27,0
ширина	16,54	16,54	16,54	16,54
длина	21,5	21,5	21,5	21,5
Кол-во цистерн	12	16	5	2
Диаметр, м	5,0	4,5—5,0	4,5—5,0	3,2
Общий объем, м³	1760 (100%)	1650 (94%)	2140 (121%)	2750 (156%)
Вес, т	266 (100%)	306 (77%)	368 (138%)	500 (187%)
Максимальная загрузка, т	8,75	8,00	8,00	7,60
Вес груза, т	880 (100%)	1066 (100%)	1070 (98%)	1338 (126%)

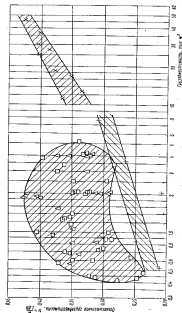


Рис. 18. Изменение коэффициента относительной грузоподъемности с увеличением грузоподъемности танка, оборудованного горизонтальными (□) и вертикальными (△) цилиндрическими, а также (×) прямоугольными цистернами.

судах грузоподъемностью до 800 м³ применяются главным образом горизонтальные цилиндрические цистерны. В этом случае цистерны имеют длину, равную длине грузового трюма и обеспечивают, таким образом, максимальное использование его объема. С увеличением размеров судна возрастают относительная длина грузового пространства и коэффициент относительной грузоподъемности (до определенного предела). Дело в том, что длина горизонтальных цилиндрических цистерн ограничивается как технологическими возможностями их изготовления, так и стремлением исключить участие цистерн в общем изгибе судна. В связи с этим при увеличении длины грузового пространства по длине трюма устанавливают несколько горизонтальных цистерн, что ухудшает использование кубатуры трюма и приводит к некоторому снижению относительной грузоподъемности судна.

Таблица 30

Весовые и объемные характеристики прямоугольных и цилиндрических цистерн

Характеристики	Тип цистерны			
	цилиндрическая	прямоугольная	цилиндрическая	прямоугольная
Размеры цистерн в плане (диаметр или длина и ширина), м	10,8	10,8×21,6	21,6	21,6×21,6
Высота цистерн, м	14,3	14,3	14,3	14,3
Объем одной цистерны, м ³	1310	3340	5290	6680
Вес одной цистерны, т	32	130	159	307
Длина грузовой части судна, м	110,0	110,0	110,0	110,0
Ширина судна, м	25,0	25,0	25,0	25,0
Высота борта, м	17,8	17,8	17,8	17,8
Объем подпалубного пространства грузовой части судна, м ³	48 500	48 500	48 500	48 500
Теоретическое количество устанавливаемых на судно цистерн	17,9	9,0	4,2	4,3
Общий объем цистерн, м ³	22 300	30 060	22 060	28 790
Общий вес цистерн, т	544	1170	668	1320
Коэффициент полезного использования подпалубного пространства	0,46	0,62	0,45	0,59
Относительная вместимость цистерн и их весу, м ³ /т	41,0	25,7	38,6	21,8

При установке вертикальных цилиндрических цистерн можно за счет увеличения их высоты путем вывода верхних концов выше палубы достичь лучшей изоляции емкости судна при объемах цистерн выше 1000 м³ (см. рис. 18). Цистерны в этом случае выступают над верхней палубой на 25—55% их высоты. Однако с увеличением размеров судна значительно увеличивается количество и вес вертикальных цилиндрических цистерн. Кроме того, диаметры цистерн достигают очень больших величин, что усложняет и удорожает их изготовление. Наибольший диаметр таких цистерн, как правило, не превышает 6 м. В случае крайней необходимости идут на увеличение числа рядов цистерн по ширине судна. Относительная грузоемкость судна в при этом резко уменьшается.

Для перевозки газа на судах в охлажденном состоянии применяются прямоугольные цистерны. На судах малой грузоемкости их применение не дает выигрыша в отношении использования кубатуры, так как высота цистерн ограничена высотой борта, в то время как цилиндрические цистерны высокого давления можно частично или даже целиком располагать на верхней палубе.

Кроме того, в результате применения прямоугольных цистерн теряется часть полезной кубатуры трюма из-за изоляции и устройства коффердамов между самими цистернами и между цистернами и обшивкой судна. Ширина коффердамов практически не увеличивается с увеличением размеров судна. Относительная же данная грузовой пространства возрастает. Поэтому с увеличением размеров судна увеличивается относительная грузоемкость.

При проектировании судов для перевозки сжиженных газов, охлажденных до температуры кипения при атмосферном давлении, практически не возникает проблемы выбора формы цистерн, поскольку лишь цистерны аржомоульные в плане обеспечивают наилучшее использование подпалубной кубатуры судна. Сказанное подтверждается приведенными в табл. 20 данными по весовым и объемным характеристикам различных цистерн, изготовленных из алюминия-магниевого сплава.

§ 6.

Главные размеры и коэффициенты полноты

Свойства сжиженного газа и специфика перевозки его морским путем предопределяют ряд особенностей выбора главных размеров газозвон. К числу этих особенностей относятся:

— обеспечение возможности большего объема трюма, что позволяет устанавливать в них акладные цистерны для сжиженного газа, имеющего высокий удельный погрузочный объем;

— обеспечение такой остойчивости судна, при которой оно могло бы планировать качку, так как в противном случае на цистерны будут действовать значительные динамические нагрузки и, кроме того, будет происходить интенсивное излучивание охлажденного газа, что приведет к испарению значительного количества груза.

Отличительной особенностью судов, перевозящих нефтяные газы, является то, что на выбор их главных размеров оказывают влияние способ транспортировки газа и тип цистерн. Так, при одной и той же грузоподъемности необходимая кубатура цистерн будет различной в случае выбора тех или иных условий транспортировки сжиженного газа, поскольку от них зависит его удельный вес. Кубатура же и тип цистерн в определяют, главным образом, размеры судна. Выбранные главные размеры, естественно, должны обеспечивать достаточные ходовые и мореходные качества судна, его прочностные характеристики и т. п.

Обычно при определении главных размеров в первом приближении пользуются статистическими данными по построенным и спроектированным судам.

Водонизмещение судна в первом приближении определяется обычно через коэффициент утилизации водонизмещения по грузоподъемности, т. е.

$$D = \frac{P_{г2}}{\eta}, \quad (4)$$

где D — водонизмещение судна;

$P_{г2}$ — грузоподъемность;

η — коэффициент утилизации водонизмещения по грузоподъемности.

Величина коэффициента утилизации водонизмещения по грузоподъемности должна определяться по прототипу, имеющему аналогичное назначение и вблизи к проектируемому судну грузоподъемность и скорость хода. При первоначальной оценке водонизмещения по формуле (4) можно для назначения величины коэффициента утилизации водонизмещения по грузоподъемности воспользоваться графиком (рис. 19), на котором показаны построения по статистическим данным зависимости этого коэффициента от грузоемкости газозвон, оборудованных цистернами различных типов. Указанные зависимости построены с учетом грузоподъемности судов, принимаемой по самому тяжелому из углеводородных газов — бутану.

Как известно, длина судна L оказывает существенное влияние на его технические и экономические характеристики. Газозвон является сравнительно тихоходными судами, скорость хода которых характеризуется числами Фруда $Fr = 0,18-0,24$. Для таких судов преобладающим является сопротивление трения, которое мало зависит от длины судна при неизменном водонизмещении. Поэтому при выборе длины газозвон следует принимать

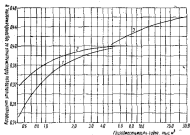


Рис. 19. Зависимость коэффициента использования объема газовых цистерн от грузоёмкости при установке различных типов.

1 — с вертикальными цилиндрическими; 2 — с сферическими цилиндрическими; 3 — с пропорциональными.

во внимание не столько сопротивление воды, сколько другие факторы, от которых зависит длина судна (грузоёмкость, вес металлического корпуса, стоимость постройки и т. д.).

Анализ статистических данных по размерам примерно ста газозов специальной постройки, а также проектов газозов, позволял вывести зависимости длины этих судов от кубатуры и типа цистерн (рис. 20). Из рассмотренных указанных зависимостей видно, что примерно до вместимости около 5000 м³ наименьшую длину имеют суда, перевозящие сжиженные газы в цилиндрических цистернах. При этом длина этих судов практически не зависит от принятого положения установленных цилиндрических цистерн (вертикального или горизонтального). При одинаковой вместимости наибольшая длина оказывается у судов, оборудованных сферическими цистернами. С увеличением грузоёмкости длина судов со сферическими цистернами возрастает несколько медленнее, чем в случае установки цилиндрических цистерн, однако при грузоёмкости около 5000 м³ длина тех и других судов примерно выравнивается. По-видимому, дело в том, что с увеличением грузоёмкости число сферических цистерн, устанавливаемых на судно, не изменяется, а следовательно, мало изменяются площади и объемы между самими цистернами и между цистернами и переборками, что повышает полезное использование длины судна.

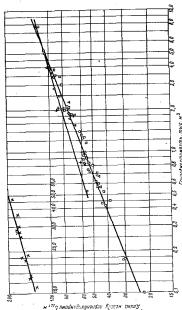


Рис. 20. Зависимость длины судов от не грузоёмкости при установке цилиндрических (x) и сферических (o) для пропорциональных.

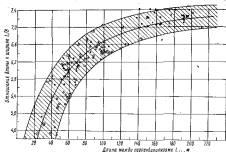


Рис. 21. Зависимость отношения $\frac{L}{B}$ от длины газгольза с вертикальными (△) и горизонтальными (□) цилиндрическими, сферическими (+) и прямоугольными (x) цистернами.

● — отношение $\frac{L}{B}$ для газгольза.

У судов, оборудованных цилиндрическими цистернами, с увеличением размеров судна растет число цистерн, поэтому полезное использование длины в данном случае улучшается незначительно. Приведенные на рис. 20 зависимости могут быть использованы для ориентировочного определения длины проектируемого газгольза.

Ширина судна B при выбранной длине определяется из условий ходкости или остойчивости. Она может также обуславливаться какими-либо проектными или эксплуатационными соображениями, например, размерами шлюза в каналах, по которым будет проходить судно, размерами грузовых цистерн и т. д.

Ширину судна можно определить и по выбранному отношению длины к ширине $\frac{L}{B}$. На рис. 21 приведены зависимости указанного отношения от длины газгольза, оборудованных цистернами различных типов. Там же для сравнения приведены значения отношений $\frac{L}{B}$ для танкеров. Рассмотрение этих зависимостей показывает, что тип применяемых на судне цистерн практически

не влияет на величину отношения $\frac{L}{B}$. Кроме того, величина этого отношения находится для газгользов в тех же пределах, что и для танкеров.

При заданной осадке ширину судна можно определить по отношению $\frac{B}{T}$. С точки зрения ходкости это отношение должно приближаться к таковому, чтобы смоченная поверхность, а следовательно, и сопротивление трения были наименьшими. Однако газгользы, как уже указывалось, относятся к сравнительно тихоходным судам, у которых преобладает сопротивление трения. Для этих судов изменение (при неизменном водоизмещении) главных размеров, в том числе и ширины, не оказывает заметного влияния на сопротивление. Поэтому при выборе ширины газгольза главным является не сопротивление воды, а другие факторы, а в первую очередь, остойчивость судна. Последнее особенно важно для судов, перевозящих сжиженный газ в выступающих над верхней палубой впадных цистернах.

С точки зрения обеспечения остойчивости ширину газгольза следует определять через отношение $\frac{B}{T}$, целесообразную величину которого можно найти из уравнения остойчивости в виде [28]:

$$\left(\frac{B}{T}\right)^2 - \left(\frac{1}{q_0} \cdot \frac{A}{B}\right) \frac{B}{T} + \left(\frac{q_0}{q_1} - \frac{\zeta}{q_1} \cdot \frac{B}{T}\right) = 0, \quad (5)$$

где h — метacentрическая высота;

q_1 — коэффициент в формуле для определения абсциссы центра тяжести;

q_2 — коэффициент в формуле для определения величины метacentрического радиуса;

ζ — относительная величина абсциссы центра тяжести (в долях от высоты борта).

Согласно Л. М. Ногуду,

$$q_1 \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

Согласно А. П. Фан-дер-Флау,

$$q_2 = \frac{1}{11.4} \cdot \frac{\alpha^2}{\delta}. \quad (7)$$

Все входящие в уравнения остойчивости величины могут быть определены по приведенным ниже рекомендациям.

Зависимость принимаемых отношений ширины к осадке от длины газгользов специальной постройки приведена на рис. 22. Значительный разброс точек на графике объясняется разнообразием способов обеспечения необходимой остойчивости при проектировании судов, что достигается либо их уширением, т. е. увеличе-

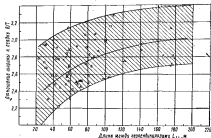


Рис. 22. Зависимость отношения $\frac{B}{L}$ от длины газозова с вертикальным (Δ) и горизонтальным ($\square$) цилиндрическим, сферическим (+) и прямоугольным (x) цистернами.

нием отношения $\frac{B}{L}$, либо приемом твердого балласта (при сравнительно небольшой величине этого отношения).

Для ориентировочной оценки ширины газозова может представлять интерес рис. 23, изображающий зависимость ширины газозова от длины, полученную в результате статистической обработки данных примерно по ста судам.

Средняя ширина газозова в функции длины может быть выражена следующей формулой:

$$B = \frac{L + 30}{3}. \quad (8)$$

Осадка судна T часто указывается в техническом задании с учетом эксплуатации судна на строго определенных линиях с заходом в порты, глубины которых ограничены. Между осадкой судна и его водоизмещением существует определенная зависимость, введенная В. Л. Поздним, которая выражается формулой

$$T = t\sqrt[3]{D}, \quad (9)$$

где t — коэффициент, называемый относительной осадкой.

Для газозовов относительная осадка колеблется в пределах 0,293—0,349 и в среднем равна 0,325.

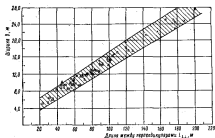


Рис. 23. Зависимость ширины от длины газозова с вертикальным (Δ) и горизонтальным ($\square$) цилиндрическим, сферическим (+) и прямоугольным (x) цистернами.

● — средняя ширина.

Для ориентировочной оценки осадки можно пользоваться приведенной на рис. 24 зависимостью между осадкой и длиной газозова.

Средняя осадка газозова в функции длины может быть выражена следующей формулой:

$$T = \frac{L + 17}{21}. \quad (10)$$

Высота борта H , как известно, определяет целый ряд важнейших характеристик судна, к которым в первую очередь относятся:

- запас плавучести;
- остойчивость на больших углах крена;
- продольная прочность;
- подпалубная вместимость, определяющая грузоемкость судна.

Для газозова высота борта должна назначаться с учетом требований к указанным характеристикам, за исключением подпалубной вместимости, которая для судов данного типа (кроме судов с прямоугольными грузоними цистернами) практически не влияет на грузоемкость. Грузоемкость судов данного типа определяется емкостью устанавливаемых на них складных цистерн цилиндрической или сферической формы. Зависимость высоты борта от длины газозова по статистическим данным показана на рис. 25. Там же для сравнения приводятся данные по высоте

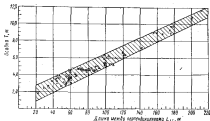


Рис. 24. Зависимость осадки от длины газозов с вертикальными (Δ) и горизонтальными (□) цилиндрическими, сферическими (+) и прямоугольными (x) цистернами.

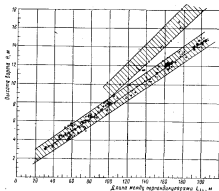


Рис. 25. Зависимость высоты борта от длины газозов с вертикальными (Δ) и горизонтальными (□) цилиндрическими, сферическими (+) и прямоугольными (x) цистернами.

● — высота борта танкера.

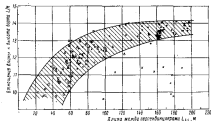


Рис. 26. Зависимость отношения $\frac{H}{L}$ от длины газозов с вертикальными (Δ) и горизонтальными (□) цилиндрическими, сферическими (+) и прямоугольными (x) цистернами.

● — отношение $\frac{H}{L}$ для танкера

борта танкеров, имеющих, как правило, минимальный надводный борт. Как можно заметить, высота борта газозовов обычно (кроме газозовов с прямоугольными цистернами) лежит в тех же пределах, что и высота борта танкеров. Газозовы с прямоугольными цистернами имеют высоту борта в 1,1—1,4 раза большую по сравнению с танкерами. Зависимость средней высоты борта от длины газозова можно выразить следующими формулами:

— для судов, перевозящих газ под давлением,

$$H_A = \frac{L + 10}{14}; \quad (11)$$

— для судов, перевозящих охлажденный газ,

$$H_B = \frac{L - 10}{10}. \quad (12)$$

Отношения высоты борта к осадке у этих судов соответственно равны

$$\frac{H_A}{T} = 1,1 \div 1,5; \quad \frac{H_B}{T} = 1,4 \div 1,8.$$

Отношение длины к высоте борта $\frac{L}{H}$, характеризующее продольную прочность судна, принимается для судов, перевозящих газ под давлением, таким же, как и для танкеров равной длины (рис. 26).

Для судов, транспортирующих охлажденный газ, это отношение лежит в пределах 9,5—11,5.

Одновременно с выбором главных размерений определяют, в первом приближении коэффициенты полноты подводной части корнуса и, в первую очередь, коэффициент общей полноты B

В общем случае этот коэффициент оказывает определенное влияние на грузоподъемность судна. С увеличением коэффициента общий полноты при постоянной скорости одновременно возрастает грузоподъемность и потребная мощность, а следовательно, провозоподобность судна и расходы по его эксплуатации. Таким образом, в каждом отдельном случае можно установить оптимальное значение коэффициента общей полноты с точки зрения расходов на 1 т перевозимого груза.

Обычно коэффициент общей полноты выражается в функции относительной скорости следующим образом:

$$\delta = a - b \cdot \text{Fr}_s \quad (13)$$

где a и b — численные коэффициенты, значения которых устанавливаются на основании обработки статистических данных по судам определенного типа.

На рис. 27 показана зависимость коэффициентов общей плотности газовозов от относительной скорости. Там же для сравнения нанесены правые, соответствующие формулам для определения коэффициентов общей плотности, предложенным различными авторами. Сравнение значений коэффициентов общей плотности, получаемых по формулам Александра-Эйра, Трооста и Ван Ламмерена, с принятыми на стропичных газовозах показывает, что для предварительного определения коэффициента общей плотности газовозов можно пользоваться формулой Александра-Эйра

$$\delta = 1,08 - 1,68 \cdot F_{\text{r}} \quad (14)$$

Окончательное же значение коэффициента общей полноты должно выбираться на основании технико-экономического анализа. Иллюстрацией такого анализа могут служить показания на рис. 28 кривые зависимости технико-экономических показателей металлозаводов одинаковой пропускной способности, имеющих различные коэффициенты общей полноты, от их относительной скорости [75]. Все сравниваемые суда имеют значение $\frac{1}{N}$, равное 7,1.

Коэффициенты общей полноты газовозов обычно имеют значительно меньшие значения по сравнению с танкерами. Дело в том, что грузоемкость судов, перевозящих сжиженный газ во вкладных цистернах, меньше зависит от коэффициента общей полноты, чем грузоемкость танкеров.

Рис. 18. Значения параметров элементов системы при различных значениях α и β при $\gamma = 0,1$ и $\eta = 0,2$ (а — при $\alpha = 0,1$; б — при $\alpha = 0,2$)

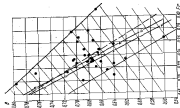
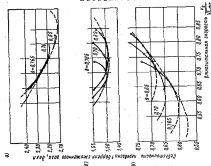


рис. 27. Значимость коэффициентов общей и частной дисперсии при отклонении фенотипа.



Рис. 29. Зависимость себестоимости перевозок 1 м³ сжиженного газа от коэффициента общей полноты судна грузоподъемностью около 2000 м³.

1 — для газовозов; 2 — для танкеров.

§ 7

Грузоёмкость. Ёмкость балластных цистерн

Газовыми перевозят грузы во вкладных цистернах, устанавливаемых в трюмах судна. Указанное обстоятельство приводит к значительным потерям полезного объема трюмов. Если же учесть малый удельный вес перевозимого груза ($0,42-0,68 \text{ м}^3/\text{м}^3$) и необходимость выделенных на судне специальных емкостей для приема балласта в порожнем рейсе, то станет ясно, что полезное использование грузового пространства у газовозов чрезвычайно мало.

Удельная вместимость газовозов колеблется в пределах $2,5-4,0 \text{ м}^3/\text{м}^3$ (в зависимости от способа перевозки сжиженного газа, типа цистерн и формы обвода судна), а в трюмах как сухогрузные суда с избыточным надводным бортом имеют удельную вместимость, равную $1,8-2,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

На рис. 30 показаны схемы расположения цилиндрических и сферических цистерн, из которых видно, что вместимость газовозов определяется размерами и количеством устанавливаемых в трюмах цистерн, т. е. размерами самих трюмов. На размеры и количество цистерн оказывают влияние, главным образом, длина и ширина трюма (в конечном итоге длина и ширина самого судна). Высота же борта практически не влияет на грузоёмкость.

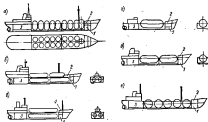


Рис. 30. Схемы расположения в трюмах судов различных типов цистерн: 1 — 17 вертикальных цилиндрических; 2 — 6 горизонтальных цилиндрических; 3 — три горизонтальных цилиндрических; 4 — одной горизонтальной цилиндрической; 5 — двух горизонтальных цилиндрических; 6 — 5 сферических цистерн.

1 — длина; 2 — высота и количество цистерн; 3 — количество цистерн.

мость рассматриваемых газовозов и принимается обычно минимально допустимой по условиям прочности или неподоплаваемости. Таким образом, грузоёмкость газовоза непосредственно зависит от площади палубы в районе грузового пространства. Ниже приведены данные по кубатуре цистерн, расположенных на 1 м^2 палубы грузового пространства (м^3), в зависимости от грузоёмкости судна:

Грузоёмкость, м^3	Грузоёмкость, м^3	м^3
До 500	1,5-2,5	3,0-4,0
500-1000	2,5-3,0	3,0-4,0
1000-2000	2,8-3,5	3,7-4,7
		4,4-5,0

Из-за большого разнообразия типов цистерн, их относительных размеров и способов размещения в трюмах практических невозможно на основе статистических данных установить какие-либо зависимости, позволяющие с достаточной точностью определять грузоёмкость судов по заданным главным размерам. Приведенные же значения коэффициента α и η (рис. 18) позволяют оценить грузоёмкость этих судов с большой приближенностью. В связи с изложенным необходимая после ориентировочного выбора главных размеров оценка грузоёмкости рассматриваемых газовозов выполняется путем схематической пропорции общего расположения и размещения в корпус судна цистерн выбранной формы. Естественно, что такой способ определения

грузоёмкости весьма сложен и требует значительного времени. Более того, данный способ оказывается совершенно непригодным при вариантном методе выбора оптимальных размеров судна и их соотношений, коэффициента общей полноты, скорости хода, формы и типа цистерн и т. п., когда необходимо за короткое время определять грузоёмкости большого количества газозовозов.

В связи с этим предлагается метод [24], позволяющий достаточно быстро оценивать грузоёмкости газозовозов, для которых в первом приближении уже известны главные размерения.

Как уже указывалось, грузоёмкостью судов, перевозящих сжиженный газ во вкаланных цилиндрических или сферических цистернах, определяется, главным образом, площадью палубы. Исходя из этого, можно записать:

$$W = f(l_p, B),$$

где W — грузоёмкость судна;

l_p — длина грузового пространства;

B — ширина судна.

Таким образом, в случае установки на судне вертикальных цилиндрических цистерн имеем

$$W_{\text{из}} = k_1 \cdot h \cdot S, \quad (15)$$

где h — высота цистерн;

S — площадь палубы, занятая цистернами;

k_1 — коэффициент полезности цистерн.

В свою очередь

$$S = k_2 \cdot l_p \cdot B, \quad (16)$$

где k_2 — коэффициент полезного использования площади палубы.

Входящая в уравнение (15) величина h (высота цистерн) определяется на условии обеспечения необходимой остойчивости судна. Сказанное становится понятным, если принять во внимание, что вес цистерн с грузом составляет 50—55% от водоизмещения судна и, следовательно, положение их центра тяжести, которое зависит от высоты цистерн, будет оказывать существенное влияние на положение центра тяжести судна. Таким образом, увеличение высоты цистерн будет приводить к уменьшению остойчивости, которая может быть восстановлена увеличением ширины судна. Следовательно, можно установить зависимость между высотой цистерн и шириной судна

$$h = k_3 \cdot B, \quad (17)$$

откуда

$$W_{\text{из}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot l_p \cdot B^2, \quad (18)$$

или

$$W_{\text{из}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \eta_r \cdot L \cdot B^2, \quad (19)$$

где $\eta_r = \frac{l_p}{L}$ — относительная длина грузового пространства.

Длина грузового пространства l_p равна

$$l_p = L - l_k - l_n, \quad (20)$$

где l_k — длина машинного отделения и актерника;

l_n — длина форпика, дымовки и насосного отделения.

После некоторых преобразований уравнения (20) получаем

$$l_p = L(1 - \bar{l}(1 + \mu)), \quad (21)$$

где

$$\bar{l} = \frac{l_k}{L} \text{ и } \mu = \frac{l_n}{L}.$$

Входящую в уравнение (21) относительную длину машинного отделения и актерника следует брать либо по прототипу, либо определять по выражению

$$\bar{l} = \bar{l}_{\text{из}} + \bar{l}_{\text{акт}}, \quad (22)$$

Относительная длина машинного отделения $\bar{l}_{\text{из}}$ зависит от таких факторов, как главные размерения и коэффициенты полноты корпуса судна, тип и мощность главного двигателя, состав и расположение вспомогательного механического оборудования и др. На выбор длины машинного отделения оказывают влияние также Правила обмера судов. В связи с этим только тщательный статистический анализ, выполненный с учетом указанных выше факторов, позволяет установить определенную закономерность в изменении относительной длины машинного отделения.

Для ориентировочной оценки относительной длины машинного отделения можно использовать рис. 31. Судя, исходя из одинаковых значений параметра $\frac{N}{D_0}$ будут иметь примерно одинаковую относительную длину машинного отделения при условии применения однотипной силовой установки.

Относительная длина актерника $\bar{l}_{\text{акт}}$ может быть определена также на основании статистических данных в зависимости от

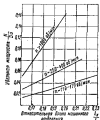


Рис. 31. Зависимость относительной длины машинного отделения от параметра $\frac{N}{D_0}$ для дизельных газозовозов.

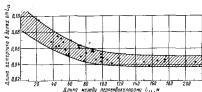


Рис. 32. Зависимость относительной длины цистерны от длины газозова.

длины судна (рис. 32). Эта зависимость может быть выражена для судов длиной до 120 м формулой

$$L_{\text{ц}} = 0,23M^{-\frac{1}{3}}, \quad (23)$$

а для судов большей длины $L_{\text{ц}}$ может приниматься постоянной и равной 0,045.

Величина μ характеризует положение центра тяжести судна в полном грузу и выбирается из условия его удифференцировки. В соответствии с этим условием должно соблюдаться равенство моментов сил веса и сил поддержания относительно середины длины судна. Это равенство путем несложных преобразований может быть приведено к виду

$$\mu = 1 - \frac{2(\bar{x}_c D - \bar{x}_{\text{вср}} D_{\text{вср}})}{l(D - D_{\text{вср}})}, \quad (24)$$

где $\bar{x}_c$ — относительная абсцисса центра тяжести судна в полном грузу в долях от длины;

$\bar{x}_{\text{вср}}$ — относительная абсцисса центра тяжести судна порожнем (без цистерн, груза и судовых запасов) в долях от длины;

$D_{\text{вср}}$ — вес судна порожнем.

Относительная абсцисса центра тяжести судна порожнем довольно стабильна и для газозовов находится в пределах 6—7% и кривую от середины длины судна. В среднем она может быть принята равной 6,5% от длины судна.

Вес судна порожнем без цистерн, груза и судовых запасов определяется по рекомендациям, изложенным в следующем параграфе.

Возвращаясь к формуле (19), следует заметить, что аналогичные выражения можно вывести и для определения грузоместности

мости газозовов с цистернами других типов. В общем виде уравнение вместимости газозова может быть записано в виде

$$W = K V_{\text{г}} L B^2. \quad (25)$$

Коэффициент K здесь представляет собой произведение ряда коэффициентов, количество и величина которых меняются в зависимости от типа грузовой цистерны и их расположения. Ниже даны рекомендации по определению коэффициента K для газозовов с цистермами различных типов.

Газозовы с вертикальными цилиндрическими цистернами. Для этих судов коэффициент $K(K_{\text{м}})$ определяется выражением

$$K_{\text{м}} = k_1 k_2 k_3. \quad (26)$$

Величина коэффициента полноты грузовой цистерны k_2 зависит от формы их оконечностей $\frac{h}{R}$ и отношения высоты к диаметру $\frac{h}{2R}$ (рис. 33). В случае сферической формы оконечностей ($\frac{h}{R} = 1,0$) вес цистерны при постоянном отношении $\frac{h}{2R}$ оказывается наименьшим. С уменьшением отношения $\frac{h}{R}$ крайняя довышка цистерны также уменьшается, а следовательно, увеличивается их вместимость. Однако в этом случае возрастает вес цистерны.

В настоящее время при постройке газозовов применяются цистерны с отношением $\frac{h}{R} = 0,2-1,0$. В случае отсутствия особых требований к форме оконечностей грузовой цистерны, указанные отношения следует брать либо по прототипу, либо по среднестатистическим данным.

Увеличение отношения $\frac{h}{2R}$ приводит к возрастанию вместимости. Однако чрезмерное увеличение высоты цистерны может отрицательно сказаться на остойчивости судна.

Зависимость высоты устанавливаемых на газозовах цистерн от их диаметра приведена на рис. 34. Отношение высоты цистерны к диаметру колеблется в пределах 1,6—2,2. В среднем его можно принимать равным 1,9.

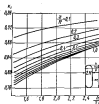


Рис. 33. График для определения коэффициента k_2 .



Рис. 34. Зависимость высоты грузовых отсека от его диаметра.

длина актерника изменялась в пределах 0,20—0,30L.

Протяженность форштея и дилтанка для каждого значения коэффициента общей полноты и положения носовой переборки машинного отделения определялась по формуле $\bar{l}_n = \mu \cdot \bar{l}_0$, где величина μ вычислялась по уравнению (24), приведенному к виду

$$\mu = 1 - \frac{2(\bar{d}_0 \delta + 0,0134)}{1(\delta - 0,235)} \quad (27)$$

При определении значений коэффициента $\bar{h}_2$ были приняты следующие допущения:

а) расположение цистерн во всех рассматриваемых случаях одинаково, а именно: все, кроме одной носовой, размещены в два ряда симметрично относительно диаметральной плоскости (ДП), а носовая — в ДП; таким образом, количество цистерн во всех случаях было нечетным;

б) расстояние между соседними цистернами и цистернами и поперечными переборками равно 0,04B; расстояние $\bar{c}$ от борта судна до цистермы, измеряемое на миделе, принималось равным 0,05—0,15B.

В результате проведенных расчетов были построены графики изменения коэффициента $\bar{h}_2$ в зависимости от коэффициента общей полноты δ , относительной длины машинного отделения с актерником $\bar{l}_n$ и относительного расстояния от борта судна до цистермы $\frac{\bar{c}}{B}$ (рис. 35).

Относительное расстояние $\frac{\bar{c}}{B}$ выбирается из эксплуатационных соображений (например, из необходимости выделения бортовых балластных танков, выделения пространства для удобства осмотра цистерн в процессе эксплуатации судна и т. п.).

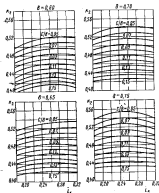


Рис. 35. Графики определения коэффициента $\bar{h}_2$ (для цистерн с вертикальным цилиндрическим цистерником).

Обычно с целью упрощения технологической постройки и удешевления судна диаметр цистерн, назначаемый из соображений соблюдения определенного зазора между цистермой и набором корпуса в наиболее узкой части грузового пространства, остается постоянным по всей длине судна. Таким образом, чем меньше коэффициент общей полноты, тем острее обводы судна, а следовательно, меньше диаметр цистерм и больше относительный зазор на миделе ($\frac{\bar{c}}{B}$), и наоборот. Приближенно относительный зазор на миделе равен

$$\frac{\bar{c}}{B} = 0,19 - 0,14\delta. \quad (28)$$

Как указывалось выше, величина коэффициента $\bar{h}_2$ определяется требованиями обеспечения достаточной остойчивости судна. В зависимости от того, каким способом достигается требуемая остойчивость, значения этого коэффициента могут меняться

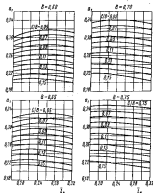


Рис. 36. Графики определения коэффициента a_1 для газовой с горизонтальными цилиндрическими цистернами.

в широких пределах. Анализ данных по построенным и спроектированным газовазам показал, что $K_0 = 0,65 \div 0,77$. Минимальные значения этого коэффициента относятся к судам, устойчивость которых обеспечивается без приема твердого балласта, а максимальные — к судам, имеющим твердый балласт в количестве до 3% от полного водоизмещения. В первом приближении можно принимать этот коэффициент равным 0,70.

Суда с горизонтальными цилиндрическими цистернами. К настоящему времени сложился стандартный тип такого судна, у которого большая часть цистерн размещена в два ряда в трюме, а одна или две цистерны (в один ряд) — на верхней палубе.

Для этих судов коэффициент K (K_{tr}) равен

$$K_{tr} = (a_1 + \Delta) \cdot a_2. \quad (29)$$

Для определения коэффициентов a_1 , a_2 и Δ были разработаны подобные упомянутому выше безразмерные теоретические чертежи и при тех же самых допущениях вычислены названные коэффициенты. За основной вариант было принято судно с четырьмя горизонтальными цилиндрическими цистермами в трюме и двумя (длина которых равна длине грузового пространства L_0) — на верхней палубе. При этих условиях коэффициент a_1 определяется выражением

$$a_1 = \frac{W_{га}}{q_0 L_0^3} \quad (30)$$

Графики зависимости этого коэффициента от относительной длины машинного отделения с актерником, относительного зазора на миделе между бортом судна и цистермой и от коэффициента общей полноты судна приведены на рис. 36. Отличие в протяженности расположенных на верхней палубе цистерн (L_{top}) от протяженности цистерн в основном варианте (L_0) учитывается поправкой Δ к коэффициенту a_1 (рис. 37). Коэффициент a_2 учитывает изменение грузоподъемности газоваза при увеличении или уменьшении количества цистерн на рассматриваемом судне по сравнению с основным вариантом (для которого $a_2 = 1,00$ при стандартном расположении этих цистерн). Коэффициент a_2 для газовазов с различным количеством цистерн имеет следующие значения:

Количество пар грузовых цистерн в трюме судна	1	2	3	4	5
Значения коэффициента a_2	1,05	1,00	0,95	0,90	0,85

Расположение цистерн на небольших газовазах иногда отличается от стандартного. Горизонтальные цилиндрические цистерны большого диаметра на этих судах размещаются в трюме по диаметральной плоскости (рис. 30, а, б). Для судов с таким расположением цистерн коэффициент K (K_{tr}) равен

$$K_{tr} = b_1 \cdot b_2. \quad (31)$$

Здесь коэффициент b_1 определяется по кривым рис. 38, а коэффициент b_2 для газовазов с различным количеством цистерн имеет следующие значения:

Количество грузовых цистерн	1	2	3
Значения коэффициента b_2	1,0	0,9	0,8

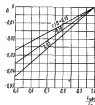


Рис. 37. График определения поправки Δ для газовазов с горизонтальными цилиндрическими цистернами.

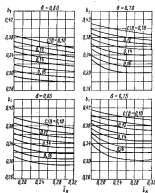


Рис. 38. Графики определения коэффициента K_2 (для газовозов с разноразмерными горизонтальными цистернами в одной ряд).

Судя со сферическими цистернами. Исследование вместимости газовозов со сферическими цистернами показывает, что для определения коэффициента K ($K_{\text{сф}}$) можно пользоваться формулой

$$K_{\text{сф}} = 0.43 - 1.4 \frac{c}{B}. \quad (32)$$

Для определения погрешности вычисления грузоемкости по формуле (25) с использованием формул (26), (29), (31), (32) и графиков из рис. 33, 35, 36, 37, 38 были выполнены расчеты фактической грузоемкости нескольких типичных газовозов; результаты расчетов сведены в табл. 21.

Сопоставление фактических и расчетных значений грузоемкости газовозов показывает, что использование предлагаемого метода позволяет с достаточной для первого приближения степенью точности определять грузоемкость газовоза при

Таблица 21

Расчет грузоемкости некоторых поездов газовой и ее сопоставление с фактической грузоемкостью

Тех. условия в газовой промышленности

Характеристики	вертикальные цилиндры		горизонтальные цилиндры			сферические	
	«Голов. Маш.»	«Опытное Умное»	«Лит. Труды»	«Л. Р. Маш.»	«Л. Р. Маш.»	«Л. Р. Маш.»	«Л. Р. Маш.»
Длина между вертикальными $L_{\text{в.к}}$, м	44.0	100.0	22.5	33.3	47.0	135.7	55.5
Ширина B , м	9.4	15.6	5.0	9.5	9.2	19.5	8.7
Объем V , м ³	3.3	5.2	1.8	8.6	3.6	5.6	3.0
Коэффициент обшей полезной, ϕ	0.577	0.683	0.667	0.640	0.667	0.700 (по расчету)	0.670 (по расчету)
Грузоемкость W , м ³	566	4030	92	660	669	5050	535
Количество цистерн	11	17	1	2	3	6	5
Средняя длина цистерм $L_{\text{ср}}$	0.566	0.597	0.520	0.620	0.505	0.667	0.666
Средняя длина цистерм $L_{\text{ср}}$	0.256	0.362	0.298	0.298	0.297	0.293	0.293
Форм. грузоемкости вертикальных цистерн	«Опытное Умное»	«Опытное Умное»	—	—	—	—	—
Средняя высота цистерн H в диаметру $2R$	1.79	1.87	—	—	—	—	—

Характеристики	Тип цистерн и диаметр судна					
	вертикальные цилиндрические		горизонтальные цилиндрические			
	«Lull Main»	«Reflexion»	«Lull»	«Lull»	«Lull»	«Lull»
Расстояние от борта до центра	0,003	0,101	0,150	0,150	0,100	0,007
Предельная вместимость в литрах	0,800	0,816	—	—	1,00	0,75
Предельная вместимость в литрах	0,484	0,474	—	—	—	—
Предельная вместимость в литрах	0,633	0,715	—	—	0,282	0,280
Коэффициенты:	—	—	—	—	1,00	—
b_1	—	—	—	—	—	—
b_2	—	—	—	—	—	—
c_1	—	—	—	—	—	—
c_2	—	—	—	—	—	—
Δ	—	—	—	—	—	—
b_1	—	—	—	—	—	—
b_2	—	—	—	—	—	—
K	—	—	—	—	—	—
Грузоподъемность, выходящая за пределы (200 %)	0,246	0,272	0,320	0,326	0,294	0,200
Погрешность определения грузоподъемности (200 %)	667	3660	94	955	616	3380
Погрешность определения грузоподъемности (200 %)	0	—1,5	—2,0	—1,5	+1,0	+1,0
Средняя температура	—	—	—	—	—	—

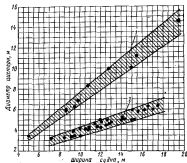


Рис. 39. Зависимость диаметра грузовой цистерны от диаметра судна.
1 — цилиндрические и сферические цистерны, устанавливаемые в один ряд по диаметру судна; 2 — цилиндрические цистерны, устанавливаемые в два ряда по диаметру судна.

выбранных главных размерностях. Дальнейшее уточнение грузоподъемности производится после выполнения чертежей общего расположения, позволяющих определить размеры, количество и размещение цистерн в корпусе судна.

Диаметр устанавливаемых на судно цистерн можно приблизительно назначить в соответствии с зависимостями, приведенными на рис. 39.

После выбора размеров цистерн их вместимость может быть определена по графикам рис. 40 и 41 или по следующему формулам:

для сферических цистерн

$$W_{\text{сф}} = \frac{1}{6} \pi D^3; \quad (33)$$

для цилиндрических цистерн со сферическими днищами

$$W_{\text{ц}} = \pi D^2 L \left(\frac{D}{6} + 1 \right); \quad (34)$$

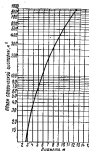


Рис. 40. Зависимость вместимости сферической цистермы от внутреннего диаметра.

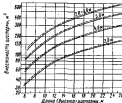


Рис. 41. Зависимость вместимости цилиндрических цистерм от их диаметра и высоты (длины).

— — — по общепринятым соотношениям;
— — — по индивидуальным соотношениям.

для цилиндрических цистерм с эллиптическими днищами

$$W'_c = \pi D_c^2 \left(\frac{h}{6} + l \right) + \frac{1}{6} \pi h^3, \quad (35)$$

где D_c — внутренний диаметр цистерм;

l — высота или длина цилиндрической цистермы;

h — высота оконечности цистермы.

Все сказанное выше относится к судам, перевозящим сжиженный газ в цилиндрических или сферических цистермах. Как уже отмечалось, у этих судов высота борта практически не оказывает влияния на грузоемкость. Однако совсем нилл зависимость между высотой борта и грузоемкостью существует у судов, транспортирующих охлажденный газ в прямоугольных цистермах.

Высота этих цистерм ограничивается высотой борта, так как прямоугольные цистермы имеют большие размеры, и если они будут выступать над верхней палубой, то в ней придется делать весьма значительные вырезы. Последнее значительно затруднит обеспечение продольной прочности судна, поскольку цистермы по требованиям классификационных обществ должны исключаться из участия в общем изгибе. Кроме того, возникнут трудности в обеспечении непроницаемости верхней палубы.

Высота борта у газозвон с прямоугольными цистермами весьма значительна (отношение $\frac{H}{L}$ у этих судов достигает 2,0

вместо 1,1—1,3 у судов с цилиндрическими или сферическими цистермами).

Очевидно, что вместимость газозвон, оборудованных прямоугольными цистермами, определяется длиной грузового пространства, его шириной и высотой борта судна, т. е. теми же параметрами, что и у обычных сухогрузных и наливных судов. Уравнение вместимости газозвон имеет тот же вид, что уравнение вместимости сухогрузных судов с кормовым расположением машинного отделения [28], но отличается от последнего лишь величиной безразмерных коэффициентов и дополнительными членами, учитывающими емкость отводимых под балласт бортовых танков и объема между цистермами и корпусными конструкциями.

Статистический анализ грузоемкости газозвон с прямоугольными грузовыми цистермами позволяет установить зависимость между грузоемкостью и кубическим модулем (рис. 42).

Для судов, перевозящих сжиженный нефтяной газ, эта зависимость выражается приближенной формулой

$$W'_{\text{жн}} = 0,440 L B H - 3000, \quad (36)$$

а для метанозвон формулой

$$W'_{\text{мн}} = 0,375 L B H - 2500. \quad (37)$$

Классификационные общества не допускают приема балласта в цистерны, предназначенные для перевозки сжиженного газа. Поэтому необходимо оборудовать специальные балластные цистерны, кубатура которых оказывает влияние как на грузоемкость судна при заданных главных размерах, так и на главные размеры при заданной грузоемкости. Вместимость балластных цистерн зависит от размеров судна и района его плавания и должна обеспечивать прием такого количества балласта, которое позволяло бы судну иметь осадку не менее

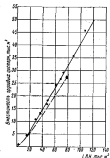


Рис. 42. Зависимость грузоемкости газозвон с прямоугольными грузовыми цистермами от кубического модуля.

• — суда для перевозки сжиженного нефтяного газа; ▲ — метанозвон.

Таблица 22

Размеры балластных цистерн некоторых газозов

Наименование судна	Емкость цистерны, м³		Ф. В. W	Водоизмещение, т		$\frac{D_0}{D_1}$
	общая, т	балластная, м³		в грузу, т	в балласте, т	
Газозовы с горизонтальными цилиндрическими цистермами						
«Jager Tholstrup»	375	60	0,34	365*	270*	0,89*
«Aas Lie Tholstrup»	430	143	0,33	420*	330*	0,89*
«L. P. Mars № 2»	609	15	0,05	1033	785	0,72
«J.B. Tholstrup»	680	182	0,27	1300	975	0,75
«Johan Mierde»	1400	303	0,22	2150*	1690*	0,79*
«Johan»	2500	390	0,16	3400	2380	0,70
«Mandag Oslo»	3480	1905	0,55	6400*	5620*	0,88*
«Larsen»	5250	2250	0,43	6900*	6400*	0,93*
Газозовы с вертикальными цилиндрическими цистермами						
«Tobias»	565	22	0,04	942	730	0,76
«L. P. Mars № 1»	1012	261	0,25	1574	1290	0,82
«Bataga»	1350	47	0,04	2300	2560	0,79
«Fred H. Billups»	3140	470	0,15	4800*	3270*	0,73*
«Petrobrás Oslo»	4030	470	0,12	5510	3860	0,70
Газозовы со сферическими цистермами						
«Kite Tholstrup»	440	393	0,25	630*	700*	0,84*
«Signe Tholstrup»	525	119	0,23	1020*	865*	0,85*
«Eva Tholstrup»	845	350	0,16	1400*	1110*	0,79*
«Korvick»	2094	1040	0,50	4430	4340	0,99
«Mandag Brasilis»	7725	3400	0,43	8650*	7550*	0,92*
Газозовы с прямоугольными цистермами						
«Havgen»	11 000	3 300	0,31	14 300	10 450	0,73
«And Endacott»	24 780	8 450	0,34	29 900*	21 700*	0,75*
«Bridgeport Mars»	29 430	10 620	0,36	35 000	29 800	0,83

Примечания: * — данные даны, включая расчеты.

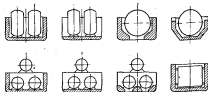


Рис. 43. Наиболее характерные схемы расположения балластных емкостей на газозовах.

0,03L, как это требуется Норвежским Бюро Веритас, а осадку кормой — до полного погружения гребного вала.

Данные о размерах балластных цистерн некоторых газозовов приведены в табл. 22.

У крупных газозовов, оборудованных прямоугольными цистермами, относительная емкость балластных цистерн примерно одинакова и равна одной трети емкости грузовых цистерн. У судов с цистермами других типов относительная емкость балластных цистерн колеблется в пределах 0,12—0,34 и в среднем равна ~0,23.

В редких случаях она снижается до 0,03—0,04 для повышается до 0,40—0,50. Дело в том, что доля грузоподъемности в водоизмещении газозовов, оборудованных прочными цилиндрическими или сферическими цистермами, меньше, чем у судов с прямоугольными цистермами (коэффициент упрочнения водоизмещения по грузоподъемности составляет у первых 0,3—0,4, а у вторых 0,4—0,5). Кроме того, газозовы с цилиндрическими и сферическими цистермами в основном являются судами прибрежного плавания или предназначаются для эксплуатации в закрытых морях (например, в Средиземном море), где условия плавания более благоприятны, чем в океане. Поэтому безопасность плавания на этих судах может быть обеспечена приемом сравнительно небольшого количества балласта. Однако следует иметь в виду, что для любых судов водоизмещение в балластном корпусе составляет не менее 0,7 от водоизмещения в полном грузу.

Для приема балласта на газозовах устраиваются двойное дно и иногда двойные борта. Наиболее характерные схемы расположения балластных емкостей на газозовах показаны на рис. 43.

Весовая нагрузка

При расчете нагрузки судна в начальной стадии проектирования обычно используются укрупненные весовые значения.

При определении элементов газозова весовую нагрузку целесообразно разбивать на следующие укрупненные составляющие: корпус с оборудованием (P_k), вкалываемые цистерны ($P_{\text{ц}}$), механизмы (P_m), сжатый газ в грузовых цистернах ($P_{\text{г}}$), топливо, вода, масло, снабжение, расходные материалы и команда ($P_{\text{с}}$).

Для последние составляющие весовой нагрузки определяют делить судна.

Данные, характеризующие долю каждой из перечисленных составляющих нагрузки в полном водоизмещении газозова различных типов, приведены в табл. 23.

Вес корпуса судна с оборудованием может быть выражен в функции его главных размеров (LBN). На рис. 44 приведены статистические зависимости веса корпуса с оборудованием от кубического модуля для газозова и танкеров.

Сравнение приведенных на рис. 44 данных показывает, что при одинаковых значениях кубического модуля вес корпуса

Таблица 23

Доля укрупненных составляющих весовой нагрузки в полном водоизмещении газозова различных типов

Типы газозова	Составляющие весовой нагрузки в проценте от полного водоизмещения			
	корпус с оборудованием, P_k	цистерны, $P_{\text{ц}}$	механизмы, P_m	топливо, вода, команда, $P_{\text{с}}$
С цистернами для перевозки сжатого газа под давлением грузоподъемностью: до 1000 м ³ 1000—4000 м ³	35—45 30—40	10—20 10—20	5—10 5—8	35—45 40—50
С цистернами для перевозки сжатого газа под давлением с односторонним охлаждением грузоподъемностью 1000—4000 м ³	30—40	10—15	5—8	45—55
Метановозы грузоподъемностью около 25 000 м ³	35—35	3—4	3—6	55—65

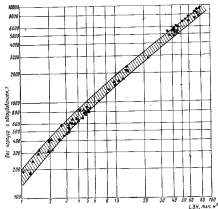


Рис. 44. Зависимость веса корпуса с оборудованием от кубического модуля (▲ — газозов без цистерн; ● — танкеры).

с оборудованием у газозова и танкеров примерно одинаков. Ближайшим будут, по-видимому, и отдельные составляющие веса корпуса с оборудованием. В первую очередь это относится к весу дельных вещей, деревянных частей корпуса, окраски, изоляции, цементирования, оборудования внутренних помещений, некоторых систем и устройств. Вес же металлического корпуса (с фундаментами и подкреплениями) у газозова, по-видимому, будет несколько выше веса корпуса аналогичного по размерам танкера. Хотя у газозова нет продольных переборок, таких, как у танкера, в центральной его части имеется двойное дно, а иногда и двойные борта. Кроме того, наличие вкалываемых цистерн приводит к некоторому увеличению веса фундаментов и подкреплений. Ориентировочные значения веса фундаментов под цилиндрические цистерны газозова, определенные по конструктивным чертежам, приведены в табл. 24.

Приблизительное совпадение весов корпуса с оборудованным у газовозов и танкеров позволяет использовать статистические данные по танкерам для ориентировочного определения соответствующих составляющих весовой нагрузки газовозов. Естественно, что пересчет весовой нагрузки с танкера должен проводиться с поправкой на конструктивные особенности каждого конкретного газовоза.

На рис. 45 показана зависимость веса цистерн от грузоемкости, которую следует рассматривать как весовую ориентировочную, поскольку выявить статистическую зависимость веса цистерн от каких-либо характеристик судна, например грузоемкости, весьма сложно, так как этот вес зависит от способа перевозки газа, типа и относительных размеров цистерн, прочностных характеристик материала, из которого они изготовлены, и т. п.

Зная размеры цилиндрической или сферической цистерны, ее вес можно подсчитать по формуле

$$P_c = q \frac{60}{\sigma_p} \cdot \frac{p}{17}, \quad (38)$$

где q — вес цистерны, рассчитанной на давление 17 кг/см^2 и изготовленной из стали с пределом прочности 60 кг/мм^2 (определяется в зависимости от размеров цистерны по графикам на рис. 46);

σ_p — предел прочности материала, из которого изготовлена цистерна, кг/мм^2 ;

p — расчетное давление, кг/см^2 .

Таблица 24

Характеристики цилиндрических цистерн и фундаментов под них для жидкого газа

Наименование судна	Характеристики цилиндрических цистерн				Вес фундамента цистерны, т	Ориентировочный вес цистерны под 17,0 кг/см ² при $\sigma_p = 60 \text{ кг/мм}^2$, т
	тип	диаметр, м	длина (параллельно), м	высота, м		
д. Р. Мари № 2	горизонтальные	3,4	23,4	203	4,5	0,0220
	вертикальные	5,8	10,9	235	3,0	0,0125

Вес складных прямоугольных цистерн из алюминий-магнелиевых сплавов, предназначенных для перевозки охлажденного газа при атмосферном давлении, может быть определен в первом приближении по формуле

$$P_a = k p W, \quad (39)$$

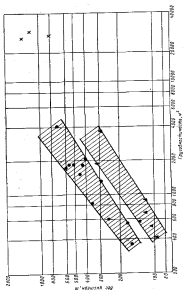


рис. 45. Зависимость веса цистерн от грузоемкости судна, перевозимых газ под давлением без охлаждения (●), под давлением с охлаждением (○) и только с охлаждением (x).

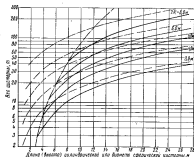


Рис. 45. Зависимость веса сферической (—) и цилиндрической цистермы с эллипсоидальными (---) и сферическими (—) днищами от их диаметра.

где W — емкость цистермы, м^3 ;

ρ' — относительный вес цистермы ($\text{т}/\text{м}^3$), снимаемый с графика (рис. 47, а) в зависимости от объема цистермы и величины отношения между наибольшим и наименьшим размерами цистермы в плане $\left(\frac{a}{b}\right)^*$;

k — коэффициент, определяемый по графику (рис. 47, б) и учитывающий изменение веса цистермы из-за отличия действительной высоты цистермы h (с учетом высоты тронка, составляющей 15–20% от высоты цистермы) от стандартной расчетной высоты $h_s = \sqrt[3]{W}$.

Вес механической установки, определяемый в зависимости от мощности главного двигателя. На рис. 48 приведены графики для определения веса дизельной силовой установки мощностью до 14 000 л. с., заимствованные из работы [90] и несколько перестроенные для удобства пользования. Для определения веса дизельных и паротурбинных установок мощностью более

* Приведенные на рис. 47 графики разработаны М. М. Никольским.

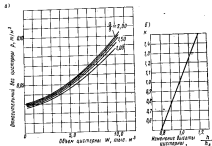


Рис. 47. Графики для определения веса прямоугольной цистермы из алюминия-литиевых сплавов: а — относительный вес цистермы; б — коэффициент k .

10 000 л. с. могут использоваться следующие формулы Юнга и Олсона*:

вес паротурбинной установки Q_t равен

$$Q_t = 280 \left(\frac{Ne}{10\,000} \right) + 450, \quad (40)$$

вес дизельной установки Q_d равен

$$Q_d = 560 \left(\frac{Ne}{10\,000} \right) + 470. \quad (41)$$

Остальные составляющие весовой нагрузки либо задаются (например, вес перевозимого груза), либо определяются общепринятыми способами, которые достаточно подробно изложены в работе [28].

В качестве примера в табл. 25 приведена полученная расчетом весовая нагрузка судна, перевозящего сжиженный газ в 19 вертикальных цилиндрических цистернах общей вместимостью

* Эти формулы, приведенные в одной из работ Юнга и Олсона (Abstract Shipbuilding, 1960, т. 9, № 6, стр. 122–123), имеют несколько иные постоянные коэффициенты. Авторами настоящей книги эти коэффициенты откорректированы применительно к весам современных паротурбинных установок.

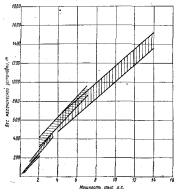


Рис. 48. Зависимость веса двукорпусных установок от их мощности.

около 3000 м³. Судно характеризуется следующими основными элементами:

Длина, м:	
взбодыла	101,00
между перпендикулярами	92,00
Ширина, м	14,70
Высота борта, м	7,35
Осадка, м	4,77
Подъемная в полный груз, т	4950
Мощность главного двигателя, л.с.	2500
Скорость хода, узл.	11,2

Вес металлического корпуса газозона пересчитан по произведению LH с использованием весовых нагрузок ряда нефтеналивных и сухогрузных судов, вес шестерн определен непосредственным расчетом. Все прочие составляющие нагрузки определялись пересчетом по соборным измерителям близких по размерам судов.

Таблица 25

Примерная весовая нагрузка газозона с вертикальными цилиндрическими шестернями

Составляющие весовой нагрузки газозона	Бое P_0 , т	Паска, м		Минимум, мм	
		x	y	P_0	P_2
Металлический корпус	1160	-1,10	5,25	-3265	6 040
Покрывается и фундамента	43	-3,00	4,20	-129	181
Дальние якоря	29	-3,00	10,00	-87	292
Деревянные части	1	-17,00	4,87	-17	5
Сквозня корпуса	10	-5,50	5,83	-55	58
Изоляция	25	-25,50	10,95	-637	274
Покрывается палом, шестернями	15	-21,00	6,87	-315	103
Голый корпус	1273	-1,97	5,47	-3505	6 583
Оборудование анкерный	20	-25,00	11,35	-500	225
Рулевое устройство	10	-45,00	6,87	-460	69
Якорное, швартовное, буксирное устройства	59	30,00	9,00	1770	531
Швартовное устройство	15	-35,00	14,50	-540	218
Грузовое устройство в пр.	1	-1,00	17,65	-1	18
Корпус	1378	-1,62	5,82	-3525	6 642
Электро- и радиооборудование	65	-9,00	7,95	-585	517
Системы	145	-2,50	6,80	-363	585
Механизмы	259	-29,00	4,40	-7510	1 149
Жидкие грузы	20	-4,00	3,08	-120	62
Грузовые шестерни	975	4,00	5,70	2800	5 560
Сварочные	12	-6,00	12,25	-108	147
Залив водопомещения	56	-1,30	5,35	-62	294
Водопомещение паровых	2510	-2,43	5,75	-7053	16 717
Залив и промывка	30	-17,00	8,57	-340	172
Топливо, вода и масло	280	-6,42	3,06	-117	895
Смазочный газ	1750	4,00	5,30	7600	9 280
Добыча	2050	3,40	5,03	7143	10 308
Водопомещение в палом	4960	0	5,45	0	27 025

г/м³

Количество топлива, воды и масла на борту рассчитано на рейс протяженностью 2500 миль в один конец с 15%-ным морским запасом.

Аналогичные данные по весовой нагрузке метаногаза приведены в табл. 26. Метаногаз характеризуется следующими основными элементами:

Длина между перекалукатуркой, м	175,4
Шаг, м	24,8
Высота борта, м	17,8
Осадка, м	7,8
Мощность главной паровой турбины, л.с.	13 000
Скорость хода, узл.	17,2

На метаногазе установлено 9 грузовых цистерн общей емкостью 28 500 м³, размещенных в трех трюмах.

Таблица 26

Проектная весовая нагрузка метаногаза

Составляющие весовой нагрузки судна	Вес Р, т	Плоты, м		Масса, т	
		x	y	P _x	P _y
Корпус	6 600	11,5	-8,3	77 000	-41 500
Механическая установка	700	8,2	-64,0	5 300	-48 000
Электрооборудование	270	11,0	-54,0	3 000	-14 500
Грузовая система	200	19,0	3,0	3 800	600
Прочие системы	280	15,0	-25,7	3 400	-6 000
Связь и управление	40	22,0	-52,0	900	-1 300
Жидкие трюмы	100	4,0	12,0	400	1 200
Снабжение и инструмент	30	18,0	-70,0	5 400	-2 000
Цистерны	1 150	9,3	3,4	10 700	3 000
Запас водометрических	270	10,7	0	2 900	0
Воздухоочистные сорбенты	9 710	11,7	-10,2	113 600	-108 200
Воздух в проходах	130	20,0	-70,0	2 600	-9 100
Топливо, вода, масло	1 590	3,5	-9,1	5 500	-14 500
Соединительный металл	12 000	9,3	3,4	111 500	41 000
Детали	13 730	8,7	1,3	119 000	17 400
Воздухоочистное без балласта	23 400	9,06	-3,9	233 200	-90 800
Балласт	1 370	2,0	66,4	3 500	90 800
Воздухоочистное в полном трюму	24 800	9,55	0	236 700	0

Из опубликованных данных по весовым нагрузкам газозовозов можно привести результаты расчетов ниже. Коралетта [66] для спроектированного им метаногаза длиной 183 м, Пята больших цилиндрических цистерн метаногаза рассчитаны на перевозку примерно 24 000 м³ сжиженного газа. Каждая цистерна весом 230 т имеет диаметр около 21,5 м. Материял цистерн — алюминий-магний-свинец. Суммарный вес цистерн (с учетом дополнительных вертикальных цистерн, установленных по бортам судна) составляет 1400 т.

Ниже приведены весовая нагрузка спроектированного Коралеттой метаногаза (основные элементы судна приведены в табл. 28):

Составляющие весовой нагрузки, т

Металлический корпус	5 700
Грузовые цистерны	1 400
Дерно, катанка, оборудование	460
Установка испарителя сжиженного газа	1 310
Металлическая установка	9 800
Воздухоочистные сорбенты	9 800
Перевозимый груз	
метан	10 000
нефть	3 970
Запас топлива	900
Прочие запасы	900
Детали	15 600
Воздухоочистное в полном трюму	25 600

§ 9

Остойчивость

Большой вес цистерн и заключенного в них груза, а также сравнительно высокое расположение их на судне, могут стать причиной недостаточной остойчивости газозовоза. С целью достижения приемлемых величин метacentрической высоты и характеристик диаграммы остойчивости прибегают либо к укреплению судна, либо к искусственному снижению его центра тяжести путем приема твердого балласта. Снижение центра тяжести цистерн с грузом может быть осуществлено, например, за счет уменьшения высоты вертикальных цилиндрических цистерн, длины расположенных на верхней палубе горизонтальных цилиндрических цистерн и т. д. Однако уменьшение размеров грузовых цистерн ведет к уменьшению грузоемкости судна и, следовательно, к снижению его экономических показателей. Поэтому указанные пути улучшения остойчивости газозовоза следует использовать с учетом экономической целесообразности каждого из них.

В табл. 27 приведены данные по остойчивости некоторых газозовозов с цилиндрическими цистернами (основные элементы рассматриваемых судов приведены в табл. 32).

Особый интерес среди рассматриваемых газозовов представляет судно «Ultragaz», при проектировании которого большое внимание уделялось определению целесообразных путей достижения требуемой остойчивости [114]. Установив на этом судне одной горизонтальной цилиндрической цистермой, выходящей над верхней палубой, являясь причиной того, что ордината центра тяжести судна оказалась примерно равной высоте борта. Это привело к недопустимо малому значению метacentрической высоты ($\sim 0,14$ м), даже при увеличенном соотношении 3,1 отношения ширины к осадке. По мнению ряда авторов, для обеспечения безопасности плавания метacentрическая высота у таких судов не должна быть меньше 0,40 м. Для достижения указанной величины метacentрической высоты потребовалось бы либо увеличить ширину судна примерно на 0,6 м, либо принять не менее 20 м твердого

Таблица 27

Данные по остойчивости некоторых газозовов

Название судна	Количество и расположение цистерм	Условия загрузки	h, м	B, м	$\frac{h}{B}$	$\frac{B}{T}$
«Ultragaz»	Одна горизонтальная цилиндрическая цистерма, выходящая над верхней палубой	В трюм без балласта	0,14	5,0	0,028	3,13
		В трюм с балластом в количестве 20 м	0,40	5,0	0,080	2,78
«Торина Маг № 1»	Четыре горизонтальные цилиндрические цистермы в трюме	В трюм (в начале рейса)	1,05	9,42	0,112	3,55
		В балласте (в начале рейса)	1,09	9,42	0,116	4,15
«Л. Р. Ма-ти № 2»	Горизонтальные цилиндрические цистермы (две в трюме, одна на верхней палубе)	В трюм (в начале рейса)	0,54	9,35	0,059	2,77
		В балласте (в начале рейса)	0,58	9,35	0,100	2,48
«Petrobas Oceia»	17 вертикальных цилиндрических цистерм	В трюм (в начале рейса с балластом в количестве 180 м)	0,40	15,60	0,026	2,99
«Корум»	4 сферические цистермы	В трюм (в начале рейса)	0,48	15,0	0,032	3,22
		В балласте (в начале рейса)	1,33	15,0	0,089	4,25

балласта (14% от водоизмещения). Однако упрочнение судна (до величины отношения $\frac{B}{T}$ равной 3,5) привело бы к резкому ухудшению его ходовых качеств. Прием дополнительного твердого балласта, наоборот, мог бы привести к улучшению ходовых качеств судна (из-за уменьшения отношения $\frac{B}{T}$ примерно до 2,78), хотя водоизмещение газозова могло бы несколько возрасти. При анализе остойчивости судна «Ultragaz» пошли по второму пути, т. е. приняли твердый балласт в количестве примерно 20 м. На рис. 49 показаны диаграммы статической остойчивости судна «Ultragaz» для различных вариантов загрузки.

Авторы настоящей книги, выполняя проектную проработку газозова с вертикальными цилиндрическими цистермами диаметром 5,0 м и высотой 9,5 м общей вместимостью около 3000 м³, исследовали целесообразность обеспечения необходимой остойчивости судна путем увеличения отношения $\frac{B}{T}$ при неизменном водоизмещении, длине и коэффициенте общей полноты. Основные элементы и характеристики рассмотренных вариантов газозовов приведены в табл. 28. Минимальное значение отношения, при котором обеспечивалась необходимая начальная остойчивость судна, оказалось равным 3,1. Данные табл. 29 иллюстрируют остойчивость и посадку газозова при различных вариантах загрузки, в диаграмму статической остойчивости для случая полной загрузки газозова показана на рис. 50.

Для судов, оборудованных вертикальными цилиндрическими цистермами, выбор отношения ширины к осадке или количества твердого балласта, удовлетворяющих условиям остойчивости, непосредственно связан с принятой высотой цистерм, а следовательно, с грузоместностью судна и его архимедисовостью. Увеличение высоты цилиндрических цистерм приводит к увеличению их вместимости, но одновременно повышается центр тяжести, что естественно, ухудшает остойчивость судна. Связь между высотой цистерм, весом твердого балласта и отношением $\frac{B}{T}$ можно выразить из уравнения начальной остойчивости

$$h = \varphi + z_c - z_g. \quad (42)$$

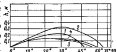


Рис. 49. Диаграммы статической остойчивости газозова «Ultragaz» при различных вариантах загрузки.

1 — судно порожнее ($D = 5,0$ м; $z_g = 9,55$ м; $h = 0,48$ м); 2 — судно порожнее с балластом в количестве 15 м ($D = 5,0$ м; $z_g = 1,80$ м; $h = 0,58$ м); 3 — судно в трюме с балластом в количестве 15 м ($D = 5,0$ м; $z_g = 1,51$ м; $h = 0,54$ м); 4 — судно в трюме с балластом в количестве 20 м ($D = 5,0$ м; $z_g = 1,35$ м; $h = 0,48$ м).

Таблица 28

Основные элементы и характеристика элементов галсового, образованного цилиндрическими цистернами и выходящих различное отклонение $\frac{B}{T}$

Характеристики	Отклонение $\frac{B}{T}$		
	2,5	3,5	4,5
Длина между перпендикулярами $L_{\perp}$, м	93,0	92,0	92,0
Ширина B , м	13,3	14,5	15,7
Осадка T , м	5,3	4,8	4,5
Возвышение D , м	4960	4960	4960
Метацентрическая высота A , м	-0,73	+0,25	+1,34
Отклонение $\frac{B}{T}$	-0,065	0,017	0,085

Таблица 29

Остойчивость и весовая нагрузка с вертикальными цилиндрическими цистернами при различных вариантах нагрузки

Элементы цистерны и площадь обслуживания галсового	Варианты нагрузки		
	порожнем	с жидкой грузой	с балластом
Вместимое водонамещение, м	1935	4960	3500
Объемное водонамещение, м ³	1890	4840	3470
Средняя осадка, м	2,00	4,77	3,53
Абсолютная центр тяжести (ЦТ), м	-5,47	0,00	-0,55
Абсолютная центр тяжести (ЦТ), м	0,83	0,00	0,46
Возвышение ЦТ над осевой, м	5,70	5,65	5,12
Пределная метацентрическая высота, м	240	128	145
Абсолютная ЦТ цистерны, м	1,84	-0,46	0,92
Осадка носа, м	0,82	4,77	3,20
Осадка кормы, м	3,27	4,77	3,80
Возвышение верхнего метацентра над осевой, м	8,20	5,88	6,62
Повышенная метацентрическая высота, м	3,44	0,43	1,25

где A — начальная метацентрическая высота судна, задаваемая или определяемая при проектировании;

$\varphi = \varphi_0 \frac{B}{T}$ — поперечный метацентрический радиус;

$z_0 = \varphi_0 T$ — возвышение центра тяжести;

z_0 — возвышение центра тяжести.

Определим возвышение общего центра тяжести судна

$$z_0 = \frac{D_0 z_0 + P_0 z_0 + (P_0 + P_{12}) z_0 + P_0 z_0}{D}, \quad (43)$$

где

D_0 — вес судна порожнем;

P_0, P_1, P_{12}, P_0 — составляющие весовой нагрузки (топливо, вода и масло, цистерны, груз и твердый балласт);

z_0, z_1, z_{12}, z_0 — соответствующие возвышения центров тяжести (судна порожнем; топлива, воды и масла; цистерны с грузом и твердого балласта).

В свою очередь

$$z_0 = \zeta H, \quad (44)$$

где H — высота борта судна;

ζ — коэффициент, характеризующий относительное положение центра тяжести судна порожнем (определяется по графику на рис. 51, либо берется по судну-прототипу).

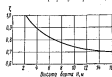


Рис. 51. Зависимость относительного возвышения центра тяжести судна порожнем (без цистерн) от высоты борта.

При условии, что топливо хранится в двойном дне, а положение в двестикилах, возвышение центра тяжести топлива можно определить по формуле

$$z_0 = 0,25H + 0,36z_0, \quad (45)$$

где h_0 — высота двойного дна, которая может быть задана или определена по графику (рис. 52).

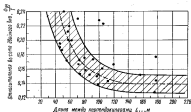


Рис. 52. Зависимость относительной высоты двойного дна от длины судна.
— — — относительная высота двойного дна по Атлантическому Регистру Ллойд.

Ордината центра тяжести цистерны с грузом равна

$$z_{cp} = h_A + a + \frac{h_A}{2}, \quad (45)$$

где h_A — высота цистерны;

a — зазор между днищем цистерны и вторым дном, принимаемый обычно равным 0,38—0,61 м.

Возвышение центра тяжести твердого балласта зависит от его расположения. Если твердый балласт уложен в двойном дном, минимальное возвышение его центра тяжести составит 10 см, а максимальное не превысит 0,6 h_A .

Принимая во внимание сказанное выше, можно записать

$$h = q_1 \frac{S^2}{T} + q_2 T - \frac{D_0}{D} z_H - \frac{P_0}{D} (0,25H + 0,3h_A) - \frac{(P_0 + P_{TP})}{D} \left(h_A + a + \frac{h_A}{2} \right) - \frac{P_0}{D} z_B. \quad (47)$$

После некоторых преобразований и подстановки значений коэффициентов q_1 и q_2 (см. § 6) получим следующие выражения для относительной метacentрической высоты газовоза:

$$\frac{h}{B} = \frac{1}{11A} \cdot \frac{\alpha^2}{\delta} \cdot \frac{B}{T} + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\delta} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{T}{B} - \frac{D_0}{D} \cdot \frac{H}{B} \cdot \frac{T}{B} - \frac{P_0}{D} \left(0,25 \frac{H}{T} \cdot \frac{T}{B} + 0,3 \frac{h_A}{B} \cdot \frac{T}{B} \right) - \frac{(P_0 + P_{TP})}{D} \left(\frac{h_A}{T} \cdot \frac{T}{B} + \frac{a}{B} + \frac{h_A}{2B} \right) - \frac{P_0}{D} \cdot \frac{z_B}{T} \cdot \frac{T}{B}. \quad (48)$$

Решая уравнение (48) относительно $\frac{h}{T}$, $\frac{h_A}{B}$, или $\frac{P_0}{D}$, можно определить значения этих величин, удовлетворяющие уравнению остойчивости. Оптимальные значения указанных величин определяются на основании технико-экономического анализа.

В качестве примера определения оптимальных значений высоты цистерны и количества балласта был сделан технико-экономический анализ газовоза длиной 100 м и шириной 15,5 м, оборудованного 17-ю вертикальными цилиндрическими цистернами общей емкостью около 4000 м³ (рис. 53). Этот анализ показал, что на данное судно целесообразно принять около 200 т твердого балласта, увеличивающего высоту цистерны на 0,5—0,7 м. В результате газовоза провозоспособность судна увеличивается на 7—8%, а себестоимость перевозки 1 т сжиженного газа уменьшается на 3—4%.

В табл. 30 приведены данные по относительным значениям высоты цистерны и количеству твердого балласта на газовозах итальянской и японской постройки (основные элементы этих судов даны в табл. 32).

Таблица 30

Характеристики цистерн и количество твердого балласта на газовозах с вертикальными цилиндрическими цистернами

Характеристики	«Agip» (Япония)	«Petroleum Ocean»
Грузоёмкость, м ³	1850	4080
Количество цистерн	18	17
Высота цистерн h_A , м	8,4	10,9
Вес твердого балласта P_0 , т	100	160
Отношение ширины судна к осадке, $\frac{B}{T}$	2,45	2,99
Относительная высота цистерн, $\frac{h_A}{B}$	0,715	0,700
Относительный вес твердого балласта, $\frac{P_0}{D}$	0,035	0,039



Рис. 53. Зависимость относительной экономической высоты газовоза длиной 100 м и шириной 15,5 м (с 17 вертикальными цилиндрическими цистернами) от количества твердого балласта.

1 — общая экономическая высота; 2 — высота двойного дна.

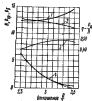


Рис. 54. Влияние отношения $\frac{B}{T}$ на некоторые характеристики теплового режима судна: длина судна 175 м, скорость хода 17 узл., отношение $\frac{L}{B} = 7,0$, дальность плавания 7000 миль, коэффициент общей полноты $\delta = 0,70$.

T — высота, м; B — ширина, м; L — длина, м; δ — коэффициент общей полноты; δ — коэффициент теплоотдачи от осадка; δ — коэффициент теплоотдачи от груза; δ — коэффициент теплоотдачи от балласта; δ — коэффициент теплоотдачи от судна; δ — коэффициент теплоотдачи от судна.

должен достигнуть значения $\frac{B}{T}$ имеет максимум (рис. 54). По условиям обеспечения остойчивости на данном судне при отношении ширины к осадке, равном примерно 3,5, постоянного балласта не требуется. Однако при данной длине газовой и принятом расположении почти всех тоннажных танков и ясу все же для удифферентовки судна понадобится необходимость в приеме постоянного балласта.

В результате проведенных расчетов выяснилось, что для судна грузоподъемностью, близкой к 12 000 т, наиболее целесообразно принимать отношение $\frac{B}{T}$ равным 3,0—3,2 (рис. 54). При этом из судна должно быть удалено 1100—1800 м восточного балласта (4—7% от полного водоизмещения). Дальнейшее увеличение отношения $\frac{B}{T}$ хотя и позволяет уменьшить количество принимаемого балласта, приводит к значительному ухудшению мореходных качеств судна и увеличению потребной мощности главных двигателей.

* Выполнено М. М. Николаевым.

Сжиженные газы обладают следующими пожароопасными и взрывоопасными свойствами:

- способностью образовывать взрывоопасные газозооушные смеси;
- способностью воспламеняться и гореть с выделением большого количества тепла;
- способностью к образованию самовозгорающихся продуктов взаимодействия с сернистыми соединениями, входящими в состав сжиженных газов, с металлами цистерн.

Все горючие газы, находящиеся в определенной концентрации в смеси с воздухом или кислородом, способны взрываться при воспламенении. Взрыв газозооушной смеси — это практически мгновенное сгорание газа, происходящее в присутствии пламени или при нагревании окружающей среды до определенной температуры.

Пределы воспламеняемости различных газов в смеси с воздухом указаны в § 3. С понижением температуры газозооушной смеси значения нижних и верхних пределов концентрации, при которой происходит воспламенение, расширяются и при определенной температуре газозооушные смеси становятся пожароопасными практически в любой концентрации.

Для образования взрывоопасной концентрации не обязательно, чтобы количество газа в воздухе во всем объеме помещения или цистерны было бы таким, как указано в § 3. Иногда достаточно присутствия в газозооушной смеси гораздо меньшего количества газа. Дело в том, что легший газ и амный тяжелее воздуха, поэтому они оседают и концентрируются в нижней части трюма или цистерны. Газозооушные смеси в этих местах могут иметь взрывоопасную концентрацию, кроме того, эта концентрация, вследствие плохой диффузии газов, может поддерживаться в течение очень продолжительного времени.

При движении сжиженного газа по трубопроводам происходит наведение статического электричества с разностью потенциалов до 3000 в. Это создает дополнительную угрозу воспламенения газа за счет возможного появления искры. Наведение статического электричества происходит и при падении струи сжиженного газа в цистерну, что также может вызвать взрыв при первоначальном заполнении цистерны, когда в ней имеется воздух.

При полном озорожении цистерн и продувке их воздухом может произойти взрыв от самовозгорания сернистых соединений железа, образующихся при длительной эксплуатации газозоузов.

Некоторые из нефтяных газов имеют высокую температуру воспламенения (430—460° С), а это значит, что даже при отсутствии

открытого огня может произойти их воспламенение от нагретых предметов.

Расширение сжиженного газа при повышении температуры может привести к разрыву цистерн и трубопроводов. Это свойство газа должно учитываться при определении объема цистерн. Рекомендуемый предел заполнения цистерн по объему составляет ~85%. На трубопроводах жидкостной фазы устанавливаются клапаны, сбрасывающие жидкость при ее температурном расширении. Под воздействием солнечных лучей происходит повышение давления в цистернах, поэтому на них должны устанавливаться предохранительные клапаны.

Для того чтобы исключить возможность попадания газа в трюмы, все трубопроводы, клапаны, измерительные приборы и другая арматура должны монтироваться за бортовой, выступающей над валубой, части цистерн. Каждая цистерна снабжается предохранительными клапанами, через которые излишек газа стравливается в вентиляционные колонны. Место выпуска газа в атмосферу должно находиться над верхней точкой грузовых цистерн примерно на одну треть ширины судна (но не менее, чем на 5 м). Выпускное отверстие следует предусматривать на расстоянии не менее 25' от люка шахты машинного отделения, приемных патрубков и вентиляции, открытых или дверей, ведущих в жилые и служебные помещения.

Все трубопроводы, ведущие к цистернам, снабжаются двумя запорными клапанами, установленными последовательно и расположенными непосредственно на цистернах или рядом с ними. В случае выхода из строя одного из клапанов автоматический клапан должен действовать другой. Один из клапанов должен быть быстрозапорным с дистанционным управлением.

На трубопроводах грузовых системы также устанавливаются последовательно быстрозапорные предохранительные клапаны. Они выполняют функцию защитного устройства, предохраняющего систему от перегрузок при слишком большой скорости течения газа в случае разрыва трубопровода или арматуры. Такие клапаны рассчитываются на номинальный расход газа или жидкости. Обычно они закрыты и открываются лишь при погрузке или выгрузке сжиженного газа. В случае разрыва трубопровода или распространения в системе огня, предохранительные клапаны автоматически перекрываются.

Насосные отделения, где наиболее вероятна утечка газа, располагают обычно в носовой части судна, вдали от жилых помещений. Насосные и компрессорные отделения, а также помещения, в которых размещаются цистерны или трубопроводы, должны иметь доступ только с открытой валубы. В переборках, ограничивающих такие помещения, не допускается устройство отверстий, дверей или колосников. В этих помещениях не разрешается устанавливать электрическое или другое оборудование, которое

может давать искру. Приводные двигатели насосов и компрессоров устанавливаются в специальном моторном отделении и выполняются взрывобезопасными.

Смена воздуха в насосном и моторном отделениях при вентиляции должна составлять соответственно около 40 и 20 объемов в час. В моторном отделении необходимо поддерживать давление несколько выше атмосферного, чтобы в него не попадал воздух из насосного отделения.

На судне должно быть установлено необходимое количество газовых детекторов для регистрации утечек газа во всех помещениях, в которых находятся цистерны или трубопроводы, во всех насосных и компрессорных отделениях и в машинном отделении. В случае повышения концентрации газа у одного из всасывающих патрубков газовых детекторов более чем до 30% от минимально допустимой, должна включаться световая и звуковая сигнализация.

Рекомендуется заполнить пространство, окружающее цистерны для сжиженного газа, судном inertным газом, вырабатываемым специальной установкой за борту судна.

Для отвода статического электричества все цистерны и трубопроводы судна должны иметь эффективное заземление на корпус, который перед началом погрузки или разгрузки судна заземляется проводом, идущим с берега.

Для предотвращения попадания воздуха в цистерны и образования в них взрывоопасной смеси при разгрузке в цистернах оставляют 3—5% газа с целью создания небольшого противодавления. Перед первой загрузкой воздух из цистерн вытесняется углекислым газом или азотом.

В целях предупреждения повышения температуры газа, находящегося внутри цистерн, сверх допустимого предела на судне предусматривается система орошения грузовых цистерн.

На газовых общедоименностях применяют углекислотную систему пожаротушения. С пуском углекислоты в отсек его вентиляция автоматически отключается и включается световая и звуковая сигнализация.

Глава III

Особенности судов, перевозящих сжиженные газы в цистернах под давлением

§ 11.

Конструкция корпуса

Суды, перевозящие газ в цистернах под давлением без охлаждения и под давлением с одновременным охлаждением, имеют двойное дно (иногда двойные борта), устраиваемое, главным образом, с целью выделения в корпусе дополнительных емкостей для приема водяного балласта в рейсе швартовки.

Грузовое пространство на газовозах отделяется от машинного отделения, жилых и рабочих помещений коффердамами. Функции коффердамов могут выполнять сварные газонепроницаемые переборки класса А, устанавливаемые в соответствии с требованиями Международной Конвенции по охране человеческой жизни на море 1960 г.

Как уже указывалось, доступ в грузовые трюмы, помещения насосов и компрессоров должен быть обеспечен только с верхней палубы.

Эти помещения не разрешается располагать в непосредственной близости к машинно-котельному отделению и жилым помещениям.

Размеры элементов конструкции корпуса газовозов определяются в соответствии с правилами классификационных обществ для сухогрузных судов или для танкеров — в зависимости от принятого устройства корпуса и высоты надводного борта. Из-за наличия больших вырезов в палубе судна, перевозящего сжиженный нефтяной газ в цистернах под давлением (рис. 55, 56), особое внимание уделяется обеспечению прочности палубы, а также прочности корпуса на скручивание.

Цистерны размещаются в трюмах газовозов в соответствии с определенными правилами и требованиями (129), (134), (1117), которые впервые были сформулированы Управлением Береговой охраны США.

Для рассматриваемых типов газовозов эти требования сводятся в основном к следующему.

Цистерны разрешается устанавливать как на палубе, так и в закрытых трюмах таким образом, чтобы исключалось их участие в общем изгибе судна. Они монтируются на специальных фундаментах и расширяются растопками, допускающими некоторое взаимное смещение цистерны и фундамента при изгибе корпуса судна. Особое внимание этой проблеме должно уделяться при установке на судне горизонтальных цилиндрических цистерн, имеющих длину, равную длине грузового пространства судна.

Горловинами или верхние части устанавливаемых в трюмах вертикальных цилиндрических цистерн должны выводиться на верхнюю палубу (рис. 57). Горловины должны иметь достаточные размеры для установки необходимой арматуры и оборудования.

Выступающие над верхней палубой судна части цистерн фиксируют взаимное положение самих цистерн и предотвращают их смещение во время хода судна. Конструкции крепления цистерн к верхней палубе должны, во-первых, препятствовать проникновению в трюм влаги и атмосферных осадков и, во-вторых, допускать небольшое смещение цистерн относительно палубы во время движения судна. В связи с этим крепления выполняются эластичным с резиновым уплотнением. На рис. 58 показаны узлы крепления горизонтальной и вертикальной цилиндрических цистерн к палубе.

Цистерны должны устанавливаться в трюмах так, чтобы расстояние между наружной стенкой цистермы и внутренней кромкой осевых шпангоутов составляло не менее 610 мм для судов длиной более 120 м и не менее 380 мм для судов длиной менее 50 м. В остальных случаях минимальное расстояние между цистернами и шпангоутами определяется линейной интерполя-



Рис. 55. Вид из верхней палубы газовоза «Petrobras Leste» (во время постройки).



Рис. 56. Судно «Mandaga Brasília» из стальной.

ний. Примерно такие же нормы даны для расстояния между цистернами.

Расстояние между цистермой и внутренним дном принимается равным не менее 380 мм. При отсутствии двойного дна минимальное расстояние между цистермами и наружным дном должно быть равно высоте вертикального киля для сухогрузного судна аналогичных размеров.

На рис. 59, 60, 61 приведены поперечные разрезы корпусов некоторых газовозов и показаны принятые способы расположения цистерн в трюмах.

Цистерны, устанавливаемые на верхней палубе и в трюмах судна, монтируются на фундаментных рамах. Так, каждая из

горизонтальных цилиндрических цистерн судна «Lili Tholstrup», имеющая длину 16,5 м и диаметр 6,3 м, смонтирована на трех поперечных и одной продольной фундаментных рамах. Поверх фундаментных рам уложены деревянные подушки толщиной 15–20 мм, на которые и устанавливаются цистерны. По бокам цистерн напротив фундаментных рам приварены специальные проушины. Также же проушины имеются на фундаментных рамах. Болты пропускаемые через проушины, обеспечивают жесткое соединение, допускающее некоторое смещение цистерн в связи с температурными деформациями, каткой, изгибом судна и т. п.

Отрыв проушин от цистерн предотвращается установкой болтов с меньшей прочностью на разрыв и срез по сравнению с проушинами.

По торцам цистерм не имеют крепления к корпусу судна. Напротив торцов, примерно на расстоянии 200 мм от них, к поперечным переборкам судна приварены ограничительные планки тазового сечения (рис. 62).



Рис. 57. Установка горизонтальных цилиндрических цистерн на судно «Marion P. Billups».

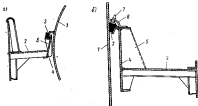


Рис. 58. Узлы крепления цилиндрических цистерн к корпусу судна: а — крепление горизонтальной цилиндрической цистерны на судно «Lilith»; б — крепление вертикальной цилиндрической цистерны на судно «Tedo Mar».

1 — цистерна для жидкого газа; 2 — якорь; 3 — подкрепляющая прокладка из искусственного дерева; 4 — болты; 5 — килев; 6 — приваренная планка; 7 — шпандельный киль.

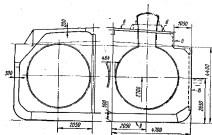


Рис. 59. Поперечный разрез корпуса цистерны «Торона» Марк № 1а.

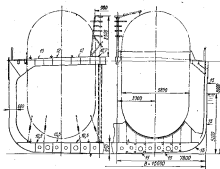


Рис. 61. Поперечный разрез корпуса цистерны «Petrolcar» Orefes.

Рис. 62. Схема калитного расположения цистерны и поперечный перебор в трюме на цистерне «Lilli Tholstrup».

1 — горизонтальный поперечный перебор; 2 — поперечный перебор; 3 — горизонтальный перебор.



§ 12

Грузовые цистерны. Расчет на прочность

Расчет цистерн на прочность производится по правилам классификационных обществ, причем цистерны рассматриваются как сосуды I класса, работающие под давлением.

Толщина обшивки цистерны определяется исходя из расчетного давления, описываемого выражением

$$p = p_0 + 2p_g + 100h. \quad (49)$$

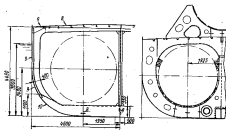


Рис. 60. Поперечный разрез корпуса цистерны «L. P. Mark № 2».

где p_0 — давление перевозимого газа или смеси газов при температуре $+45^\circ\text{C}$;

p_s — статическое давление жидкого газа в расчетной точке цистерны при ее полном заполнении.

При определении расчетного давления ориентируются на наиболее летучий из газов, которые должны перевозить судно.

Если судно предназначается для эксплуатации в районах, где температура воздуха всегда ниже $+45^\circ\text{C}$, классификационными требованиями допускается установление величины p_0 , соответствующей более низкой температуре.

Для изолированных цистерн, рассчитанных на перевозку газа под давлением с одновременным охлаждением, p не должно быть меньше, чем давление газа, находящегося в сжиженном состоянии при расчетной температуре.

В ряде случаев к этому давлению необходимо прибавить давление, обусловленное ударами жидкости о стенки цистерны. Такие удары могут иметь место при неполном заполнении цистерн в результате резкой остановки судна или при резонансе между колебаниями сжиженного газа в цистерне и колебаниями самого судна. Период собственных колебаний сжиженного газа внутри цистерны можно определять по следующим формулам [45]:

— для сферических цистерн

$$\tau = 2\pi\delta_s \sqrt{\frac{R}{g}}; \quad (50)$$

— для вертикальных цилиндрических цистерн

$$\tau = 2\pi\delta_s \sqrt{\frac{R}{g} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{R} \cdot \pi\right)^2}}; \quad (51)$$

— для горизонтальных цилиндрических цистерн при поперечной волне

$$\tau = 2\pi\delta_s \sqrt{\frac{R}{g}}; \quad (52)$$

— при продольной волне

$$\tau = 2\pi\delta_s \sqrt{\frac{1}{g} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi h}{l}\right)^2}}. \quad (53)$$

Здесь R — радиус цистерны;

h — высота заполнения цистерны;

g — ускорение силы тяжести;

l — длина цистерны;

π — число пи; $\pi^2 \approx 9,87$;

δ_s — коэффициент, равный 3,81 при $\pi = 1$ и 7,62 при $\pi = 2$;

δ_s — коэффициент, определяемый по графикам рис. 63.

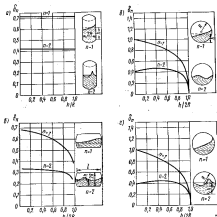


Рис. 63. Форма поверхности сжиженного газа при колебаниях: а — в вертикальной цилиндрической цистерне; б — в вертикальной цилиндрической цистерне (поперечная волна); в — в горизонтальной цилиндрической цистерне (продольная волна); г — в горизонтальной цистерне.

Дополнительное давление, возникающее внутри цистерны вследствие удара, имеет существенное значение лишь для горизонтальных цилиндрических цистерн и может быть определено из выражения

$$p_p = \gamma \cdot l \cdot 10^{-8} \text{ кг/см}^2, \quad (54)$$

где γ — удельный вес сжиженного газа.

Для уменьшения давления, возникающего в результате колебаний сжиженного газа и достигающего весьма значительных величин в длинных горизонтальных цилиндрических цистернах, последние обычно оборудуются несколькими поперечными отбой-

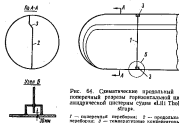


Рис. 64. Схематическое представление в поперечном разрезе горизонтальной цилиндрической цистерны судна «Lili Thorildstr.»

1 — внутренний переборки; 2 — продольная переборка; 3 — температурные компенсаторы.

ными переборками. Кроме того, в этих цистернах иногда устанавливают продольную переборку для уменьшения свободной поверхности жидкости.

В качестве примера на рис. 64 показано устройство горизонтальной цилиндрической цистерны судна «Lili Thorildstr». Каждая цистерна на судне разделена одной продольной и тремя поперечными переборками. Переборки конструктивно выполнены таким образом, что имеют возможность свободно деформироваться в зависимости от колебаний температуры внутри цистерны. На рис. 64 показана также конструкция температурных компенсаторов, используемых в этих цистернах.

Толщина обшивки цилиндрических и сферических цистерн (в мм) определяется согласно Правилам Английского Регистра Ллойда [34] по формуле:

$$t = \frac{pD}{\sigma_{\text{доп}}} + 1,6, \quad (55)$$

где p — рабочее давление, кг/см^2 ;
 D — внутренний диаметр цистерны, м;
 $\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемые напряжения, равные $\frac{1}{3,5}$ от временного сопротивления стали, применяемой для изготовления цистерны, кг/см^2 ;
 c — коэффициент, принимаемый для цилиндрических цистерн равным 1,9, а для сферических — 3,8.

Для определения толщины обшивки оконечностей цилиндрической цистерны применяется следующая формула:

$$t_{\text{ок}} = \frac{pD_0^2}{8,44 \times 10^6 k^2} \left(\frac{r}{R} + 0,15 \right) \left(\frac{r}{R} + 0,05 \right) + 0,8, \quad (56)$$

где D_0 — наружный диаметр доннышка, мм;
 k — коэффициент, принимаемый равным 1,0 для доннышка, изготовленного из одного листа, и 0,95 для доннышка, изготовленного из двух или более листов;
 h — высота доннышка в мм, определяемая по формуле

$$h = R_0 - \sqrt{\left(R_0 - \frac{D_0}{2}\right) \left(R_0 + \frac{D_0}{2} - 2r_0\right)};$$

r, r_0 — соответственно внутренний и наружный радиусы переходного участка между доннышком и цилиндрической частью цистерны, мм;
 R, R_0 — соответственно внутренний и наружный радиус кривизны доннышка, мм.

В полученные по приведенным формулам толщины обшивки цистерны необходимо внести поправки, учитывающие местные напряжения вследствие реакции опор и креплений (при положении судна без крена и с креном 30°) и динамические нагрузки от бортовой, килевой и вертикальной качки, возникающие разными удвоенной статической нагрузке от давления сжатого газа.

Фундаменты цистерн должны выдерживать дополнительные динамические нагрузки, направленные вертикально вниз и принимаемые равными в оконечностях судна полнотонному весу цистерны с грузом, а в средней части судна — одностороннему весу цистерны с грузом.

Поперечные опорные крепления цистерн рассчитываются при условии крена судна на 30° . Расчетная нагрузка определяется суммированием статической и динамической нагрузок, которая рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{дин}} = G (0,03a + 0,30), \quad (57)$$

где a — расстояние по высоте от главной ватерлинии до точки приложения динамической нагрузки, отстоящей от верхней кромки цистерны на 0,4 ее высоты, м;
 G — вес цистерны с грузом, т.

Продольные опоры цистерн проектируются с учетом динамических сил, равных 0,36G, и приложенных в центре тяжести цистерны.

Материал цистерн и их изоляция

Для изготовления цистерн, работающих при температурах до минус 45° С применяются углеродистые или углеродно-марганцовистые стали. Качество применяемых сталей выбирается в зависимости от минимальной температуры, необходимой для хранения сжиженного газа. Эта температура не должна быть выше определенной по формуле:

$$t_2 < t_1 - 0,25 (t_1 - t_3), \quad (58)$$

где t_1 — рабочая температура в цистерне (но не выше 0° С);
 t_2 — температура кипения сжиженного газа при атмосферном давлении.

Испытания материала цистерн на ударную вязкость производятся при температуре $t_{исп} = t_2 - 20^\circ \text{С}$.

В СССР транспортные (в частности, железнодорожные) цистерны для сжиженного газа изготавливаются из стали марки 1022Д (по ГОСТ, 5058—57) с пределом прочности 48 кГ/мм² и пределом текучести 33 кГ/мм² [117]. За рубежом судовые цистерны для сжиженного газа изготавливаются из стали с пределом прочности 50—60 кГ/мм² и выше и пределом текучести не менее 34 кГ/мм².

Так, цистерны газовозов типа «Petrobras Oeste» изготовлены из стали с пределом прочности 60—80 кГ/мм². Эти цистерны рассчитываются на 18 кГ/см² и испытывались давлением воздуха 19,8 кГ/см² и воды 30,5 кГ/см². Для изготовления цилиндрической части и верхней оконечности цистерны применены листы (толщиной 27 и 15 мм соответственно) из стали с пределом прочности 90 кГ/мм² [147]. Нижняя оконечность цистерн изготовлена из листов толщиной 22 мм (сталь с пределом прочности 60 кГ/мм²).

На газовозе «Gialleo» установлены вертикальные цилиндрические цистерны из стали ВН43 [133], имеющей следующий химический состав (в проментах):

Железо	97,500	Фосфор	0,025
Углерод	0,160	Сера	0,025
Кремний	0,200	Никель	0,550
Марганец	1,300	Ванадий	0,130

Предел прочности этой стали равен 53 кГ/мм², предел текучести — около 43 кГ/мм², а относительное удлинение — 22%.

Для изготовления цистерн, рассчитанных на перевозку сжиженного газа под давлением с одновременным охлаждением, могут применяться те же углеродистые или углеродно-марганцовистые стали, что и для изготовления цистерн высокого давления. Однако обычно цистерны, предназначенные для перевозки газа комбинированным способом, изготавливают из стали с содержанием никеля

до 9%. Так, сферические цистерны газовоза «Mondrag Brasília», спроектированного для перевозки сжиженного газа при температуре минус 12° С и давлении около 3 кГ/см², изготовлены из стали с 9%-ым содержанием никеля.

Цистерны, рассчитанные на перевозку газа под давлением с одновременным охлаждением, покрывают изоляционным материалом. В качестве изоляции применяют асбест, стекловолно, минеральную вату, пенопласт, полуретан и т. п. Изоляция крепится к цистернам с наружной стороны с помощью сетки на специальных шпалах, приваренных к корпусу цистерны, либо с помощью клея. Иногда она наносится на корпус в жидком расплавленном состоянии (как, например, полиуретан). Сверху изоляционный слой покрывается толстыми стальными или алюминиевыми листами для защиты от воздействия влаги.

Выступающие над верхней палубой части цистерн, подверженные воздействию прямых солнечных лучей, покрывают алюминиевой или какой-либо другой теплоотражающей краской. Для охлаждения выступающей части цистерн устанавливается система орошения.

§ 14

Арматура цистерн
и контрольно-измерительные приборы

Каждая цистерна для сжиженного газа оборудуется минимум одной горловиной с локсом: размерами не менее 380 × 460 мм.

На верхней части цистерн устанавливаются следующие аппаратура и приборы:

- указатели уровня жидкости;
 - предохранительные и вакуумные клапаны;
 - запорные вентили на трубопроводах жидкостной и паровой фаз;
 - манометры для измерения давления паров газа;
 - термометры для измерения температуры сжиженного газа.
- Расположение устройств и аппаратуры на вертикальной цилиндрической цистерне показано на рис. 66.

Указатель уровня жидкости должен устанавливаться так, чтобы можно было легко следить за степенью заполнения цистерны. Обычно применяют поплавковые указатели уровня.

В СССР на цистернах для сжиженного газа применяют, главным образом, два типа поплавковых указателей уровня: визуальный, типа ВУУЖ и дистанционный типа ИУВЦ-ШК.

Визуальный указатель уровня жидкости ВУУЖ предназначен для измерения уровня сжиженных газов в горизонтальных цилиндрических цистернах, находящихся под давлением. Выпускае-

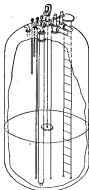


Рис. 65. Расположение аппаратуры на цистерне.

Наибольшую опасность представляет нагрев цистермы открытым пламенем при пожаре. Резкое повышение давления в этом случае может привести к взрыву цистермы. Предохранительные клапаны в случае пожара должны стравить всю паровую фазу, образующуюся в емкости. Вторым по степени опасности для грузовых цистерм является случай подачи насосом сжиженного газа в уже заполненную цистерку. Для предотвращения разрыва цистерны предохранительные клапаны должны обеспечить страдание сжиженного газа в таком количестве, которое конденсировало бы его поступление.

В соответствии с действующими в СССР нормами каждая цистерна, работающая под давлением более 0,7 атм, должна быть оборудована двумя предохранительными клапанами: рабочим и контрольным. Проходные сечения обоих клапанов одинаковы. Давление, при котором клапаны срабатывают, устанавливается таким образом, что всегда сначала открывается контрольный клапан, а затем рабочий. Методика расчета предохранительных кла-

паны рассчитаны на максимальный уровень не более 2,4 м.

Указатели уровня ИУВЦ-ШН предназначены для измерения уровня в емкостях больших размеров (высотой до 9 м) с передачей показаний на центральный приборный щит.

Измеритель уровня снабжен шкалой и пневматической системой дистанционной передачи показаний, а также специальным механизмом для периодического контроля работы прибора. Подробное описание указанных приборов и принципа их действия дано в работах [101, 133].

Назначение предохранительных клапанов является защита цистерн и связанных с ними систем от недопустимого повышения давления. Возникновение в цистерме чрезмерно высоких давлений может произойти вследствие ряда причин (повышение температуры сжиженного газа, заполнение цистерм газом с более высоким давлением паров, чем расчетное, подача насосом сжиженного газа в уже заполненную цистерку и т. п.).



Рис. 66. Предохранительные клапаны одной из грузовых цистерм судна «Мэппен Р. Виллер».



Рис. 67. Устойчивый термометр для измерения температуры сжиженного газа в вертикальной цилиндрической цистерме.



Рис. 68. Вид на верхнюю палубу газового судна «Гед Н. Виллер».

панов, а также описание их конструкций приводятся в работе [101, 107].

На рис. 65 показаны предохранительные клапаны, установленные на одной из цистерн судна «Marion P. Villars».

Вакуумные клапаны используются в тех случаях, когда при откачке сжиженного газа или в результате резкого снижения температуры наружного воздуха в цистернах может образоваться вакуум.

По требованию классификационных обществ к вакуумным клапанам должны присоединяться трубопроводы от баллонов с инертными газами.

Каждая цистерна снабжается манометрами, показывающими давление газа под поверхностью жидкости в цистерне. На манометрах обозначается максимальное и минимальное допустимое для цистерны давление.

Для определения температуры сжиженного газа каждая цистерна снабжается термометром, который устанавливается в средней ее части в специальном кармане (рис. 67). Место арматуры кармана необходимо изолировать с тем, чтобы термометр показывал температуру сжиженного газа в цистерне, а не температуру ее стенки.

Все контрольно-измерительные приборы и арматура должны устанавливаться на цистернах так, чтобы к ним была обеспечена свободный доступ.

На рис. 68 показано взаимное расположение переднего мостика газозова «Fred H. Villars» и арматуры с контрольно-измерительными приборами на грузовых цистернах.

§ 15

Грузовая система

Газовозы, как и любые другие суда, оборудуются противопожарными и противопожарными системами, а также системами, обеспечивающими нормальные условия жизнедеятельности находящихся на борту людей. Кроме того, газовозы оборудуются рядом специальных систем, необходимость которых обусловлена особенностями перевозимого груза. К их числу относятся грузовая и газоотводящая системы, система орошения грузовых цистерн, система подачи в цистерны инертных газов, система поддержания режима хранения сжиженного газа в цистернах и некоторые другие.

Специфические свойства сжиженных газов, являющихся насыщенными жидкостями с малым удельным весом и большой упругостью насыщенных паров, обуславливают отличие грузовых систем газовозов от грузовых систем нефтеналивных судов.

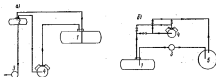


Рис. 68. Принципиальные схемы грузовой системы газовозов, перевозящих сжиженный газ в цистернах высокого давления: а — с промежуточной цистерной; б — без промежуточной цистерны.

1 — грузовая цистерна; 2 — промежуточная цистерна; 3 — береговая емкость; 4 — манометр; 5 — береговая емкость.

Грузовая система газозова состоит из жидкостного и парового трубопроводов, насосов, компрессоров и промежуточной цистерны.

На рис. 69, а показана принципиальная схема наиболее распространенной грузовой системы судна, перевозящего сжиженный газ в цистернах высокого давления. Разгрузка таких судов осуществляется следующим образом. Компрессор откачивает пары газа из промежуточной цистерны, сжимает их до давления, равного или несколько превышающего давление в грузовых цистернах, и нагнетает в грузовые цистерны. Возникающий перепад давлений между промежуточной и грузовой цистернами заставляет сжиженный газ течь в промежуточную цистерну, из которой он насосом нагнетается в разгрузочную магистраль.

Промежуточная цистерна устанавливается так, чтобы ее выпускное отверстие возвышалось над всасывающим патрубком насоса не менее чем на 1 м. Уровень жидкости в промежуточной цистерне поддерживается автоматическим регулятором, периодически выключаящим насос или компрессор. При повышении уровня в цистерне регулятор останавливает компрессор, а при снижении — насос.

Обычно объем промежуточной цистерны не превышает 10—15 м³. Иногда в качестве промежуточной используется обычная грузовая цистерна.

На рис. 69, б показана схема грузовой системы без промежуточной цистерны. В этом случае при выгрузке компрессор откачивает газ из береговой цистерны, сжимает его и нагнетает в судовую цистерну. За счет подпора давления сжиженный газ непрерывно поступает к откачивающему насосу.

Погрузка сжиженного газа в судовые цистерны осуществляется аналогичным образом.

Степень заполнения цистерн сжиженным газом определяется в зависимости от его удельного веса при расчетной температуре (максимальной температуре, которой может достигнуть сжиженный газ в наименее благоприятных условиях нормальной эксплуатации).

Для цистерн, в которых газ перевозится без охлаждения и у которых менее 10% поверхности подвергается воздействию прямых солнечных лучей, расчетная температура принимается равной наибольшей из двух:

— температуры кипения сжиженного газа при давлении, которое приводит в действие предохранительный клапан. Это давление обычно равно давлению на 10% (или на $0,25 \text{ кг/см}^2$) выше нормального рабочего давления;

— температуры, определяемой по формуле

$$t = t_0 - \frac{t_0 - t_g}{12 + \frac{26}{\sqrt{v}}} \quad (59)$$

где $t_0 = 45^\circ \text{C}$ для тропических широт;
 $t_0 = 40^\circ \text{C}$ для субтропических широт;
 t_g — температура сжиженного газа при погрузке;
 l — продолжительность рейса в днях;
 v — объем цистерны в м^3 .

Таблица 3/

Основные характеристики центробежных насосов для перевозки сжиженных газов

Характеристика	Марка насоса	
	ЧН-50х	ОН-50х
Проводимость при дифференциальном напоре 400 м вод. ст. и при $q=2800 \text{ об/мин}$, $\text{м}^3/\text{час}$	48	80—95
Мощность привода электродвигателя, кВт	25—30	125
Диаметр рабочего вала, мм	160—220	224—275
Дифференциальный напор, м вод. ст.	360—480	380—780
Коэффициент полезного действия, %	30—53	35—53
Вес насоса, кг	2900	3910
Габаритные размеры, мм:		
длина	3905	4140
высота	1120	1340

В любом случае расчетная температура принимается не ниже 30°C для газозисов, плавающих в тропических водах, и не ниже 25°C для газозисов, плавающих в других районах.

Для цистерн, у которых воздействию прямых солнечных лучей подвергается более 10% поверхности, расчетная температура должна увеличиваться на 1°C на каждые 10% поверхности сверх этого предела.

В случае оборудования судна системой орошения выступающих над верхней палубой частей цистерн, указанная поправка к расчетной температуре может не вводиться.

Для изолированных цистерн расчетная температура определяется в зависимости от теплопроводности изоляции или провозимости установок повторного сжижения газа.

Цистерна заполняется сжиженным газом так, чтобы незаполненным оставался объем, составляющий не менее 1% от общего объема цистермы при расчетной температуре.

§ 16

Типичные газозисы с цистернами высокого давления

Основные элементы наиболее типичных газозисов с цистермами высокого давления приведены в табл. 32.

Наименьшим судном этого типа является газозис «Ultragas» (рис. 72), предназначенный для транспортировки сжиженного пропана через Магелланов пролив [114].

«Ultragas» оборудован одной горизонтальной цилиндрической цистермой длиной 10,34 м и диаметром 3,5 м. Рабочее давление в цистерме равно 16,7 атм, толщина ее стенок составляет 20 мм, а донышек — 18 мм. Цистерна весом 34 т возвышается над палубой и не имеет жесткого соединения с корпусом. Непроницаемость соединения цистерны с палубой обеспечивается прокладкой из синтетического каучука, которая устанавливается между полкой комбината палубного настила и угольником, приваренным по периметру цистермы (рис. 58).

Главный двигатель судна — четырехтактный 8-цилиндровый дизель MWM типа RHS 518A мощностью 195 л. с. при 1230 об/мин, соединенный через резерв-редуктор с передаточным отношением 3 : 1 с трехлопастным гребным винтом диаметром 1350 мм. Вспомогательный дизель мощностью 54 л. с. при 1200 об/мин служит для привода генератора переменного тока мощностью 37,5 кВт, напряжением 380/220 в, а также компрессора производительностью 26 $\text{м}^3/\text{час}$ и центробежного насоса производительностью 30 $\text{м}^3/\text{час}$.

Таблица 32

Основные элементы наиболее типичных газоразов с дистриктами

Наименование судна	Год постройки и страна строитель	Высота надстройки мостов, м	Длина водоизмещения, м	Глубина осадки в балласте, м	Регистрация водо- измещения (тонн)	Главные размеры			Скорость в м/ч в различных условиях						Коэффициент обвода лозасты А	Число фрезов Е	Скорость хода моторизованная узел. в час	Длина фидельного двигателя, м	Средняя температура воздуха, °С	Тип двигателя
						L, м			V, м/ч											
						1	2	3	4	5	6	7	8	9						
«Ultragen»	1960 (ФРГ)	90	48 130	40	50 130	22,6	2,5	2,5	1,40	4,5	30,8	2,70	1,35	0,967	0,311	3,8	180	100	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные
«Polaris» (Mars No. 1)	1960 (Япония)	350	243 873	193	656 1602	48,0	3,1	4,0	2,00	2,2	31,2	3,25	1,90	0,700	0,229	3,8 10,0	600	70	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные
«Chima» (Mars No. 2)	1961 (Япония)	418	441 1500	-	541 1500	41,8	8,5	4,2	3,2	4,7	3,8	2,22	1,80	0,688	0,259	3,8 10,8	500	+	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные
«Signo» (Thalys)	1962 (Дания)	525	450 1470	275	301 1470	32,2	8,7	5,9	3,00	6,3	10,7	2,80	1,75	-	0,192	10,5 11,0	480	+	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные
«L. P. Mars No. 2»	1962 (Япония)	600	470 1680	222	326 1680	43,0	9,3	4,2	3,60	5,1	9,9	2,97	1,25	0,879	0,245	10,0 11,8	550	+	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные
«Kuma» (Thalys)	1963 (Дания)	870	415 1400	325	364 1400	45,9	10,1	4,2	3,80	4,5	31,8	2,77	1,14	-	0,205	10,5	450	+	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные
«Kuga»	1963 (Франция)	720	403 1390	380	489 1390	52,1	8,5	5,3	3,5	6,1	3,9	2,48	1,95	-	0,250	11,0	870	коэффициент	вертикаль- ные дизель- ные	
«Cap Carbon»	1964 (Голландия)	836	442 1715	435	1045 1715	38,9	10,1	4,5	1,8	3,9	12,0	2,32	1,95	6,715	0,214	11,8 12,0	1 000	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные	
«Lili» (Thalys)	1961 (Дания)	660	403 1380	516	781 1380	38,3	9,6	3,3	3,90	6,1	18,8	2,88	1,25	0,860	0,258	12,0	1 000	коэффициент	вертикаль- ные дизель- ные	
«Detektor»	1959 (Франция)	900	550 1800	490	847 1800	56,9	9,3	4,8	3,02	6,9	13,8	2,57	1,32	0,672	0,383	12,3	1 000	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные	
«L. P. Mars No. 1»	1960 (Япония)	1 002	634 1974	351	3377 1974	58,0	10,9	5,8	3,79	9,4	10,4	3,88	1,48	0,945	0,236	12,0 11,4	550	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные	
«Vinci»	1963 (Италия)	1 205	-	700	1167 1470	58,9	9,9	5,9	4,58	5,9	10,9	2,17	1,28	-	-	12,9	1 280	коэффициент	вертикаль- ные дизель- ные	
«Eskaba» (Mars)	1964 (Япония)	1 327	874 1800	-	1286 1800	63,6	11,4	5,9	4,0	5,3	10,9	3,82	1,90	0,808	0,232	10,5 12,0	720	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные	
«Garden» (Mars)	1964 (ФРГ)	1 400	1070 1970	-	1119 1970	62,9	11,5	5,9	4,70	5,4	11,3	3,42	1,98	-	0,232	10,5 12,0	1 440	коэффициент	вертикаль- ные дизель- ные	
«Cap Bore»	1960 (Франция)	1 508	-	838	1256 1800	65,4	11,4	5,9	2,9	4,8	12,1	2,92	1,41	0,750	0,242	10,9	1 250	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные	
«Petrolas» (Leda)	1959 (Италия)	1 738	1140 2030	915	1300	71,6	10,8	5,9	5,90	6,8	12,0	3,50	1,58	0,695	0,269	12,8	1 500	двигатель	вертикаль- ные дизель- ные	

Продолжение табл. 32

Наименование судна	Год постройки и страна-строитель	Длина наибольшая по ватерлинии, м	Ширина наибольшая по ватерлинии, м	Глубина наибольшая по ватерлинии, м	Высота мачты (или мачт), м	Главные ре-			Удельные показатели					Коэффициент общей сложности	Число турбин	Средняя скорость хода, узлов	Мощность главного двигателя, л. с.	Средняя дальность плавания, миль	Тип котла	
						L	B	H	L ₁	B ₁	H ₁	L ₂	B ₂							H ₂
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
«Agraria Quarta»	1940 (Италия)	1 550	2180	890	3600	71,4	11,7	3,7	4,18	8,1	15,0	2,45	1,11	0,898	0,282	12,5	1 600	под давлением	вертикальный калоризатор	
«Galileo» *	1942 (Франция)	1 886	2270	979	3772	73,8	11,9	3,6	4,78	8,2	15,6	2,55	1,10	0,940	0,244	11,8	1 150	то же	то же	
«Gaulois»	1945 (Франция)	2 366	2608	1230	4830	76,3	12,0	3,9	4,6	8,2	11,2	2,61	1,43	-	0,558	12,0	2 140	комбинированный	горизонтальный с калоризатором	
«Keruan»	1945 (Япония)	2 088	2260	-	3606	86,9	15,4	7,5	5,80	9,9	15,7	3,00	1,59	-	0,253	15,5	2 088	под давлением	сферический	
«Loulie»	1944 (Франция)	2 580	2280	1500	-	82,0	12,8	8,6	4,6	6,7	12,9	2,78	1,43	0,984	0,249	16,0	2 810	комбинированный	горизонтальный с калоризатором	
«Fred H. Billeys»	1943 (Голландия)	3 140	2250	1706	2880	90,0	14,2	7,4	4,90	9,6	12,5	2,85	1,50	-	0,253	18,0	2 580	под давлением	вертикальный калоризатор	
«Superstition»	1943 (Франция)	2 400	1878	1860	2780	91,6	14,1	7,3	5,0	6,5	12,8	2,80	1,45	-	0,258	17,8	2 670	комбинированный	горизонтальный с калоризатором	
«Sara Caron»	1945 (Франция)	3 019	2088	2080	-	84,9	14,4	6,8	5,1	5,8	16,8	3,00	1,08	-	0,251	14,3	3 080	то же	сферический	
«Gyssen»	1945 (Франция)	3 880	2650	2240	-	93,0	14,8	7,3	5,2	6,6	12,7	2,84	1,49	0,675	0,250	15,8	2 710	"	горизонтальный с калоризатором	
«Petrobras Carlo»	1945 (Бразилия)	4 308	3266	2125	3385	106,0	15,8	8,0	5,52	6,4	10,5	2,96	1,53	0,583	0,220	16,0	3 890	под давлением	вертикальный калоризатор	
«Nordham»	1942 (Франция)	4 084	-	2083	4137	109,8	16,3	8,8	4,28	8,5	12,9	3,64	1,80	-	0,214	12,0	3 480	комбинированный	горизонтальный с калоризатором	
«Lavieyron»	1942 (Франция)	5 250	-	2890	5106	102,7	16,3	8,8	5,26	6,4	12,6	3,14	1,68	-	0,216	12,5	4 280	то же	то же	
«Naveglio Brasil» *	1941 (Бразилия)	7 735	5150	4205	6432	118,5	18,9	10,7	6,88	6,1	11,2	2,98	1,82	-	0,296	15,8	4 508	"	сферический	
«San Pablo Rico» *	1939 (Испания)	12 770	33 406	8109	25 279	164,2	27,3	16,3	10,82	7,3	14,1	3,94	1,32	0,719	0,187	18,4	16 800	под давлением	вертикальный с калоризатором	

* Судно, кроме газа, сжигает нефть или нефтепродукты.
** На нем установлены турбины с прямым приводом, не включенные.

судно "San Pablo Rico", на котором установлены турбины.

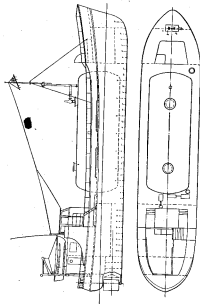


Рис. 72. Газовоз «Signe Tholstrup».

Газовоз «Signe Tholstrup» (рис. 73), построенный в 1967 г. в Дании, оборудован пятью сферическими цистермами диаметром 5,9 м и вместимостью по 105 м³ каждая (150). Для приема водного балласта в порожнем рейсе на судне выделены специальные емкости в двойных бортах и двойном дне.

Главным двигателем судна служит дизель Бурмейстер и Вайн мощностью 480 л. с. при 310 об/мин, работающий на впит регулируемого шага. Электроэнергетическая установка состоит из трех дизель-генераторов мощностью по 20 квт. Разгрузка судна осуществляется одним насосом и двумя компрессорами.

Судно для одновременной перевозки сжиженного нефтяного газа и нефти «Esso Puerto Rico» построено в 1968 г. (185). Однопалубный трехпостройной (с высотой трюков) нефтегазовоз спроектирован в соответствии с требованиями Американского бюро судостроения (рис. 14). Корпус судна имеет продольную систему набора.

Для перевозки сжиженного газа (бутана) используются 58 цистерм, из которых 40 расположены вертикально (в 11 центральных грузовых танках) и 18 (по 9 с каждого борта) — горизонтально (в бортовых танках). Вертикальные цистерны имеют длину 15,5 м, диаметр 5,12 м, вес 64,5 т и вмещают по 271 м³ сжиженного газа. Горизонтальные цистерны, имеющие длину 10,7 м, диаметр 3,35 м и 3,96 м, вмещают соответственно 82,5 и 112,5 м³. Цистерны и обслуживающие их системы спроектированы на давление 10,5 кг/см². Суммарный вес цистерн составляет около 3500 т, а с учетом фундаментов и креплений — 4000 т.

Судно имеет два насосных отделения, в одном из которых установлено оборудование для выгрузки сжиженного газа: два паровых насоса, конденсатор, компрессор и сепаратор.

Погрузка и выгрузка нефти осуществляется тремя паровыми центробежными насосами, размещенными в отдельном насосном отделении, где, кроме того, установлены балластный насос и два запальных паровых поршневых насоса.

Грузовое устройство судна состоит из двух стрел на баке для обслуживания сухогрузного трюма, двух стрел в средней части для работы с грузовыми шлангами, двух стрел на баке и двух стрел на палубе юта для обслуживания владных.

Главным двигателем судна служит паровая турбина мощностью 16 000 л. с.

Газовоз «Petrobras Leste» (первоначальное название «Agafros Terza») построен в 1969 г. в Италии (145) и является однопалубным судном с баком, ютом и машинным отделением, расположенным в корме (рис. 74).

Корпус судна сварной, за исключением клепаных швов горизонтального киля, скутового пояса, шпрингера и стрингеров угольников, и набран по смешанной системе набора. Динцевой набор усилен продольными и поперечными балками, образующими фундаменты цистерн.

Главным двигателем судна служат четырехтактный дизель МАН типа GNV40/60 с турбонаддувом мощностью 1890 л. с. при 273 об/мин.

Все вспомогательные механизмы газозова имеют электрический привод. Электроэнергетическая установка состоит из двух дизель-генераторов мощностью по 80 квт и одного дизель-генератора мощностью 56 квт. Топливные цистерны рассчитаны на хранение 140 м дизельного топлива для главного двигателя и 8 м газойля для вспомогательных двигателей. Дальность плавания судна составляет 6000 миль, экипаж — 24 чел.

Газовое голландское построение «Fred H. Billups» (рис. 75) предназначен для эксплуатации в Карибском море [154]. Он представляет собой однопалубное судно с двойным дном. Грузовые цистерны, установленные вертикально в двух трюмах на втором деке, производят через палубу и проникают к комингсам швартов через расширительные компенсаторы. Палуба в районе швартов усилена.

Трюмы газозова могут заполняться водяным балластом, двойное дно используется для приема топлива, пресной воды, а также жидкого балласта. В корму от трюмов размещается главный топливный бункер и отстойные цистерны, а в нос — балластный танк и сухогрузный трюм. Вместимость топливных цистерн составляет 305 м, балластных — 470 м и пресной воды — 146 м.

Грузовые цистерны имеют диаметр 5,02 м и высоту 9,7 м. Всего на судне установлено 19 цистерн, изготовленных из сварочной стали (с пределом прочности 52 кг/мм²) и рассчитанных на рабочее давление 17,6 кг/см² (при испытательном давлении 32 кг/см²). Толщина обшивки цистерн равна 39 мм, вес каждой цистерны — примерно 58 т. Все выходные трубопроводы, предохранительные клапаны, манометры, а также люк находятся на верхней части цистерн.

Выгрузка сжиженного газа производится двумя вертикальными компрессорами производительностью по 255 м³/час и двумя центробежными насосами производительностью по 240 м³/час.

Насосы и компрессоры установлены на главной палубе в корму от грузовых цистерн, а приводные электродвигатели — в помещении, отделенном от насосного газонепроницаемой переборкой. Грузовая система рассчитана на одновременную выгрузку двух сортов груза, причем для каждого из них предусмотрен отдельный насос и компрессор. По бортам судна установлены присоединяемые к трубопроводам для сжиженного газа диаметром 155 мм и двух — для паровозного диаметром 102 мм. На трубопроводах установлены клапаны с пневматическим и ручным приводом. В случае аварии все клапаны могут быть перекрыты из насосного отделения.

Грузовая система судна «Fred H. Billups» отличается от грузовых систем большинства газозовов отсутствием промежуточных

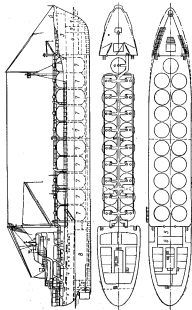


Рис. 75. Газовоз «Fred H. Billups».

1 — форштевень; 2 — носовая оконечность; 3 — носовая оконечность; 4 — носовая оконечность; 5 — носовая оконечность; 6 — носовая оконечность; 7 — носовая оконечность; 8 — носовая оконечность.

цистерны. Выгрузка сжиженного газа производится выжиманием его компрессорами из цистерн и насосом. Такая система требует специальных мер для предотвращения попадания жидкости в компрессоры, каждый из которых имеет со стороны всасывания сепаратор с указателем уровня, выключающим двигатель компрессора в случае повышения уровня жидкости в сепараторе. При погрузке и выгрузке сжиженный газ проходит через фильтр. Уровень жидкости в каждой цистерне определяется специальными уровнями. Избыток газа при повышении давления удаляется из цистерн через фок-мачту с установленным на топе вентилятором мощностью 10 л. с.

Жилые помещения, рассчитанные на 28 чел., расположены в кормовой части и оборудованы системой кондиционирования воздуха.

Главным двигателем газозода служит четырехтактный дизель Веркспур типа TMA6S 3910 с турбонаддувом мощностью 2100 л. с. при 275 об/мин. Электроэнергетическая установка состоит из трех генераторов мощностью по 160 кВт с приводом от дизелей мощностью 196 л. с. при 1200 об/мин.

Первый японский газозод «L. P. Mari № 1» (рис. 76) осуществляет перевозки сжиженного газа (бутана) между японскими островами [139]. Около 550 т сжиженного бутана хранится на судне в 13 вертикальных цилиндрических цистернах высотой по 7,0 м, однанадцать из которых имеют диаметр 4,1 м, а две — 3,0 м. Цистерны рассчитаны на давление 7 кг/см², что соответствует температуре бутана плюс 45° С.

Погрузка судна осуществляется насосом производительностью 75 м³/час и компрессором производительностью 200 м³/час, которые установлены в насосном отделении, размещенном в носовой части судна. К насосу сжиженный газ поступает из промежуточной цистерны вместимостью 20 м³, расположенной над насосным отделением. Для охлаждения выступающих над палубой верхних частей цистерн предусмотрена система орошения.

Главным двигателем судна служит дизель Харима-Зульдер типа 6TAD 24 мощностью 5500 л. с. при 383 об/мин (максимальная мощность 630 л. с. при 400 об/мин).

Электроэнергетическая установка судна состоит из трех дизель-генераторов мощностью по 90 кВт, вырабатывающих переменный ток напряжением 225 в.

Вместимость топливных цистерн составляет 44 м³, балластных — 260 м³, цистерн пресной воды — 70 м³. Суточный расход топлива равен 2,3 т.

Дальность плавания судна составляет 3900 миль, экипаж насчитывает 29 чел.

Японский газозод «Torane Mari № 1» (рис. 77) представляет собой однопалубное судно с трюком в районе грузового пространства. Сжиженный газ перевозится в четырех горизонтальных ци-

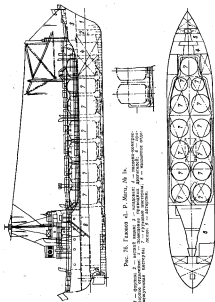


Рис. 76. Газозод «L. P. Mari, № 1».

1 — форпик; 2 — главный танк; 3 — сепаратор; 4 — насос; 5 — сепаратор газа; 6 — сепаратор газа; 7 — сепаратор газа; 8 — сепаратор газа; 9 — сепаратор газа; 10 — сепаратор газа; 11 — сепаратор газа; 12 — сепаратор газа; 13 — сепаратор газа.

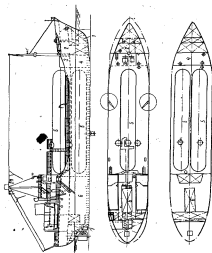


Рис. 79. Газовоз «Агрипио Кварто»
№ 25.

1 — форштевень; 2 — носовая оконечность; 3 — носовая оконечность; 4 — носовая оконечность; 5 — носовая оконечность; 6 — носовая оконечность; 7 — носовая оконечность.

Итальянский газовоз «Agripio Quarto» (рис. 79) предназначен для перевозки пропана, бутана и бутандина в 18 цилиндрических цистернах диаметром 4,28 м. Высота двух из них равна 9,02 м, а остальных — 8,32 м [156]. Цистерны рассчитаны на давление 17,6 кг/см², толщина стенок 35 мм, вес — около 32 т. Объем каждой из двух больших цистерн 112 м³, остальные имеют емкость по 100 м³. Грузоподъемность судна по пропану составляет 835 т, по бутану — около 1000 т.

Главным двигателем газовоза служит дизель Фнат типа C3685 мощностью 1920 л. с. при 250 об/мин. Электроэнергетическая установка состоит из трех дизель-генераторов: двух мощностью по 100 кВт и одного 70 кВт.

Судно для перевозки сжиженных газов и авиационного бензина «Galileo» (рис. 80) построено для чилийских судовладельцев [133]. На судне установлено 14 цилиндрических вертикальных цистерн, которые рассчитаны на перевозку пропана при температуре до плюс 45° С. Авиационный бензин перевозится в танках, расположенных в средней части судна. Цистерны для газа изготовлены из стали с пределом прочности 53 кг/мм² и испытаны при давлении около 26 кг/см².

В качестве главного двигателя на судне используется дизель MAN типа V6V30/45 мощностью 1400 л. с. при 320 об/мин.

Судно «Petrobras Oeste» (рис. 81) является первым газовозом из трех построенных в Японии для бразильской компании Петробраз. В 17 вертикальных цилиндрических цистернах газовоза, расположенных в два ряда, перевозятся 1810 м пропана или 2175 м бутана. Высота цистерн составляет 10,9 м, диаметр 5,85 м, суммарная емкость 4030 м³. Они рассчитаны на давление 18 атм.

Материал цистерн — сталь К.О с пределом прочности 80 кг/мм², толщина стенок равна 27 мм, вес одной цистерны составляет около 42 т.

С целью улучшения остойчивости на судно принято 160 т твердого балласта. Вместимость балластных цистерн на газовозе составляет 480 м, а топливных — 301 м.

Главным двигателем судна служит дизель Вурнейстер и Вайн типа 650VTBT-110 мощностью 3000 л. с. при 162 об/мин (максимальная мощность 3450 л. с. при 170 об/мин). Электроэнергетическая установка состоит из трех дизель-генераторов переменного тока мощностью по 210 кВт при напряжении 445 в.

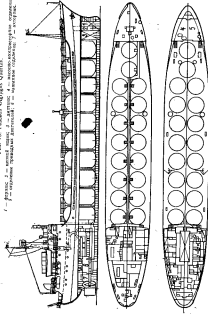
Выгрузка сжиженного газа осуществляется при помощи четырех центробежных электрических насосов производительностью по 100 м³/час с напором 6 кг/см² и двух поршневых компрессоров производительностью по 500 м³/час с перепадом давления 3 кг/см².

Экипаж судна — 29 чел.

Первые советские газовозы «Крым» (рис. 82) и «Красная» предназначены для перевозки сжиженного газа в четырех сферических цистернах емкостью по 520 м³, имеющих диаметр 10,0 м

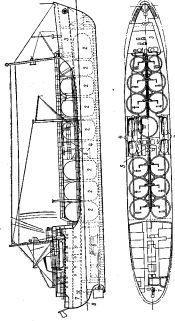
Par. 79. Faccina d'Altagas Quantas.

t — время; J — ток; A — ампер; d — диаметр электродов; ρ — удельное сопротивление материала; l — расстояние между электродами; U — напряжение; U_0 — напряжение холостого хода.



2. — 30. Оценки по показателям качества жизни и здоровья населения.

Рис. 80. Схемы для определения характеристик фазов и температур плавления.



16). Цистерны изготовлены из стали с пределом прочности 60 кг/мм^2 и рассчитаны на давление 18 кг/см^2 .

Балластные цистерны общей емкостью 1180 м^3 расположены в двойных бортах. Емкость топливных цистерн каждого судна составляет 620 м^3 , дальность плавания — $10\,000$ миль.

Разгрузка сжиженного газа осуществляется двумя насосами производительностью по $300 \text{ м}^3/\text{час}$ и двумя компрессорами производительностью по $500 \text{ м}^3/\text{час}$ через присосную цистерму.

В качестве главных двигателей на судах используются дизели Зульера 6TAD48 мощностью 2000 л. с. при 224 об/мин (максимальная мощность 2400 л. с. при 235 об/мин). На каждом судне установлено три дизель-генератора мощностью по 114 кВт и аварийный дизель-генератор мощностью 32 кВт , вырабатывающие переменный ток напряжением 400 в.

Экипаж каждого газозвеза — 38 чел.

В 1962 г. авторами этой книги был разработан проект газозвеза с цилиндрическим корпусом [25], основным преимуществом которого является повышенный почти на одну треть коэффициент utilization водовмещения по грузоподъемности.

Общий вид этого судна показан на рис. 83.

Судно имеет следующие основные элементы и характеристики:

Длина, м	
включая	101,0
между переборками	92,0
Ширина, м	14,0
Высота борта, м	8,0
Осадка, м	5,4
Водовмещение в полные грузы, м	4060
Вместит, т	2200
Мощность энергетической установки, л. с.	2500
Скорость хода, узл.	11,25

По сравнению с аналогичным по размерам судном, оборудованным вертикальными цилиндрическими цистернами, описываемый газозвеза может перевозить за один рейс примерно на 650 т ($\sim 37\%$) груза больше.

Газозвеза «Descartes» (рис. 84) является первым в мире судном, предназначенным для перевозки сжиженных газов комбинированным способом, т. е. под давлением с одновременным охлаждением [135]. «Descartes» — одноваттовое, однопалубное, двух-трехмачное судно с баком и ютом с двойным дном по всей длине, в котором находится пресная вода, топливо и балласт. Корпус судна выбран по поперечной системе набора.

Сжиженный газ (бутан и пропан) перевозится в 8 цилиндрических горизонтальных цистермах, из которых 6 установлены в грузовых трюмах, а 2 — на верхней палубе. Две нижние кормовые и кормовые цистерны предназначены для перевозки бутана и рассчитаны на рабочее давление 9 кг/см^2 . Остальные цистерны

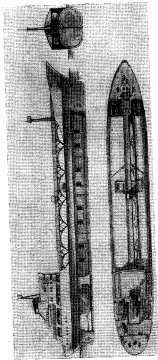


Рис. 83. Судно с цилиндрическим корпусом.

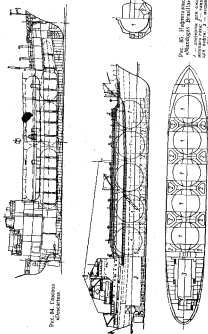


Рис. 85. Нефтевоз «Mulloria Brasil», оборудованный для перевозки сжиженного пропана. 1 — цистерна для сжиженного пропана; 2 — цистерна для нефти; 3 — цистерна для сжиженного газа

Рис. 85. Нефтевоз «Mulloria Brasil»

рассчитаны на перевозку как бутана, так и пропана. При перевозке пропана цистерны охлаждаются холодильной установкой, состоящей из трех компрессоров, причем в качестве хладагента используется сжиженный пропан.

Разгрузка газовой осуществляется с помощью двух центробежных насосов производительностью по $85 \text{ м}^3/\text{час}$ и компрессора, установленных в специальном помещении в носовой части судна.

Газовое «Descartes» оборудовано автоматической системой обнаружения утечки газа, которая при помощи звуковой и световой сигнализации оповещает команду о появлении газа и трюмах или помещении электродвигателей.

Главным двигателем судна служит 12-цилиндровый четырехтактный реверсивный дизель 12РА2 с валовым мощностью 1000 л. с. (максимальная мощность 1200 л. с.).

Электроэнергетическая установка судна состоит из двух генераторов переменного тока мощностью по 120 кВт при напряжении $380/400 \text{ в}$, имеющих в качестве приводов четыре дизеля типа ДКА1 общей мощностью 320 л. с.

Экипаж судна — 12 чел.

Нефтевозов «Mulloria Brasil» (рис. 85) построен в 1961 г. Пять грузовых цистерн судна, предназначенных для перевозки сжиженного газа, имеют сферическую форму. При рабочем давлении $2,7-3,1$ атм температура пропана в цистернах не должна быть выше -10°C (-142°C). Соответствующее охлаждение цистерн обеспечивается двумя рефрижераторными установками производительностью 200 и $375 \text{ тыс. ккал/час}$.

Грузовые цистерны газовой длиной $14,5 \text{ м}$ с толщиной стенок $15,5/21 \text{ мм}$ изготовлены из стали с 9%-ным содержанием никеля и изолированы снаружи полурезиновым пенопластом, который покрыт пропитанным смолой стекловолокном. Выступающие над верхней палубой части цистерн закрыты металлическим кожухом.

При 97%-ном заполнении цистерн они вмещают 4200 т пропана. Нефть или нефтепродукты в количестве 1400 т перевозятся в яля U-образных танках, установленных между грузовыми цистернами для сжиженного газа.

Благодаря специально спроектированным обводам корпуса и заводу части цистерн над верхней палубой использование подпалубного пространства судна в районе грузовых трюмов удалось довести до 80%.

Разгрузка сжиженного газа на нефтевозов производится жетом насосами (по одному на каждую цистерну) производительностью по $300 \text{ м}^3/\text{час}$ при давлении $4,9 \text{ кг/см}^2$. Предусмотрена возможность одновременной разгрузки нефти (или нефтепродуктов) и сжиженного газа.

Разгрузка нефти обеспечивается двумя насосами производительностью по $60 \text{ м}^3/\text{час}$.

Главным двигателем судна служит дизель Гёттнер ДМ 680/1500 мощностью 4500 л. с. при 112 об/мин.

Электроэнергетическая установка судна состоит из трех дизель-генераторов мощностью по 375 квт, вырабатывающих ток напряжением 440 в. В качестве привода к генераторам используются дизели Листер-Блекстон с турбонадувом мощностью по 416 л. с. при 720 об/мин.

Экипаж нефтегазового — 41 чел.

Газовоз «Lilli Tholstrup» (рис. 86) предназначен для перевозки пропана, бутана и аммиака в двух горизонтальных цилиндрических цистернах, расположенных в трюмах в диаметральной плоскости судна. Цистерны вмещают 440 м³ пропана, 505 м³ бутана или 530 м³ аммиака. Они изолированы снаружи минеральной ватой и рассчитаны на перевозку газов при температуре плюс 40° С, которой соответствует давление паров пропана 6,5—7,0 атм. Длина каждой цистерны равна 16,5 м, диаметр 6,3 м и вес 60 т. Толщина стенок составляет 19,5 мм.

Рефрижераторно-компрессорная установка поддерживает в цистернах постоянную температуру сжиженного газа.

Главным двигателем судна служит дизель МАН типа 82U421 максимальной мощностью 1250 л. с. при 375 об/мин.

Разгрузка сжиженных газов осуществляется тремя компрессорами и двумя насосами пропускной способностью по 40 м³/час каждый.

Экипаж судна состоит из 16 чел.

Норвежский газовоз «Nordfina» (рис. 87) предназначен для перевозки пропана, бутана и аммиака в шести изолированных горизонтальных цилиндрических цистернах, рассчитанных на рабочее давление 6,6 кг/см², что соответствует температуре пропана плюс 5° С [143]. Бутан и аммиак в сжиженном виде могут перевозиться под давлением 6,6 кг/см² при более высокой температуре. Четыре из установленных на судно цистерн размещены в трюме, а две — на верхней палубе.

Разгрузка сжиженного газа осуществляется насосами пропускной способностью по 100 м³/час и компрессорами.

В качестве главного двигателя используется 6-цилиндровый дизель Бурмейстер & Вайт типа 50VTRF10 мощностью 3450 л. с. при 170 об/мин. Экипаж судна состоит из 34 чел.

Французский газовоз «Lavoisier» (рис. 88) отличается от описанных газовозов наличием двойных бортов и двойного дна для приема водного балласта.

На судне установлено 6 изолированных горизонтальных цистерн, рассчитанных на перевозку сжиженного газа при давлении 6,3 кг/см² и температуре плюс 5° С. Две цистерны диаметром 6,35 м и суммарной вместимостью 1570 м³ размещены на верхней палубе. Остальные четыре цистерны общей вместимостью 3600 м³ установлены в двух трюмах.

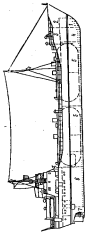


Рис. 86. Газовоз «Lilli Tholstrup».
1 — корпус; 2 — корпус изолированной цистерны; 3 — цистерна сжиженного газа; 4 — цистерна сжиженного газа; 5 — цистерна сжиженного газа; 6 — цистерна сжиженного газа; 7 — цистерна сжиженного газа.

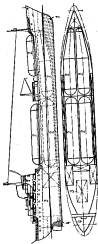


Рис. 87. Газовоз «Nordfina».
1 — корпус; 2 — корпус изолированной цистерны; 3 — цистерна сжиженного газа; 4 — цистерна сжиженного газа; 5 — цистерна сжиженного газа; 6 — цистерна сжиженного газа; 7 — цистерна сжиженного газа.

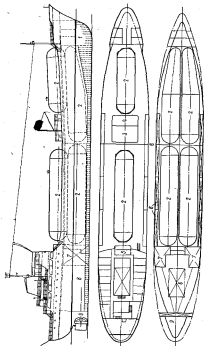


Рис. 88. Газовоз «Gaston Micaud».

1 — форштевень; 2 — грузовой люк; 3 — люк-конвейер; 4 — люк-конвейер; 5 — люк-конвейер; 6 — люк-конвейер; 7 — люк-конвейер; 8 — люк-конвейер.

Для охлаждения подаваемого с берега на судно сжиженного газа на судне предусмотрена специальная рефрижераторная установка производительностью 50 м³/час пропана, охлажденного с 30 до 5° С.

Разгрузка газозова осуществляется тремя компрессорами и четырьмя насосами производительностью по 135 м³/час.

Для главных двигателей судна — 6-цилиндровые дизели Пилстик максимальной мощностью по 2130 л. с. при 430 об/мин — работают на один гребной вал через редуктор, снижающий скорость вращения до 170 об/мин.

Электроэнергетическая установка судна состоит из трех дизель-генераторов мощностью по 320 квт, вырабатывающих трехфазный переменный ток напряжением 450 в. Дальность плавания газозова составляет 5250 миль, экипаж — 26 чел.

На газозове «Gaston Micaud» (рис. 88) сжиженный газ перевозится в 6 горизонтальных цилиндрических цистернах, изготовленных из стали с пределом прочности 38 кг/мм² и рассчитанных на рабочее давление 9 кг/см² [134]. Толщина стенок цистерны равна 18 мм, а сферических днишек — 17 мм. Все цистерны имеют по три приваренные поперечные переборки, установленные с целью уменьшения площади свободной поверхности жидкого газа. В центральной части каждой цистерны имеется горловина, на крышке которой установлены приемные патрубки грузовой системы, контрольно-измерительные приборы и три предохранительных клапана. Цистерны установлены на обшитые деревом металлические фундаменты.

Из шести грузовых цистерн четыре размещены в трюме, а две — на верхней палубе.

Поскольку цистерны рассчитаны на перевозку сжиженного газа при температуре, не превышающей 24° С (соответствующей давлению пропана 9 кг/см²), должна быть обеспечена их изоляция. Она выполняется из слоя минеральной ваты толщиной 70 мм, закрытого алюминиевыми листами. Верхние цистерны покрыты, кроме того, слоем волнистого металла толщиной 5 мм. Газозов «Gaston Micaud» приспособлен для приема сжиженного газа при любой температуре и давлении.

Разгрузка судна производится тремя электронасосами производительностью по 80 м³/час и тремя компрессорами производительностью по 220 м³/час.

Главным двигателем газозова служит 8-цилиндровый дизель мощностью 1440 л. с. при 330 об/мин (максимальная мощность 1680 л. с. при 350 об/мин). Судовая электростанция состоит из трех дизель-генераторов мощностью по 187 квт.

Испанский газозов «Vaisi» (рис. 90) построен в соответствии с требованиями Бюро Веретас и эксплуатируется между Канарскими островами и портами Бискайского залива и Средиземного моря [132].

Сжиженный газ перевозится на судне в 6 горизонтальных цилиндрических цистернах диаметром 4,25 м, рассчитанных на давление 9 кг/см². Две пары цистерн равны соответственно 20, 18 и 16,2 м. Две пары цистерн размещены в двух трюмах и одна пара — на верхней палубе. Каждая цистерна изолирована полиуретановым пенопластом и слоем асбеста толщиной 30 мм.

В насосно-компрессорном отделении, расположенном на верхней палубе в средней части судна, установлено три компрессора и два насоса производительностью по 100 м³/час. Приводные электродвигатели находятся в отдельном помещении и соединяются с компрессорами и насосами валами, проходящими через газонепроницаемые переборочные сальники.

Главный двигатель судна — 8-цилиндровый реперный дизель MWM типа TBRH-348 с турбонаддувом мощностью 1300 л. с. при 375 об/мин непосредственно соединен с гребным винтом. Два дизель-генератора имеют мощность по 160 квт.

Глава IV

Особенности судов, перевозящих охлажденные нефтяные газы при температуре кипения

§ 17

Конструкция корпуса

Суда, перевозящие сжиженный газ при охлаждении до температуры кипения, как правило, имеют двойное дно и продольные переборки, отделяющие бортовые балластные отсеки.

В носовой и кормовой части грузового пространства обычно устраивают коффердамы. Поперечные переборки в грузовых помещениях могут быть единичными, если они изготовлены из высокоустойчивой стали, не теряющей свои прочностные свойства при низкой температуре в случае утечки газа из цистерн.

Цистерны должны проектироваться и устанавливаться так, чтобы сжиженный газ был отделен от элементов набора корпуса по крайней мере двумя непроницаемыми стенками. Вторая стенка может быть неметаллической. Ее можно не предусматривать, если свойства сжиженного газа или конструкция изоляции не допускают охлаждения элементов набора ниже минус 5° С (в случае изготовления корпуса из обычной углеродистой стали).

Грузовые цистерны устанавливают на фундаментах такой формы, которая обеспечивает наименьшую концентрацию напряжений в корпусных конструкциях и цистернах. Кроме фундаментов цистерны должны иметь подкрепления с обеих сторон, передающие набору судна усилия, возникающие, например, при бортовой и килевой качке судна.

Фундаменты и подкрепления должны допускать некоторое смещение грузовых цистерн при охлаждении.

Передача холода к судовым конструкциям через элементы фундаментов и подкреплений должна быть минимальной с тем, чтобы

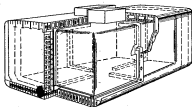


Рис. 90. Конструкция корпуса газового баллона в районе грузового пространства.

температура корпусных конструкций, изготовленных из обычной углеродистой стали, была не ниже минус 5° С.

На рис. 91 показана конструкция корпуса газового баллона, имеющего двойное дно и двойные борта в районе грузового пространства. Крепление цистерн на этом судне обеспечивается специальными рывками, смонтированными на переборках, настиле двойного дна и под палубой и охватывающими цистерну в продольном и поперечном направлениях.

§ 18

Цистерны. Материалы для их изготовления. Изоляция

При перевозке охлажденного до температуры кипения сжиженного газа обычно применяют прямоугольные цистермы, позволяющие наиболее полно использовать кубатуру грузового пространства.

При определении размеров грузовых цистерм в расчет принимается удельный вес сжиженного газа, рабочее давление предохранительных клапанов (приближаемое обычно равным 0,15—0,20 кг/см²) и ускорения, возникающие при ходе судна.

Величина ускорений и максимальные напряжения в конструктивных элементах цистерм, возникающие при плавании судна в море, регламентируются классификационными обществами. Подробно об этом рассказано в § 22.

При расчете цистерн следует учитывать также возможность понижения температурных напряжений при их заполнении сжиженным газом.

Пример детального расчета цистерн приведен в § 22. Там же подробно рассмотрены проблемы выбора материала для изготовления цистерн и изоляции. Здесь излагаются лишь некоторые общие соображения, касающиеся конструкции цистерн и изоляции.

Цистерны для перевозки сжиженных нефтяных газов с температурой выше минус 50° С могут изготавливаться из сталей, близких по своим свойствам к обычной углеродистой стали, но подвергнутых специальной термической обработке с целью повышения их вязкости при низкой температуре. Для этой цели можно использовать также легированные стали с содержанием никеля 1,5—2,5%.

Изоляция цистерн и внутренней поверхности трюмов должна обладать высокими изолирующими качествами. Главные требования к изоляционному материалу заключаются в том, чтобы он был негорючим, устойчивым против действия влаги и перевозимого сжиженного газа, имел низкую теплопроводность.

Абсолютно негорючими также изоляционные материалы, как шлаковая и стеклянная вата, однако они имеют малую прочность и высокую гигроскопичность. Балловое дерево при сравнительно хороших изолирующих качествах обладает высокой прочностью. Оно обладает еще и тем положительным свойством, что проникнувший в капилляры жидкой газ при нагревании испаряется и образует газовую подушку, препятствующую дальнейшему проникновению жидкости. Однако балловое дерево имеет сравнительно высокую стоимость.

Полиэтилен и полиуретан при незначительном объеме веса обладают хорошими изолирующими свойствами, они достаточно влагостойчивы и имеют высокую прочность на сжатие.

Общая прочность изоляционного покрытия зависит от выбора его конструкции. Если изоляция выполняется в виде листов, то большое неудобство создает проблема заделки стыков. За последние годы достигнуты большие успехи в использовании в качестве изоляционных материалов полиуретановых пенопластов. В частности, найдены способы наведения их на изолируемую поверхность путем распыливания.

Толщина изоляции должна выбираться такой, чтобы температура обшивки и элементов набора корпуса судна была не ниже установленной правилами классификационных обществ. При изготовлении корпуса судна из обычной углеродистой стали обшивку по правилам Английского Регистра Ллойд не должна иметь температуры ниже минус 1° С, когда в грузовых цистермах сохраняется рабочая температура и температура воздуха составляет плюс 4,5° С, а по правилам Французского Бюро Веритас — не ниже минус 5° С.

Арматура цистерны для перевозки охлажденного газа практически не отличается от арматуры цистерны высокого давления. Принципы ее размещения также остаются теми же.

§ 19

Грузовая система. Использование испаряющегося газа

Грузовая система судов, перевозящих охлажденный сжиженный газ, обычно состоит из трубопроводов для жидкости и газа и насосов. В каждой цистерне устанавливается один погружной насос, имеющий привод с верхней палубы. При разгрузке погружные насосы подают сжиженный газ к установленным на верхней палубе центробежным насосам, которые перекачивают газ на берег.

Подача сжиженного газа на судно производится береговыми средствами. Перед погружкой грузовые цистерны освобождают от воздуха путем подачи в них инертного газа. Для этой цели на судне предусматривается небольшая цистерна с жидким инертным газом. Проходя через испаритель, газ поступает в цистерну и вытесняет оттуда воздух (рис. 92). Обычно эта операция выполняется перед первой загрузкой судна, а в последующем в цистерне все время остается некоторое количество испарившегося сжиженного газа, благодаря чему поступление атмосферного воздуха в цистерну не происходит.

Необходимость повторения этой операции возникает после осмотра цистерны или при изменении транспортируемого груза.

После удаления атмосферного воздуха цистерну необходимо охладить до температуры сжиженного газа. Для этой цели каждая цистерна оборудуется системой распыления жидкого газа. Поступающий через эту систему сжиженный газ испаряется и охлаждает внутреннее пространство цистерны. После этого он отводится из цистерны к рефрижераторной установке, где сжимается и вновь направляется в цистерну. Схема охлаждения грузовой цистерны перед погружкой показана на рис. 93.

Конструкция грузовых трубопроводов, по которым перекачивается охлажденный сжиженный газ, должна допускать их смещение, обусловленное резкими колебаниями температуры. Кроме того, они должны иметь надежную теплозащиту. Материалы, применяемые для изготовления трубопровода грузовой системы, а также насосов, клапанов и другой арматуры, должны сохранять свои основные прочностные свойства в условиях низких температур.

Даже самая безупречная изоляция не может полностью исключить подток тепла в цистерны, а следовательно, предотвратить испарение сжиженного газа. Испарение усиливается от

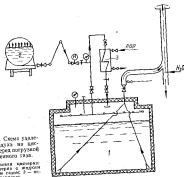


Рис. 92. Схема подачи газа в цистерну перед погружкой сжиженного газа.

1 — газовый цилиндр; 2 — цистерна с жидким инертным газом; 3 — испаритель.

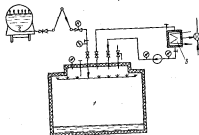


Рис. 93. Схема охлаждения цистерны перед погружкой сжиженного газа.

1 — газовый цилиндр; 2 — цистерна с жидким инертным газом; 3 — конденсатор.

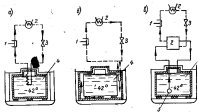


Рис. 94. Возможные схемы охлаждения сжатого газа непосредственно в дистерии.

1 — компрессор; 2 — конденсатор; 3 — дроссельный клапан; 4 — грубая дистерия; 5 — насос.

возмущения жидкости при качке судна. Его можно свести к минимуму при том условии, если груз охлажден настолько, что пронаходящее в грузовые дистерии тепло не доводит сжатый газ до температуры кипения. Этот способ сохранения груза может быть экономически оправдан лишь при переносе газа на небольшие расстояния, когда продолжительность рейсов невелика.

Избавить испарения газа можно также путем его охлаждения непосредственно в дистерии. На рис. 94 показаны некоторые возможные схемы такого охлаждения. Схема «а» предусматривает охлаждение груза змеевиком, установленным в дистерии. В схеме «б» предусматривается охлаждение самой дистерии снаружи. По схеме «в» сжатый газ забирается на дистерию и прокачивается насосом через теплообменник, установленный на верхней палубе, который, в свою очередь, подключен к системе охлаждения.

Перечисленные методы сокращения потерь груза от испарения неэкономичны, так как они связаны с большим расходом энергии. Более целесообразным с этой точки зрения является повторное сжатие испарившегося газа и возвращение его в дистерию. На рис. 95 показаны возможные схемы повторного сжатия нефтяного газа.

По схеме «а» испарившийся газ вначале сжимается и нагревается, а затем поступает в холодильник, проходит через дроссельный клапан, затем, расширившись, сжимается и при температуре кипения снова возвращается в дистерию.

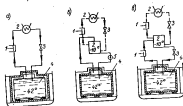


Рис. 95. Возможные схемы повторного сжатия нефтяного газа.

1 — компрессор; 2 — конденсатор; 3 — дроссельный клапан; 4 — грубая дистерия; 5 — насос.

По схеме «а» испарившийся газ проходит через обслуживаемый холодильный установкой конденсатор, где он сжимается и с помощью насоса возвращается в дистерию.

По схеме «б» сжатие производится тем же путем, что и по схеме «а», но испарившийся газ перед поступлением в конденсатор сжимается и затем при температуре сжатия превращается в жидкое состояние. После прохождения дроссельного клапана происходит расширение газа и окончательное его сжатие, при котором давление падает до атмосферного. В этом случае холодильная установка может быть меньше по производительности в денежном отношении с холодильной установкой, принятой в схеме «а».

Каждая из приведенных схем повторного сжатия имеет свои преимущества и недостатки. Выбор наиболее целесообразного из них зависит от конкретных условий транспортировки газаваранта.

Если испарение газа в рейсе предотвратить нельзя, то наиболее простой способ его удаления заключается в выпуске в атмосферу. Однако такой способ весьма нежелателен для перевозимых нефтяных газов, поскольку они тяжелее воздуха.

Весьма эффективно применение испарившегося газа в качестве топлива для главных двигателей судов, перевозящих этот газ. Идеальным было бы использование испарившегося газа непосредственно в газовой турбине. Использование его в качестве топлива для котлов паротурбинных установок не вызывает больших затруднений.

Использование испарившегося газа для судовых двигателей внутреннего сгорания несколько сложнее. В связи с этим

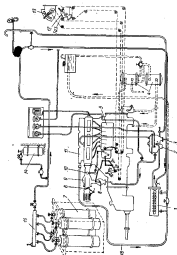


Рис. 96. Система обслуживания дизеля ЗД6, работающего на сжиженном газе. 1 — газопровод от баллона с газом; 2 — редукционный клапан; 3 — фильтр; 4 — газовый клапан; 5 — газовый клапан; 6 — газовый клапан; 7 — газовый клапан; 8 — газовый клапан; 9 — газовый клапан; 10 — газовый клапан; 11 — газовый клапан; 12 — газовый клапан; 13 — газовый клапан; 14 — газовый клапан; 15 — газовый клапан; 16 — газовый клапан; 17 — газовый клапан; 18 — газовый клапан; 19 — газовый клапан; 20 — газовый клапан; 21 — газовый клапан; 22 — газовый клапан; 23 — газовый клапан; 24 — газовый клапан; 25 — газовый клапан; 26 — газовый клапан; 27 — газовый клапан; 28 — газовый клапан; 29 — газовый клапан; 30 — газовый клапан; 31 — газовый клапан; 32 — газовый клапан; 33 — газовый клапан; 34 — газовый клапан; 35 — газовый клапан; 36 — газовый клапан; 37 — газовый клапан; 38 — газовый клапан; 39 — газовый клапан; 40 — газовый клапан; 41 — газовый клапан; 42 — газовый клапан; 43 — газовый клапан; 44 — газовый клапан; 45 — газовый клапан; 46 — газовый клапан; 47 — газовый клапан; 48 — газовый клапан; 49 — газовый клапан; 50 — газовый клапан; 51 — газовый клапан; 52 — газовый клапан; 53 — газовый клапан; 54 — газовый клапан; 55 — газовый клапан; 56 — газовый клапан; 57 — газовый клапан; 58 — газовый клапан; 59 — газовый клапан; 60 — газовый клапан; 61 — газовый клапан; 62 — газовый клапан; 63 — газовый клапан; 64 — газовый клапан; 65 — газовый клапан; 66 — газовый клапан; 67 — газовый клапан; 68 — газовый клапан; 69 — газовый клапан; 70 — газовый клапан; 71 — газовый клапан; 72 — газовый клапан; 73 — газовый клапан; 74 — газовый клапан; 75 — газовый клапан; 76 — газовый клапан; 77 — газовый клапан; 78 — газовый клапан; 79 — газовый клапан; 80 — газовый клапан; 81 — газовый клапан; 82 — газовый клапан; 83 — газовый клапан; 84 — газовый клапан; 85 — газовый клапан; 86 — газовый клапан; 87 — газовый клапан; 88 — газовый клапан; 89 — газовый клапан; 90 — газовый клапан; 91 — газовый клапан; 92 — газовый клапан; 93 — газовый клапан; 94 — газовый клапан; 95 — газовый клапан; 96 — газовый клапан; 97 — газовый клапан; 98 — газовый клапан; 99 — газовый клапан; 100 — газовый клапан.

представляет интерес опыт Каспийского пароходства по применению сжиженного газа для судовых дизелей, описанный в работе [19].

Исследования возможности применения сжиженного нефтяного газа и судовых дизелей были начаты в пароходстве в 1953 г. В настоящее время такой способ использования сжиженного нефтяного газа уже практически применяется при эксплуатации судовых двигателей.

По сравнению с обычными видами жидкого топлива сжиженный газ обладает не только большими экономическими, но и весьма важными технико-эксплуатационными преимуществами. Газовое топливо отличается хорошими детонационными свойствами, поэтому двигатели с принудительным зажиганием могут работать при высокой степени сжатия. Ценное свойство газового топлива заключается в способности полностью и бездымно сгорать при широком диапазоне изменения нагрузки, значительной форсировке и при колебаниях состава рабочей смеси топлива с воздухом. Последнее объясняется хорошим перемешиванием газа с воздухом.

Рабочая смесь газового топлива не содержит жидких фракций. Поэтому при его полном сгорании смазочное масло не разжижается и не смывается со стенок цилиндра (разжижение и пригорание смазки отрицательно сказывается на работе двигателя). При эксплуатации двигателей на газовом топливе расход картерного масла снижается, а срок работы смазки в циркуляционной системе увеличивается примерно в два раза.

Как показал опыт эксплуатации, применение газового топлива позволяет повысить мощность двигателя на 15—20%. При этом дизель легко работает при длительной перегрузке, его параметры не выходят за пределы нормально допустимых, горение отличается бездымностью. Кроме того, отмечается значительное повышение износостойкости и увеличение моторесурса двигателей.

На рис. 96 показана система, обслуживающая дизель ЗД6 мощностью 150 л. с., работающий на сжиженном газе. Этот дизель установлен на одном из буксиров Бакинского порта.

Подробные данные о переоборудовании дизелей для работы на сжиженном газе изложены в работах [19], [89].

§ 20

Суда, перевозящие сжиженные нефтяные газы при температуре кипения

В табл. 33 приведены основные элементы и характеристики газосудов, предназначенных для транспортировки нефтяного газа при температуре кипения и оборудованных прямоугольными изопризматическими цистернами.

Таблица 22

Основные элементы и характеристики газопроводов, транспортирующих

Наименование судна	Год постройки и строительно-строительная	Вместимость 24-суток для газа, м³	Давление, кг/см²	Продолжительность по бутылкам, м	Расстояние между жема (внутренний диаметр), м	Газовые расходы	
						$L_{\text{г.л.}}$, м	Q , м³
«Eco Centre America»	1960 (ФРГ)	3 250	4630	3 350	4096 2968	111,6	14,7
«Guldborg Maru» *	1961 (Дания)	8 478	48 810 62 250	4 800	39 840 20 810	312,3	26,4
«Hensel Maru» *	1962 (Япония)	8 470	22 878 31 350	5 080	16 648 11 358	373,2	33,9
«Hargen»	1965 (Норвегия)	13 980	8179 14 339	8 200	8580	128,0	19,2
«Touren Maru»	1963 (Япония)	32 350	32 350	7 300	15 670 11 690	177,3	22,9
«William R. Green»	1964 (Голландия)	12 720	9850	7 400	10 800 8060	162,7	21,2
«Paul Kaskela»	1964 (Нидерланды)	24 780	35 630	14 250	19 080 14 350	168,7	22,0
«Bridgeport Maru»	1962 (Япония)	19 490	25 630 36 080	17 800	28 880 12 480	175,8	20,9
«Bridgeport Maru No. 2»	1964 (Япония)	35 700	35 640	20 700	25 700	170,3	22,5
«Hokurika Maru»	1965 (Япония)	46 558	39 660 42 810	27 000	29 120 19 960	190,0	28,0
«Bridgeport Maru No. 3»	1965 (Япония)	46 760	35 600	27 480	—	186,0	28,0
Проект Гидрокарбон	Формы	37 080	16 038	15 600	—	176,8	26,4

* Судно, введённое в эксплуатацию газ. перевозкой нефти.

** На судне «Guldborg Maru» и «Touren Maru» применяются турбодетандеры.

сжиженный газ, охлажденный до температуры кипения

Условия и их соотношения						δ	ρ	Средняя температура кипения при атмосферном давлении, °C	Масса газового топлива, т. с.
M , м	T , °C	$\frac{L_{\text{г.л.}}}{D}$	$\frac{L_{\text{г.л.}}}{D}$	$\frac{Q}{T}$	$\frac{Q}{T}$				
13,0	8,08	7,0	11,2	2,92	1,95	—	0,148	8,5	1 480
15,2	11,88	7,0	14,8	2,89	1,59	0,868	0,178	15,6 17,0	14 280
14,4	9,70	7,8	12,4	3,35	1,48	0,772	0,186	14,5 18,2	3 250
13,0	8,24	6,8	16,8	2,24	1,44	0,675	0,331	16,9 17,5	8 400
14,4	9,84	7,8	12,4	3,53	1,44	—	0,180	14,5	7 258
12,2	7,18	6,7	11,4	3,96	1,74	—	0,220	16,0 17,6	9 800
11,7	8,55	6,7	11,4	3,79	1,64	—	0,213	16,7	10 350
16,7	5,24	7,0	10,5	3,70	1,80	0,595	0,215	17,2 18,2	11 800
18,3	9,74	6,5	9,8	2,82	1,87	—	0,168	15,0 16,5	11 600
15,4	9,90	6,8	9,8	2,52	1,85	0,765	0,167	15,7 17,3	12 080
18,3	9,85	6,2	18,0	2,68	1,87	—	0,182	15,0	11 280
10,2	6,92	7,3	12,0	2,73	1,80	—	—	16,2	11 848

Турбодетандеры установлены, на суда остальных — датчики.

Первое крупное судно такого типа «Goshu Maru» (рис. 97) предназначено для одновременной перевозки примерно 5000 т сжиженного газа и 38 000 т нефти [182]. Грузовое пространство судна двумя продольными и 11-ю поперечными плоскими переборками разделено на 36 танков, причем в пяти центральных танках установлены изолированные цистерны для сжиженного газа, изготовленные из никелевой стали. Для увеличения объема цистерн корпус газозона выполнен с тронком.

Главным двигателем судна служит 8-цилиндровый дизель Бурмейстер и Вайн типа 84-VTBF-180 мощностью 14 300 л. с. при 104 об/мин (максимальная мощность 16 800 л. с. при 110 об/мин). Электроэнергию вырабатывают три генератора мощностью по 340 квт.

Вместимость топливных цистерн (3220 м³) позволяет газозону совершать рейсы протяженностью до 18 000 миль.

Экипаж судна состоит из 60 чел. Стоимость постройки газозона составила примерно 2,75 млрд. иен (т. е. на 25% больше стоимости танкера такой же длины).

Судно для перевозки сжиженных газов и нефти «Nisseki Maru» (рис. 98) переоборудовано из танкера типа Т-2, построенного в 1945 г. [183]. Переоборудование заключалось в замене грузовой части судна с сохранением носовой и кормовой оконечностей.

Судно имеет три цистерны для сжиженных нефтяных газов грузоместностью по 1800 т, расположенных в средней части судна между бортовыми, носовыми и кормовыми танками для нефти. Две цистерны предназначены для пропана, а одна — для бутана.

Цистерны изготовлены из холоднокатаной стали и изолированы снаружи пенополиуретаном. Внутри цистерн поддерживается температура минус 40° С. Испаряющиеся газы подвергаются повторному сжижению специальной рефрижераторной установкой, расположенной в кормовой части судна.

Погрузка газозона осуществляется через ресивер, в котором происходит охлаждение и сжижение газа, после чего, с помощью конденсатного насоса, газ подается в грузовые цистерны.

Кроме сжиженного газа, судно может перевозить до 15 000 т нефти.

На газозоне «Nisseki Maru» применяется турбоэлектрическая установка мощностью 7250 л. с. при 97 об/мин.

Стоимость переоборудования танкера в газозон составила примерно 3,89 млн. долл.

Судно «Toyosu Maru», как и «Nisseki Maru», переоборудовано из танкера типа Т-2, однако, в отличие от первого судна, на нем во всех центральных танках установлены цистерны для сжиженного газа. Для нефти предназначены 8 бортовых танков. Грузоподъемность судна «Toyosu Maru» по газу составляет 7100 т, а по нефти — 14 500 т [184].

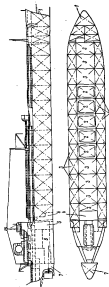


Рис. 97. Судно для перевозки сжиженного газа и нефти «Goshu Maru». 1 — форзац; 2 — цистерны для сжиженного газа; 3 — цистерны для нефти; 4 — носовые цистерны; 5 — топливные цистерны; 6 — цистерны для сжиженного газа; 7 — кормовые цистерны.



Рис. 98. Судно для перевозки сжиженного газа и нефти «Nisseki Maru». 1 — носовая часть судна; 2 — цистерны для сжиженного газа; 3 — цистерны для нефти; 4 — топливные цистерны; 5 — цистерны для сжиженного газа; 6 — цистерны для нефти; 7 — кормовая часть судна.

Переоборудование танкера Т-2 заключалось, как и в предыдущем случае, в замене средней части судна. Стоимость переоборудования составила 4,58 млн. долл.

Сжиженный газ на судне «Тоуош Марш» перевозится в четырех прямоугольных изолированных цистернах, изготовленных из специальной холодоустойчивой стали.

Газовоз «Esso Centro America» (рис. 99) переоборудован на стандартного американского танкера Т-1 грузоподъемностью 4000 т и длиной 96 м. Переоборудование, как и в предыдущих случаях, заключалось в замене грузовой части танкера (127).

Грузоподъемность газовоза по пропану составляет 3290 т, а по аммиаку — 3740 т.

Для перевозки сжиженного газа на судне служат четыре цистерны, изготовленные из никелевой стали, покрытые снаружи теплоизоляцией толщиной 10 см. В отличие от аналогичных газовозов (например, «Bridgetone Maru»), которые имеют двойные борта и двойное дно, предохраняющие наружную обшивку от попадания жидкого газа в случае разрыва цистерны и повреждения изоляции, судно «Esso Centro America» имеет лишь двойное дно. Для предотвращения возможного повреждения корпуса при случайном попадании на нее сжиженного газа признано экономически оправданным изготовить борта, второе дно и поперечные переборки из холодоустойчивой стали с содержанием никеля 3,5%.

Для уменьшения притока тепла в трюмы судна от верхней палубы, она защищена изнутри дополнительным слоем изоляции.

Каждая грузовая цистерна имеет длину 15,25 м, ширину 12,5 м и высоту 7,6 м. Внутри цистерны установлены аронизирующая поперечная и непроцепаемая продольная переборки.

Горловина цистерны, на которых установлена вся арматура и контрольные приборы, имеет длину 5,8 м, ширину 3,7 м и высоту 1,5 м. Все трубопроводы и арматура погрузочно-разгрузочной системы изготовлены из холодоустойчивой стали, имеющей вязкость по Шарлю при температуре ниже 51°C не менее $3,5 \text{ кг/м}^2$.

Разгрузка судна производится погружными электронасосами, которые подают сжиженный газ к четырем грузовым насосам, перекачивающим его в береговые емкости. Разгрузка длится около 10 час.

Для уменьшения потерь груза от испарения на судне предусмотрена двухступенчатая рефрижераторная установка повторного сжижения, работающая на фреоне-22.

Шведский газовоз «Paxi Endacott» (рис. 100) предназначен для транспортировки бутана, пропана, бутадена и аммиака между США и Западной Европой (144).

Корпус судна имеет двойные дно, борта и палубу. Сжиженный газ перевозится в 5 прочных цистернах, изготовленных из никелевой стали. Поверхность внутреннего корпуса покрыта блоками полнурегулированной ваты толщиной 100 мм. Пространство между

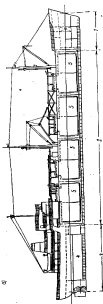
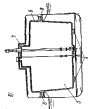
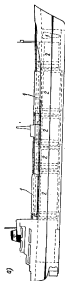


Рис. 99. Газовоз «Esso Centro America»: а — боковой вид; б — поперечное сечение.

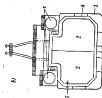
1 — аронизирующая часть цистерны Т-1; 2 — двойное дно; 3 — продольная переборка; 4 — поперечная переборка; 5 — грузовой насос; 6 — электронасос; 7 — рефрижераторная установка.





Par. 100, Chapter of Paul Endersby; 4 — General; 100 — non-graduate courses

β — коэффициент для коэффициентов α и β , зависящих от температуры. Для коэффициентов α и β — значения при температуре T_0 — известны. α — коэффициент расширения, β — коэффициент сжатия, γ — коэффициент анизотропии, δ — коэффициент анизотропии при сжатии.



цистернами в изолированном внутреннем корпусе достаточно для проведения осмотра цистерны и изоляции. Это пространство в рейсе заполняется инертным газом, который вырабатывается генератором, установленным в машинном отделении. Инертный газ используется также для вытеснения воздуха из грузовых цистерн перед погрузкой.

С целью уменьшения свободной поверхности грунта в цистернах устроены трапки. Все цистерны, кроме первой, разделены поперечными и продольными перегородками, а кроме четвертой, — продольными поперечными перегородками. Длина наибольшей цистермы составляет 30 м, емкость — 7300 м³.

В носовой части судна установлены две цистерны емкостью по 80 м³, в которых под давлением хранятся сжиженный газ, предназначенный для охлаждения грузовых цистерм с помощью спандейлной системы перед их загрузкой или после опорожнения.

Испаряющийся в процессе перевозки газ (в количестве около 0,5% в сутки) повторно сжимается в рефрижераторной установке и конденсируется в грузовых цистернах. Эта же установка используется для охлаждения циркулирующего вокруг грузовых цистерн жидкого газа, снижающего температуру в цистернах до минус 7°С, при которой может перевозиться сжиженный бутан.

Грузоподъемность судна при перевозке пропана составляет 13 700 м, а при перевозке аммиака — 15 800 м.

Для загрузки газа используются 10 погружных насосов с гидравлическим приводом (по два на цистерну) производительностью по 160 м³/час.

Все приборы, контролирующие состояние сжиженного газа в цистернах, сосредоточены в рубке в средней части судна; их показания дублируются на холодном мостике.

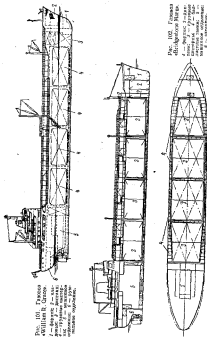
Главным двигателем газозода служит 8-цилиндровый дизель типа KZ78/140 мощностью 10 350 л. с. при 118 об/мин. Суточный расход топлива составит 40 т.

Электроэнергетическая установка судна состоит из четырех дизель-генераторов мощностью по 500 кВт; экипаж насчитывает 44 чел.

Судно для перевозки скнженного азотана «William R. Grace» (рис. 101) предназначено для эксплуатации на линии о. Тринидад — порты США и Европы [152]. Судно построено в соответствии с правилами Американского бюро судоходства и Береговой охраны США.

Аммиак перевозится на газовой при температуре минус 33,3°С и атмосферном давлении в четырех изолированных прямоугольных цистермах. Изоляция цистерн рассчитана на перевозку сжиженного пропана при температуре минус 42°С. Грузоподъемность судна по аммиаку составляет 8165 т.

* Вспомогательное слово — а3. Р. Славян



Box 102, Fairview
Bridgetown, Barbados



Газовоз «William R. Grace» имеет двойное дно и борта, пространство между внутренним корпусом и грузовыми цистермами во время рейса заполняется инертным газом. Инертный газ используется также для вытеснения остатков перевозимого газа (или воздуха) из цистерн при переводе вида груза.

Сухогрузный трюм в носовой части судна рассчитан на перевозку до 800 т твердых химических. Трюм обслуживают две стрелы грузоподъемностью по 3 т.

Судовая электроэнергетическая установка состоит из трех дизель-генераторов мощностью по 580 квт. Пар для судовых нужд вырабатывается утилизационным котлом производительностью 1,2 т/час. Экипаж судна насчитывает 38 чел.

Сжатые охлажденные газы (в количестве примерно 8505 т пропана и 8143 т бутана) перекачиваются в четыре складных цистерны, изготовленных из холодоустойчивой никелевой стали с имеющихся наружную теплоизоляцию из стекловаты. Наибольшая цистерна имеет длину 26,8 м, ширину 22,0 м и высоту 13,4 м. В каждой цистерне установлены одна продольная непроливаемая и одна поперечная поперечная переборки.

Испаряющийся в процессе эксплуатации газ подвергается повторному сжиганию и вновь возвращается в цикл. В са-

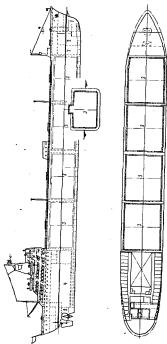


Рис. 104. Проект газового танкера фирмы Геттеркер.

Г — бортик; Д — дerrick; З — танковая цистерна; К — мачта; Л — люк; М — мачта; Н — нос; П — палуба; Р — река; С — стеньга; Т — тент; У — устье; Ф — флюгер; Ц — цистерна; Ч — чертёж; Ш — шлюз; Щ — щит; Э — элеватор.

стему повторного сжижения входят пять рефрижераторных установок (четыре на каждую цистерну и одна — запасная). Судно «Bridgestone Maru» имеет двойные борта и двойное дно, рассчитанное на прием 10 000 т водяного балласта.

Главный двигатель газопоршневой — дизель МАН типа K9Z78/140 мощностью 11 000 л. с. при 112 об/мин (максимальная мощность 13 600 л. с. при 118 об/мин). Запас топлива на судне составляет 2300 т, дальность плавания — 20 000 миль. Судовая электроэнергетическая установка состоит из трех дизель-генераторов мощностью по 450 кВт. Стоимость постройки судна — около 9,5 млн. долл.

За три года эксплуатации судна «Bridgestone Maru» не отмечалось серьезных аварий, если не считать неполадок в насосах. В первый год эксплуатации насосы выходили из строя 20 раз из-за наличия воды и примесей в сжиженном газе, а также из-за неудовлетворительного выбора материала для подшипников. В последующие годы они работали безотказно.

При постройке газозвон «Bridgestone Maru № 2» (рис. 103) и «Bridgestone Maru № 3» был учтен опыт эксплуатации головного судна. Вместимость их цистерн была увеличена, а конструкция упрощена, в частности, отказались от устройства двойных бортов [130]. Стоимость постройки судна «Bridgestone Maru № 2» и «Bridgestone Maru № 3» уменьшилась соответственно до 7,1 и 5,3 млн. долл.

В проекте газозвон большой грузоподъемности (рис. 104), разработанного фирмой Геттеркер, предлагается установить четыре изолированных цистерны, разделенные посредине непроницаемыми продольными переборками и отделенные одна от другой коффердамами [188]. Коффердамы предполагается использовать для приема водяного балласта в порожнем рейсе. Балласт принимается также в бортовые цистерны. Общая емкость балластных танков составляет 9000 м³, а топливных цистерн — 2400 м³.

Глава V

Особенности судов, перевозящих сжиженный метан

§ 21

Конструкция корпуса

В соответствии с правилами классификационных обществ (Английского Регистра Ллойд, Французского Бюро Веритас и др.) метановозы должны иметь двойное дно и две непрерывные продольные переборки, образующие внутренний корпус. Поперечные переборки в районе грузового пространства двойные, с коффердамом между ними шириной не менее одной шпанги. По концам грузового пространства также устраиваются коффердамы.

Коффердамы, двойное дно и двойные борта используются для приема водного балласта в порожнем рейсе таким образом, чтобы осадка носом танкера была равна по крайней мере 3% длины корпуса.

На всех метановозах энергетическая установка должна размещаться в корме.

Обычно требуется, чтобы конструкции и размеры элементов набора метановозов соответствовали требованиям правил для танкеров. Общая прочность метановоза считается достаточной, если момент сопротивления эквивалентного бруса соответствует минимальному моменту сопротивления танкера аналогичных размеров.

Напряжения в корпусе метановоза на такой воде в грузу весьма малы вследствие относительно небольшого deadweight и довольно равномерного распределения груза по длине судна.

По правилам Французского Бюро Веритас требуется, чтобы момент сопротивления палубы метановоза был не менее величины, определяемой по формуле

$$W = K \cdot B (\delta + 0,70), \quad (50)$$

где W — момент сопротивления корпуса судна на уровне линии палубы или трюнка (за вычетом момента сопротивления бимсов для судов с непрерывной трюнковой палубой), м^3 ;

B — ширина судна, м;

δ — коэффициент общей полноты, соответствующий водоизмещению судна в грузу;

K — коэффициент, определяемый в зависимости от длины судна следующим образом:

Длина судна, м . . .	150	155	160	170	180	190	200	210	220
Коэффициент K . . .	0,162	0,193	0,227	0,265	0,306	0,351	0,400	0,453	0,510

Момент сопротивления дна метановоза должен быть не менее момента сопротивления палубы, увеличенного на 5%.

При выборе марки стали для дна, бортов, шпренгеля и палубы пользуются рекомендациями, разработанными для танкеров. Однако следует учитывать, что корпус метановоза можно изготовить из обычной судостроительной стали только в том случае, если конструктивные элементы судна не охлаждаются ниже температуры минус 1°C при температуре метана минус 161°C .

К материалу продольных переборок, второго дна и поперечных переборок предъявляются особые требования, поскольку именно эти конструкции будут подвергаться воздействию низких температур в случае нарушения изоляции грузовых цистерн. Поэтому в качестве материала указанных конструкций должна использоваться специальная сталь, обладающая достаточной прочностью в условиях глубокого охлаждения. В некоторых случаях можно использовать и обычную судостроительную сталь, но при этом необходимо соблюдать особые меры предосторожности. В частности, следует предусмотреть на случай нарушения изоляции грузовых цистерн (или на случай опасности нарушения изоляции) возможность немедленного затопления смежного балластного отсека с тем, чтобы температура корпусных конструкций могла поддерживаться на приемлемом уровне.

Состояние изоляции на судне контролируется термисторами, связанными с системой сигнализации и устанавливаемыми на продольных и поперечных переборках, а также на втором дне, с таким расчетом, чтобы расстояние между ними не превышало 6 м. На метановозе длиной около 180 м (рис. 106), например, должно быть установлено около 300 термисторов.

Фундаменты и подкрепления должны устраиваться так, чтобы грузовые цистерны имели некоторую свободу смещения при резких колебаниях температуры. Кроме того, если фундаменты и подкрепления изготовлены из обычной судостроительной стали, необходимо поддерживать их температуру на уровне не ниже минус 1°C .

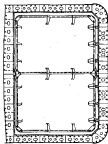


Рис. 106. Конструкция корпуса металлических.

Определение размеров и расчет прочности цистерн

При определении размеров цистерн и их вместимости следует учитывать то обстоятельство, что с увеличением емкости цистерн эффективнее используется изоляция (при прочих равных условиях). Дело в том, что емкость цистерн зависит от их линейных размеров в третьей степени, а изолируемая поверхность — от линейных размеров во второй степени. На рис. 106 показана зависимость суточного испарения сжиженного метана от объема цистерны. Из анализа приведенных кривых следует, что для уменьшения испарения газа до рациональных пределов (0,2—0,4% в сутки от грузоподъемности судна) емкость каждой цистерны должна составлять не менее 1000 м³.

При установке больших цистерн упрощаются их теплоизоляция и уменьшаются протяженность и вес трубопроводов грузовых систем. Вместе с тем облегчается контроль за состоянием цистерн в процессе эксплуатации.

Наряду с этим с увеличением емкости цистерн возрастает свободная поверхность груза, что ведет к более интенсивному испарению метана, если не будут проведены конструктивные мероприятия по его ограничению (например, устройство тронка). Кроме того, увеличиваются динамические нагрузки на стенки цистерн и усложняется проектирование и изготовление цистерн, а также конструирование их опор вследствие возрастающих температурных деформаций.

На грузовые цистерны со сжиженным метаном в процессе эксплуатации воздействуют следующие статические и динамические нагрузки, которые необходимо учитывать при расчете прочности цистерн и их опор:

1. Гидростатическое давление жидкости и давление испаряющегося газа.
2. Вертикальные усилия, возникающие при качке.
3. Горизонтальные продольные усилия, возникающие при килевой качке.
4. Горизонтальные поперечные усилия, возникающие при бортовой качке.
5. Ударные нагрузки, вызываемые перемещением жидкого груза при качке.
6. Температурные напряжения, возникающие в стенках цистерн во время их заполнения и опорожнения.

После заполнения стальной цистермы длиной 10 м сжиженным газом, имеющим температуру минус 160°С, происходит сокращение длины цистермы на 20—25 мм. По некоторым данным [73] за весь период эксплуатации газовойоза грузовые цистерны испыты-

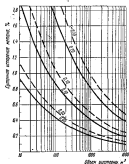


Рис. 105. Зависимость сущного изгибаемого металла от объема цистерны при различных коэффициентах температурности изгибаемого металла α .

— — — — — цистерны; — — — — — цистерны с жесткими опорами; δ — толщина стенки.

α , $\frac{1}{^\circ\text{C}}$	δ , мм	δ , мм	δ , мм
0,0001	0,01	0,02	0,03
0,0002	0,02	0,04	0,06
0,0003	0,03	0,06	0,09
0,0004	0,04	0,08	0,12
0,0005	0,05	0,10	0,15
0,0006	0,06	0,12	0,18
0,0007	0,07	0,14	0,21
0,0008	0,08	0,16	0,24
0,0009	0,09	0,18	0,27
0,0010	0,10	0,20	0,30

кают около 20 циклов по перепадам температур в диапазоне 180°C (от плюс 20° до минус 160°C), и около 160 циклов — в диапазоне порядка 100°C .

Так как температурные напряжения в цистернах не возникают при равномерном охлаждении стенок, необходимо проводить предварительное охлаждение цистерны перед погружкой с помощью внутренней системы охлаждения, а также оставлять некоторое количество метана в цистерне (около 5%) на время балластного перехода.

Опыт эксплуатации первых экспериментальных метановозов «Methane Pioneer» и «Beauvais» позволил оценить нагрузки, действующие на цистерны со сжиженным метаном, и сформулировать требования классификационных обществ к прочности этих цистерн. В частности, Французское Бюро Веритас требует определять размеры грузовых цистерн с учетом установочного давления предохранительных клапанов, плотности перевозимого груза (не ниже $0,45 \text{ т/м}^3$) и нагрузок, действующих на корпус во время хода судна. Ускорения, возникающие при движении судна в море, должны приниматься равными $0,207 \text{ рад/сек}^2$ при бортовой качке (с амплитудой 30° и периодом 10 сек.), $0,084 \text{ рад/сек}^2$ при

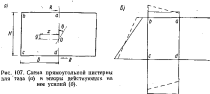


Рис. 107. Сила прямоугольной цистерны для газа (а) и жидкости (б) на нее ускорения g .

килевой качке (с амплитудой 6° и периодом 7 сек.) и $0,77 \frac{L}{100} \text{ м/сек}^2$ при вертикальной качке (с амплитудой $\frac{L}{80}$ и периодом 8 сек.).

При указанных условиях максимальные напряжения в корпусных конструкциях не должны превышать наименьшую из следующих величин: $0,75\sigma_s$ и $0,375\sigma_s$ при температуре плюс 20°C и $15,5 \text{ кг/мм}^2$ для обычной углеродистой стали.

Выполненные на судах замеры динамических нагрузок при качке показали, что они превышают нагрузки от гидростатического давления примерно на 50%.

При выполнении расчетов прочности цистерн необходимо удостовериться в том, что максимальные напряжения от гидростатической нагрузки, соответствующей давлению столба воды высотой 2,4 м над верхней частью цистерны (или 0,6 м над люком горловины, смотря по тому, какая величина больше), не превышают допустимых напряжений, указанных в предыдущем абзаце.

В качестве примера ниже приведен расчет прочности цистерны для сжиженного метана, изображенной на рис. 106.

В результате бортовой качки с амплитудой 30° и периодом 10 сек. (см. выше) на цистерну действует пара сил (рис. 107)

$$RH = \frac{0,207}{g} \quad (61)$$

где R — усилие, действующее на цистерну в месте ее крепления к опоре (реакция опоры);

I — момент инерции площади поперечного сечения цистерны;

H — высота цистерны;

g — ускорение силы тяжести.

Отсюда

$$R = \frac{0,207}{g} \quad (62)$$

материала и удельного веса груза. Эта поправка определяется по формуле

$$q = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} \cdot (1 + \sqrt{\frac{E_2}{E_1}}), \quad (73)$$

где E_2 и E_1 — модули упругости стали и алюминий-магниевого сплава.

Для рассматриваемого случая $q = 1,26$.

Толщина листов обшивки цистерны в зависимости от высоты расположения листов будет изменяться следующим образом:

Расстояние от осевой линии листа до осевой линии цистерны, м	Толщина сталь- ных листов водо- непроницаемой обшивки, мм	Толщина алюми- ний-магниевого листа обшивки цистерны, мм
2,2	6,5	6,5
4,6	7,5	9,5
7,0	8,5	10,7
9,4	9,5	12,0
11,8	10,5	13,2
13,7	11,5	14,2

Размеры боковых стрингеров, подпалубных и длинных балок цистерны определяются действующими на них максимальными нагрузками.

На нижней боковой стрингер действует статическая нагрузка $P_{ст} = 1,23 \text{ кг/см}^2$ и динамическая $P_{дин} = 1,17 \text{ кг/см}^2$.

Пролет стрингера b принимается равным 8,4 м, а расстояние между стрингерами $a = 4,2$ м. Необходимый момент сопротивления стрингера составит

$$W_{стр} = \frac{ab^2}{12} \cdot \frac{P_{ст}}{\sigma_{доп}} = \frac{420 \cdot 400^2 \cdot 1,23}{12 \cdot 900} = 31\,700 \text{ см}^3.$$

Такой стрингер будет иметь сечение таврового профиля со стенкой размерами 1625×15 мм и полкой размерами 625×20 мм.

На верхний стрингер действует статическое давление $0,76 \text{ кг/см}^2$ и динамическое $0,90 \text{ кг/см}^2$.

Необходимый момент сопротивления верхнего стрингера $27\,300 \text{ см}^3$, причем размеры его сечения таврового профиля составят: стенка 1625×15 мм, полка 535×20 мм.

Размеры подпалубных балок определяются динамической нагрузкой, равной $0,51 \text{ кг/см}^2$, так как статическая нагрузка примерно вдвое меньше. Требуемый момент сопротивления сечения составляет $12\,900 \text{ см}^3$, тавровый профиль: стенка 1065×15 мм, полка 535×15 мм.

Аналогично определяются размеры всех других конструктивных элементов цистерны.

По расположению изоляции грузовые цистерны можно разделить на следующие три категории:



Рис. 106. Внешний вид гидроизоляционной оболочки, предложенной фирмой Ойнда Лорентек.

1. Цистерны из обычной углеродистой стали с внутренней изоляцией, имеющей достаточные прочностные характеристики, непроницаемой для сжиженного метана и химически устойчивой к воздействию газа при низкой температуре. Прочным контуром цистермы в этом случае служат вторые борта и второе дно. Отсутствие набора в трюмах судна облегчает установку изоляции. Грузовые цистерны этой категории практически можно считать изолированными трюмами. Однако отсутствие в настоящее время подходящего материала для внутренней изоляции не позволяет применить цистерны такого типа.

2. Цистерны из обычной углеродистой стали с внутренней изоляцией, отделенной от метана непроницаемым защитным покрытием из холодоустойчивого материала (полиэтилена, специальных сталей, алюминиевых сплавов). Цистерны этой категории разработывались и испытывались в ряде стран. На рис. 108 и 109 показан внешний вид и конструктивная схема подобной цистерны, предложенной фирмой Ойнда Лорентек (Осло) совместно с Норвежским бюро Веритас. В этом случае цистерна представляет собой тонкую термически подвижную оболочку из алюминий-магниевого сплава толщиной 2 мм, которая служит только для обеспечения газонепроницаемости трюма и предотвращения попадания сжиженного метана на корпус судна. Теплоизоляция трюма может воспринимать статические и динамические нагрузки

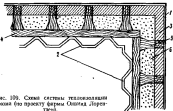


Рис. 109. Схема системы теплоизоляции трюма (по проекту фирмы Оверли Доррест).

1 — жесткий контур (двойные борта судна и т. д.); 2 — тонкая термически изолирующая оболочка; 3 — теплоизоляционный защитный барьер на полурезине; 4 — деревянный обрешетник; 5 — несущие стойки; 6 — основной слой изоляции из минеральной ваты под обшивкой.

от сжатия металла и передавать их на корпусные конструкции (двойные дно, борта и т. д.).

Поскольку внутренняя оболочка подвержена температурным напряжениям, необходимо обеспечить неизменность ее размеров относительно трюма. Это достигается применением эластичной (гофрированной) конструкции оболочки. На рис. 109 показана принципиальная схема размещения оболочки и изоляции в жестком контуре корпуса судна. Изоляционный защитный барьер из полурезины закреплен на плоских поверхностях внутреннего корпуса. Между полурезином и гофрированной оболочкой помещаются блоки из минеральной ваты или стекловаты. Их роль заключается в уменьшении перепада температуры между сжимаемым металлом и защитным барьером из полурезины. Нагрузки от возмущения жидкого груза передаются на корпус судна через деревянный обрешетник и несущие стойки (изготавливаемые обычно из бальзового дерева). Изолированный трюм при снятом обрешетнике показан на рис. 110, на котором ясно видны несущие стойки.

Наиболее сложной операцией при изготовлении гофрированной оболочки является сварка тонких металлических пластин.

Оболочки подобного типа применяются на французском экспериментальном танкере «Ruybago». На этом судне теплоизоляция (рис. 111) состоит из трех слоев: канцелла (синтетического пористого материала на основе поливинилена и полистирола) и защиты из тика.

С внутренней стороны изоляция покрыта термически податливой гофрированной оболочкой из тонких стальных листов толщиной 1 мм (рис. 112). Кроме того, между слоями изоляции проложена еще одна аналогичная по конструкции оболочка. Все усилено



Рис. 110. Вид на несущие стойки цистерны (по проекту фирмы Оверли Доррест).

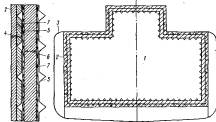


Рис. 111. Металло-панельный металлостроитель «Ruybago» и принципиальная схема системы теплоизоляции трюма.

1 — изолирующий трюм для сжатия металла; 2 — внутренний борт; 3 — обшивочная пластинчатая оболочка; 4 — внутренний слой изоляции толщиной 100 мм; 5 — внешний гофрированный слой оболочки толщиной 1 мм; 6 — внутренний слой изоляции толщиной 100 мм; 7 — защита из тика толщиной 15 мм.

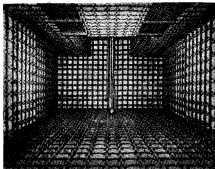


Рис. 112. Внутренний вид грузовой цистерны танкера «Pythagore».

от колебаний сжиженного метана передаются через теплоизоляцию, имеющую относительно небольшую усадку при низких температурах (2—3 мм), на двойные борта, двойные поперечные переборки и двойное дно.

Пространство между обшивкой грузовой цистерны и вторым корпусом представляет собой закрытый непроницаемый объем (изолирующее пространство), изолированный азотом под небольшим избыточным давлением. Изменение объема этого пространства вследствие деформации стенок цистерны сопровождается изменением количества азота в нем, который при уменьшении объема «выдавливается» в специальный резиновый баллон, а при увеличении — вновь поступает в изолирующее пространство. В случае необходимости в изолирующем пространстве можно создать циркуляцию азота по замкнутому циклу с продуванием его через осушитель.

Нормальное давление в грузовых цистернах составляет 0,1 кг/см², а в изолирующем пространстве — 0,002 кг/см².

Грузовые цистерны защищены от недопустимого повышения давления предохранительными, а от понижения — вакуумными клапанами. Изолирующее пространство также имеет предохра-

нительные клапаны. На рис. 113 показано расположение предохранительных клапанов на грузовой цистерне.

Западногерманская фирма Ховальдтсверке (Киль) предлагает использовать в качестве изоляционного материала триовые пластины стиропора, а в качестве материала термически податливой оболочки — листы из алюминиево-магниевого сплава толщиной 2 мм. При изготовлении и сварке оболочки к триовым пластинам рекомендуется учитывать, что стиропор уже при температуре плюс 70—80° С покрывается твердой пленкой. Экспериментальным путем установлено безопасное для сварки расстояние от изоляции до сварочного шва, равное 75 мм. Оболочка

изготавливается из отдельных штампованных листов с отогнутыми по периметру краями. Листы свариваются между собой при помощи U-образного профиля из легкого сплава. После этого производится приварка профиля к T-образной стойке, которая обеспечивает жесткость оболочки. Конструкция оболочки фирмы Ховальдтсверке показана на рис. 114.

Теплоизоляция триовых по проекту фирмы состоит, как уже указывалось, из отдельных слоев пластин стиропора. Опыты показали, что деформация пластин стиропора толщиной 300 мм при колебаниях температуры в пределах —180° С составляет примерно 2 мм. Между слоями теплоизоляции прокладывается алюминиевая фольга. Отдельные слои изоляции соединяются между собой металлическими скобами, а по стыкам — изолентой. Слой изоляции, расположенный непосредственно за легкой оболочкой, имеет специальные каналы, в которые вытекает в случае повреждения оболочки метан. В этих каналах метан частично испаряется и вместе с жидкой фазой удаляется из трюма по специальным отводящим трубопроводам.

Нагрузки от колебаний сжиженного метана передаются на корпусные конструкции через обрешетку из бальзового дерева и специальные несущие стойки, а сама оболочка покинута на слое бальзового дерева на втором дне судна. Обрешетка состоит из реек размерами 5×10 см, образующих клетки размерами

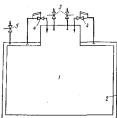


Рис. 113. Оборудование грузовой цистерны предохранительными клапанами.

1 — грузовая вентиляция; 2 — изолирующая вентиляция; 3 — предохранительный клапан; 4 — клапан сброса избыточного давления азота в грузовую цистерну; 5 — клапан сброса избыточного давления азота в атмосферу.

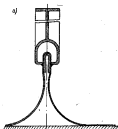


Рис. 114. Отдельные элементы (а) и вставки из (б) внутренней защитной оболочки, предохраняющей форму Ховальдтсверке.



западногерманского классификационного объекта и закончилась успешно.

Для оценки напряжений, возникающих в пластинках тонкой термически подвижной оболочки в результате перепада температур при погружке, а также для определения основных элементов оболочки можно воспользоваться следующим методом [51].

В процессе эксплуатации из оболочки толщиной l мм действуют сжимающие и растягивающие усилия Q_x и Q_y , которые условно показаны на рис. 115. В пределах одной ячейки, абсолютные размеры которой равны X и Y , эти силы вызывают соответствующие относительные деформации отдельных участков оболочки $\epsilon_x(Q_x, Q_y)$ и $\epsilon_y(Q_x, Q_y)$. Предполагая, что силы Q_x и Q_y действуют на оболочку независимо друг от друга. В этом случае будет справедливым следующее равенство:

при действии только силы Q_x

$$\left. \begin{aligned} \frac{\epsilon_x(Q_x, 0)}{\epsilon_x(Q_x, 0)} &= -\mu_x \\ \sigma_x(Q_x, 0) &= \frac{Q_x}{Y} \end{aligned} \right\} \quad (74)$$

при действии только силы Q_y

$$\left. \begin{aligned} \frac{\epsilon_y(0, Q_y)}{\epsilon_y(0, Q_y)} &= -\mu_y \\ \sigma_y(0, Q_y) &= \frac{Q_y}{X} \end{aligned} \right\} \quad (75)$$

где μ_x и μ_y — коэффициенты Пуассона;

σ_x и σ_y — напряжения в элементах оболочки, вызываемые силами Q_x и Q_y .

Модуль Юнга определяем следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_x(Q_x, 0)}{\epsilon_x(Q_x, 0)} &= E_x \\ \frac{\sigma_y(0, Q_y)}{\epsilon_y(0, Q_y)} &= E_y \end{aligned} \right\} \quad (76)$$

При одновременном действии сил Q_x и Q_y деформации оболочки по осям OX и OY можно рассчитать по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\mu_y}{E_y} \sigma_y \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E_y} \sigma_y + \frac{\mu_x}{E_x} \sigma_x \end{aligned} \right\} \quad (77)$$

35×35 см. Толщина всей изоляции составляет 300 мм (два слоя стиропора общей толщиной 200 мм и обрешетник с упругим наполнителем — изоплексом). Теплоизоляция может состоять только из изоплекса с обрешетником из бальзового дерева.

Экспериментальная конструкция газонепроницаемого изолированного трюма по проекту фирм Ховальдтсверке испытывалась заполнением ее сжатым кислородом при температуре минус 183° С. Испытания проводились под наблюдением представителей



Рис. 115. Силы, действующие на внутреннюю гофрированную оболочку.

Зависимость величин деформаций e_x и e_y от абсолютного изменения температуры оболочки Δt выражается формулой $e_x = -e_y = \alpha \Delta t$, где α — коэффициент линейного расширения материала оболочки.

Исходя из равенства величин e_x и e_y , составляем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_y}{E_y} \sigma_y = \frac{\nu_x}{E_x} \sigma_x + \frac{\sigma_y}{E_y} \\ \frac{1}{E_x} \sigma_x (1 + \nu_x) = \frac{1}{E_y} \sigma_y (1 + \nu_y) \end{cases} \quad (78)$$

$$\frac{\sigma_x}{E_x} = \frac{\sigma_y}{E_y} \cdot \frac{1 + \nu_y}{1 + \nu_x};$$

$$\begin{cases} e_x = \frac{\sigma_x}{E_x} \left[1 - \nu_y \frac{1 + \nu_y}{1 + \nu_x} \right] \\ e_y = \frac{\sigma_y}{E_y} \left[1 - \nu_x \frac{1 + \nu_x}{1 + \nu_y} \right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_x = e_x E_x \frac{1 + \nu_y}{1 - \nu_x \nu_y} \\ \sigma_y = e_y E_y \frac{1 + \nu_x}{1 - \nu_x \nu_y} \end{cases} \quad (79)$$

$$\begin{cases} \sigma_x = \alpha E_x \Delta t \frac{1 + \nu_y}{1 - \nu_x \nu_y} \\ \sigma_y = \alpha E_y \Delta t \frac{1 + \nu_x}{1 - \nu_x \nu_y} \end{cases} \quad (80)$$

3. Вкладные грузовые цистерны из холодустойчивых материалов. В отличие от описанных выше цистерн складные грузовые цистерны сами воспринимают нагрузки от возмущений находящегося в них жидкого груза и поэтому должны рассчитываться на эти нагрузки. Такие цистерны устанавливали, например, на экспериментальном газозаре «Methane Princess» (рис. 116). Горизонтальное смещение цистерн ограничивается наклонными поверхностями двойных бортов и переборкой, специальным штырем в нижней части и креплением в районе палубного трюка [75], [116]. Аналогичная конструкция крепления цистерн применена на английских метанолках «Methane Princess» (рис. 117) и «Methane Progress» [163].

Вкладные грузовые цистерны имеют ряд существенных недостатков. Поскольку цистерны представляют собой самостоятельную, не связанную непосредственно с корпусом судна конструкцию, они имеют большой вес и, следовательно, высокую стоимость.

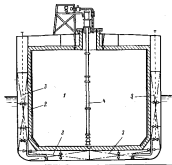


Рис. 116. Схематический поперечный разрез экспериментального газозара «Methane Princess».

1 — цистерна для сжиженного метана; 2 — теплоизоляция; 3 — балластные цистерны; 4 — переборка палубного трюка.

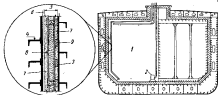


Рис. 117. Схематический поперечный разрез газозара «Methane Princess».

1 — корпус цистерны; 2 — наружный борт; 3 — второй борт; 4 — обшивка грузовой цистерны; 5 — клипсы; 6 — переборка; 7 — клипсы; 8 — шпильки на балластном трюке; 9 — клипсовые борты.

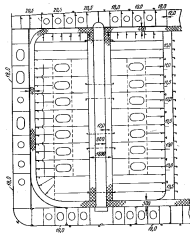


Рис. 118. Модель-эскиз металл. грузоподъемности около 10 000 м, спроектированной фирмой Везер.

Большой вес прочных цистерн снижает полезную грузоподъемность газовоза. Кроме того, они имеют стенки сравнительно большой толщины в потому подвержены значительным температурным напряжениям и деформациям. Это предвещает дополнительные требования и проектированию, в процессе которого необходимо принимать конструктивные меры по предотвращению чрезмерной концентрации напряжений. В частности, иногда рекомендуется ограничивать длину и ширину цистерн величиной 15,25 м [73].

Западногерманская фирма Везер в течение длительного времени разрабатывала конструкции прочных цистерн и способы крепления их в трюме [122], [123]. В качестве материала для цистерн

фирма предполагала использовать специальную сталь или алюминиево-магнийевый сплав. Цистерны по проекту фирмы Везер крепятся в трюме с помощью трубчатой вертикальной стойки, идущей от палубы к днищу по центру в специальной нише. Стойка изолирована бальзовым деревом и служит одновременно подкреплением палубы судна. Цистерна покоится на слое бальзового дерева (рис. 118), под ней предусматриваются специальные ограничители, предотвращающие ее поворот вокруг центрирующей стойки. Цистерны такого типа были применены при проектировании газовоза грузоподъемностью 10 000 т. Квадратные в плане, они имели размеры $10 \times 10 \times 13$ м. Всего на судне предусмотрено 13 таких цистерн и 7 цистерн меньших размеров.

Ограничение размеров цистерн в плане и установка двух рядов цистерн вдоль диаметральной плоскости судна, вместо одной, предусмотрены с целью уменьшения температурных деформаций.

При отсутствии необходимости в подкреплении палубы вместо установки вертикальной стойки для крепления каждой цистерны и ее центрирования в трюме фирма рекомендует использовать специальные шпфы (палубную и днищевую, см. рис. 119). Применение шпф для крепления цистерн целесообразно для судов относительно малой грузоподъемности (с трюмами сравнительно небольших размеров).

При проектировании металл. газовоза грузоподъемностью 14 500 т фирмой Везер было предложено для крепления цистерн использовать специальные коробчатые балки, установленные на втором дне под палубой и на поперечных переборках судна. Они соответствуют выемкам в цистернах. Центровка цистерн в трюме осуществляется при помощи днищевой шпфы и палубного трояка. Указанная конструкция позволяет в какой-то степени выровнять температурные деформации цистерн, поскольку при таком способе крепления обеспечивается их симметричность относительно осей, проходящей через трояк и днищевую шпфы цистерны. В проекте судна грузоподъемностью 10 000 т трояк цистерн был смещен с центральной осью.

Несколько иной конструкции крепления цистерн предложил Корлетом [66] в проекте судна с грузоподъемными цистернами цилиндрической формы из алюминиево-магниевого сплава с наружной теплоизоляцией из стекловаты (рис. 120).

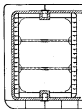


Рис. 119. Схема установки и крепления грузовых цистерн в трюме при помощи палубной и днищевой шпф.

Рис. 120. Выводы результатов исследований и рекомендации по применению препарата.

[illegible]

Рис. 121. Конструкция ленточных стержневых наметаллов, сваренных в коробчатом, сращивании

1 — стержень; 2 — ступенчатый ленточный стержень; 3 — ленточный стержень.

l — второе число; d — расстояние между точками; d — длина интервала.

Рис. 122. Спектральный анализ
излучения кварцевых метамор-
фических пород.

[illegible]

Опоры этих цистерн выполнены с учетом некоторого смещения цистерн в результате температурных деформаций. Конструкция нижних опор, устанавливаемых на втором дне судна под днищем цистерн, показана на рис. 121.

На французском танковозе «Jules Verne» грузоподъемность около 10 000 т каждая цистерна диаметром 20 м установлена своим конусообразным днищем на двойное дно, которое имеет соответствующие углубления (рис. 122). Таким способом достигается самосинхронизация цистерн [109], [171].

Из распространенных способов крепления цистерн в трюме наиболее простыми являются способы, принятые на экспериментальном судне «Methane Pioneer», на судах «Methane Princess», «Methane Progress» и «Jules Verne». На этих танковозах грузовые цистерны устанавливаются на слое балкового дерева или другого прочного теплоизоляционного материала.

§ 23.

Материал цистерн и их изоляция

Физические свойства твердых веществ при низких температурах резко отличаются от их свойств при обычной температуре. При понижении температуры предел текучести и временное сопротивление большинства металлов, как правило, увеличиваются. Некоторые материалы при низких температурах претерпевают фазовый переход в твердое состояние (обратный или необратимый), который может сопровождаться скачкообразным изменением любого из механических свойств. Хорошо известным результатом такого перехода является низкотемпературная хрупкость (хладотомкость) углеродистых и низколегированных сталей, вызванная резким снижением ударной вязкости и ухудшением других пластических свойств.

По характеру изменения механических свойств с понижением температуры основные металлы, применяемые в технике глубокого холода, можно условно разделить на три группы:

1. Углеродистые и малолегированные стали.
2. Легированные стали аустенитного класса.
3. Целые металлы и сплавы.

Наибольшее снижение ударной вязкости углеродистых сталей наблюдается в интервале температур от плюс 15° до минус 40°С. Многие металлы и сплавы, не содержащие железа (алюминий, медь, никель, алюминий-магнийевые сплавы и т. п.), при низких температурах сохраняют свои упругие свойства. Последние относятся также и к хромоникелевым нержавеющей сталям, хромомарганцевым сталям и к сталям с высоким содержанием никеля.

Например, по спецификации Американского общества по испытанию материалов (ASTM) сталь с содержанием никеля 9% может быть использована в нагруженных конструкциях при температуре до минус 160—190°С. Нержавеющая сталь 18-8 ASTM 304L может быть использована даже при самых низких полученных в технике температурах (температура сжиженного газа) [102].

В табл. 34 приведены химический состав и механические характеристики олеостекловых сталей марок 2X18H9 и ряда других сталей и сплавов [26]. Сталь 2X18H9 при низких температурах в наибольшей степени сохраняет свою вязкость, которой она обладает при нормальной температуре. Вместе с тем она подчиняется общей закономерности, характерной для всех сталей, т. е. с понижением температуры у нее ухудшаются прочностные характеристики (временное сопротивление разрыву, предел текучести, твердость) и ухудшаются характеристики пластичности (относительное удлинение, относительное сужение и ударная вязкость).

Элементы, входящие в состав сталей, оказывают влияние на их механические свойства при низких температурах. Например, никель, хром, ванадий, молибден повышают ударную вязкость сталей при низких температурах. Особенно благоприятное влияние оказывает никель, количество которого, необходимое для получения определенного значения величины ударной вязкости при низких температурах, определяется содержанием углерода в стали. Наличие низких температур на ударную вязкость сталей с различным содержанием никеля показано на рис. 123 [102].

Из сказанного следует, что для изготовления цистерн для сжиженного метана можно использовать лишь высоколегированные стали, например, такие, как сталь с 9%-ным содержанием никеля, американскую нержавеющей сталь 304, отечественные стали 2X18H9 и 1X18H9T.

Для изготовления цистерн могут применяться и алюминиевые сплавы, достоинством которых является то, что их механические свойства (твердость, предел прочности, предел текучести и т. п.) с понижением температуры повышаются вместе с повышением относительного удлинения (при сохранении достаточно высокой ударной вязкости). Наиболее подходящими алюминиевыми сплавами для изготовления оборудования, работающего при низких температурах, являются сплавы, содержащие 3,5—5,0% магния (сплав NP 5/6 по английскому стандарту 1477), или сплавы серии 5000 по американскому стандарту (например, сплав 5456).

Подробные данные о свойствах различных материалов при низких температурах приводятся в работах [26], [102].

Для изготовления цистерн используются специальные дорогостоящие стали и сплавы. Приблизительная оценка стоимостных характеристик этих материалов и их сравнительные данные приведены в табл. 35 [102]. Цистерна, изготовленная из алюминий-магниевого сплава, в два раза дешевле и легче по сравнению с

Таблица 34

Состояние и исследование свойств металлов конструктивных сталей в стали при разных температурах

Наименование и марка стали или сплава, дисперсион	Примерный химический состав	Температура обработки металла, атмосферы и его форма	Температура испытания, °C	Положение сварки, мм/мат.	Средняя толщина, мм/мат.	Средняя толщина, мм, %	Относительная прочность, %	Ударная вязкость, ккал/см ²
Углеродистая сталь А (Кировский завод)	C 0,11; S 0,002; Mn 0,33; Cr 0,14; P 0,006; Ni 0,28	Прокат, круглый диаметр 10 мм	+15 -40 -60	37,8 39,1 40,5	28,1 29,4 30,9	30,0 30,0 30,3	73,5 74,4 75,6	15,5 * 2,38 * 0,38 *
Углеродистая сталь (Южсталь, ЮЗСЗ)	C 0,11; Si 0,32; Mn 0,37; Cr 0,08; Ni 0,11	Закалка при 850° C (ЮЗСЗ), отпуск при 650° C	+20 -40 -80 -190	60 68 69 101	48 51 55 90	28 29 31 28	72 71 71 60	19,7 19,9 19,9 0,4
Углеродистая сталь среднеуглеродистая	C 0,35; P 0,033; Mn 1,04; S 0,046; Si 0,26; Cr 0,07; Ni 0,160	Отжиг при 650° C	-20 -42 -66	68 68,5 72,5	43,7 47,5 53,6	30 32 30	62 56 59	11,2 ** 2,9 ** 1,1 **
Углеродистая сталь, Б (Кировский завод)	C 0,38; P 0,041; Mn 0,76; S 0,10; Si 0,33	Прокат, круглый диаметр 22 мм	+15 -40 -80	46,3 52,8 51,8	36,2 38,0 42,4	37,2 38,2 38,4	66 63,8 65,3	7,35 * 0,51 * 0,50 *

Продолжение табл. 34

Наименование и марка стали или сплава, дисперсион	Примерный химический состав	Температура обработки металла, атмосферы и его форма	Температура испытания, °C	Положение сварки, мм/мат.	Средняя толщина, мм/мат.	Средняя толщина, мм, %	Относительная прочность, %	Ударная вязкость, ккал/см ²
Хромоникелевая сталь (ЮЗСЗ)	C 0,16; Cr 1,12; Mn 0,47; Ni 4,12; Si 0,28	Закалка при 880° C	+20 -40 -80 -190	140 151 155 177	115 117 123 140	32 34 34 34	54 56 60 57	8,2 7,5 6,9 3,0
Никелевая сталь (Кировский завод)	C 0,30; P 0,016; Mn 0,40; S 0,014; Si 0,12; Cr 0,19; Ni 4,81	Отжиг при 650° C	+15 -40 -80 -180	55,3 63,8 68,3 92,5	28,2 30,8 42,3 68,2	19,8 22,5 22,1 23,9	56,3 61,2 62,0 50,4	10,7 * 10,8 * 5,5 * 0,1 *
Нержавеющая сталь 2Х18Н9	C 0,09; Cr 17-20; Mn 0,78; Ni 8-11; Si 0,08	Прокат	+20 -78 -168 -196	70 117 156 183	30 42 63 56	30 44 41 36	73 68 61 56	26 25 21 21
Алюминиево-никелевый сплав В456	Mg 4,7-6,5; Mn 0,8-1,0	Отжиг	+20 -196 -353	48,1 53,6 62,0	27,6 32,8 36,0	14,5 14,6 15,6	— — —	— — —

* Обычный сплав.

** Облегченный сплав с легированием.



Рис. 128. Зависимость ударной вязкости сталей с различным содержанием никеля от температуры (испытание на образце Шанюй).

цистерной из нержавеющей стали. Поэтому стоимость судовой стальной цистерны без изоляции будет равна стоимости алюминиевой цистерны с изоляцией.

При конструировании шестера, трубопровода, арматуры и другой оборудования, кроме прочностных стоимостных характеристик материалов, следует учитывать и их способность к пластическим деформациям при изменении температуры. Если при изготовлении шестера с успехом можно применять алюминий-магниево-медные сплавы, то при изготовлении трубопроводов для перекачки сжиженного метана предпочтительнее использовать специальные стали, поскольку они имеют меньший коэффициент линейного расширения.

Материалы, применяемые для работы в условиях глубокого охлаждения, должны проходить предварительные испытания из ударную вязкость. Хотя подобные испытания и не отражают полностью действительного поведения металлов в конструкциях, они позволяют достаточно точно оценить достоинства материалов.

ред другими и ориентировочно определять их эксплуатационные качества.

Требования различных классификационных обществ к металлам для использования при низких температурах несколько различаются между собой (по определению величины энергии, поглощаемой образцом без разрушения, к температуре испытания) [102]. Например, Береговая охрана США требует, чтобы при испытательных температурах, которые на 6° С ниже предельных рабочих, поглощаемая образцом энергия при изгибе составляла по крайней мере 2,8 кДж (при испытываемых образцах типа Шарпан с загибом по Изоду), а ударная вязкость в загибе — 3,5 кДж/см². Американское бюро судоходства требует, чтобы при температурах на 15° С ниже рабочих эти величины были равны соответственно 2,07 кДж и 2,50 кДж/см².

Все металлы, применяемые для изготовления грузовых цистерн, должны хорошо свариваться и обладать достаточной прочностью и ударной вязкостью в местах сварных соединений. Термическая обработка материала цистерн весьма желательна, но ее осуществление часто связано с большими трудностями и зависит от свойств металла, количества легирующих присадок в нем, а также от характера технологического процесса. Например, стали с содержанием никеля 2,25; 3,5 и 9% могут использоваться без отжига после сварки, поскольку они при изготовлении подвергаются нормализации и отпуску. Аустенизированные стали (хромистые) могут ухудшить свои свойства после термической обработки в результате выделения карбида хрома на границах зерен. Все сварные швы в грузовых цистернах должны подвергаться тщательному рентгенографическому контролю.

Теплоизоляция цистерн должна ограничивать суточное испарение груза величиной 0,2—0,4%.

Требования к изоляции грузовых цистерн металловозов жестче по сравнению с газозамми, переносимыми охлажденные нефтяные газы.

В настоящее время, наряду с естественными изоляционными материалами, такими, как бальзовое дерево, которое было применено на судне «Мейлан Рингет», в материальном теплоизоляционными материалами, разработаны искусственные пористые материалы на основе полуретана, полистирола, полупенилглицеридов и т. п. Они обладают относительно небольшой теплопроводностью (рис. 124). Например, дорожным изоляционным качеством обладает новый пористый материал — пенополистирол. При его вспенивании в порах остается легко конденсируемый газы — аммиак, изопенан и др. Охлаждение изоляции до температуры транспортируемого груза (у метана до минус 161,5° С) вызывает конденсацию газов в порах с образованием вакуума, увеличивающего теплоизоляционные свойства пенополистирола. В качестве изоляционного материала для грузовых цистерн можно также рекомендовать пену

Table 25

Сравнительные характеристики материалов, применяемых при изготовлении клапана для стоканового метода *

Характеристика	Материалы			
	алюминиево-магнийевый сплав ВД50-В	алюминиево-магнийевый сплав ВД53-В	нержавеющая сталь 304	нержавеющая сталь А
Присадка, определяющая свойства материала, %	Mg 5,0	Mg 5,0	Cr 18-20 Ni 8-12	Ni 9,0
Предел прочности, кг/мм ²	25	24	50	65
Толщина стенки пакета, мм	14,3	14,9	7,9	6,6
Относительный вес, кг/м ²	33,8 (82,0%)	39,4 (83,9%)	67,3 (100%)	51,3 (81,8%)
Относительная стоимость, долл/м ²	3,72 (58,8%)	3,88 (59,3%)	6,58 (100%)	3,47 (53,0%)

^a Φ -values in parentheses further down the column.

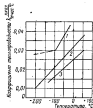


Рис. 124. Средняя теплопроводность пористых изоляционных материалов.

1 — пенопласт; 2 — пенополиэтилен; 3 — полиуретан.

их теплоизоляционные свойства вследствие диффузии неконденсирующихся газов в поры. Пенопласты характеризуются высоким коэффициентом температурного расширения, что обуславли-

вает сложность конструкции изоляции. При расчете толщины изоляции для определения степени испарения газа необходимо принимать во внимание тот факт, что теплопроводность пористого изоляционного материала снижается с увеличением температуры и объемного веса (обычно в прямо пропорциональной зависимости), который у искусственных изоляционных материалов может колебаться в широких пределах.

В табл. 36 приведены основные характеристики некоторых теплоизоляционных материалов. При оценке теплоизоляционных свойств различных материалов следует иметь в виду, что они значительно ухудшаются при повышении степени влажности воздуха, в котором помещается цистерна с грузом. Поэтому должны быть предусмотрены меры к тому, чтобы воздух трюма или инертный газ, которым обычно заполняется трюм, оставались постоянно сухими.

По требованию береговой охраны США и Английского Регистра Ллойд изоляция или, по крайней мере, один ее слой, должна хотя бы незначительное время препятствовать проникновению сжиженного метана к металлу корпуса судна при возможном разрыве цистермы. Это требование исключает возможность применения в качестве теплоизоляции боковых и нижних частей цистерм

полнестирол ПС-4. Склеивка отдельных блоков этого материала производится раствором самого полистирола в дихлорэтаноле.

Некоторые пенопласты можно вешивать непосредственно перед нанесением на изолируемые поверхности, что облегчает теплоизоляцию объектов, имеющих сложную форму (кассеты, конденсаторы трубопроводов и т. п.). Наряду с очевидными преимуществами, искусственные материалы имеют некоторые существенные недостатки. В условиях глубокого охлаждения с течением времени они проявляют склонность к рекристаллизации, ухудшающей их теплоизоляционные свойства. Кроме старения, длительная эксплуатация пенопластов также ухудшает

их теплоизоляционные свойства вследствие диффузии неконденсирующихся газов в поры. Пенопласты характеризуются высоким коэффициентом температурного расширения, что обуславли-

вает сложность конструкции изоляции. При расчете толщины изоляции для определения степени испарения газа необходимо принимать во внимание тот факт, что теплопроводность пористого изоляционного материала снижается с увеличением температуры и объемного веса (обычно в прямо пропорциональной зависимости), который у искусственных изоляционных материалов может колебаться в широких пределах.

В табл. 36 приведены основные характеристики некоторых теплоизоляционных материалов.

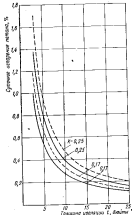


Рис. 125. Зависимость скорости испарения сжиженного метана от толщины теплоизоляционной грунтовой цистермы.

— — — цилиндрическая и 2 — сферическая цистермы

$\lambda = \frac{\lambda_0}{1 + \beta t}$

где λ_0 — коэффициент теплопроводности; t — температура воздуха.

Таблица 36
Основные характеристики некоторых изоляционных материалов

Материал	Объемный вес, г/см ³	Коэффициент теплопроводности, ватт/м·град °C	Температура применения, град °C	Плотность, г/см ³	Температурное расширение, град °C	Термостойкость, град °C
Полнестирол (пенопласт)	100—170	0,038—0,051 (0° C)	0,65	90 *	0,30	—
Минеральная вата	60—120	0,038 (0° C)	0,50	0,15	0	не горит
Стекловолокно	60—120	0,024 (50° C)	0,50	0,15	0	" "
Маты из стекловолокна	100—170	0,038 (0° C)	0,50	0,15	0	" "
Пенополиэтилен	120—200	0,04 (20° C)	—	—	—	горит
Пенополиуретан	50—200	0,028—0,040 (20° C)	0,50	3—30	—	по же
Пенопласты эластичные (пенополиуретан)	30—60	0,030 (20° C)	—	—	0,45	—
Пенопласты жесткие (полистирол)	15—30	0,027 (0° C)	0,93	0,7—1,5	0,70	" "
Пенополиуретан ПУ-301	100—200	0,04 (20° C)	—	8—36	—	" "

* В маркировке цистерм.

одних порошкообразных и волокнистых материалов без защитного барьера из другого какого-либо материала. Порошкообразные и волокнистые материалы могут использоваться для теплоизоляции трубопроводов.

В настоящее время наиболее эффективным изоляционным материалом для цистерн считается балязовое дерево. Балязо является пористым материалом, и вытекающий из поврежденной цистерны сжиженный метан испарится в его порах. При этом давление образовавшийся паров газа препятствует проникновению сжиженного метана через изоляцию. С увеличением толщины изоляции приток наружного тепла в цистерну соответственно уменьшается и одновременно сокращается испарение газа. Однако следует иметь в виду, что, начиная с определенной толщины, изоляция практически перестает влиять на скорость испарения газа (рис. 135) [44].

§ 24

Системы

Все системы и аппаратура, обеспечивающие нормальную эксплуатацию метановоза, должны размещаться выше уровня верхней палубы судна и крепиться на тронках цистерн (рис. 136). Они должны обеспечивать выполнение следующих функций:

- заполнение и опорожнение цистерн;
- охлаждение цистерн перед погрузкой;
- отвод испаряющегося газа из цистерн во время плавания и при погрузке;
- отвод из трюма испаряющегося в изоляции газа при повреждении цистерн;
- аварийный выброс груза из поврежденной цистерны за борт и осушение трюма от выливающегося из цистерны сжиженного газа;
- подача inertного газа и т. п.

Газообразный метан, образующийся при погрузке, удаляется из судовых цистерн по специальному отводному трубопроводу в береговые газгольдеры.

Система разгрузки сжиженного метана, которая применяется на эксплуатирующихся в настоящее время метановозах, была практически отработана на экспериментальном судне «Methane Pioneer». Она состоит из погружных насосов, установленных в каждой цистерне и предназначенных только для подачи сжиженного метана в верхнюю палубу, основных насосов (как правых, так и левых), установленных на верхней палубе в перекачивающих метан в береговые емкости, и трубопроводов.

На рис. 127 приведена принципиальная схема грузовой системы судна «Methane Pioneer». На этом метановозе установлено

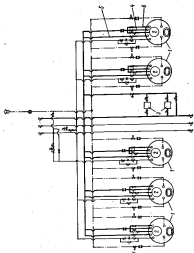


Рис. 127. Принципиальная схема системы управления двигателями самолета «Меланс Планер».

1 — топливный насос;
2 — топливный насос;
3 — топливный насос;
4 — топливный насос;
5 — топливный насос;
6 — топливный насос;
7 — топливный насос;
8 — топливный насос;
9 — топливный насос.

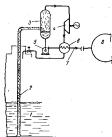


Рис. 132. Принципиальная схема газлифтной разгрузки сжиженного метана.

1 — цистерна для сжиженного метана; 2 — приемный пульт; 3 — сепаратор; 4 — компрессор; 5 — насос для сжиженного метана; 6 — конденсатор; 7 — трубопровод сжиженного метана; 8 — береговая хранилища сжиженного газа.

Лоуренс (США). Производительность выпускаемых этими фирмами насосов, как правило, не превышает 300–400 м³/час при напоре 60–70 м вод. ст. Для изготовления насосов, работающих при низких температурах, используются бронза, нержавеющая сталь, хромоникелевые сплавы. В отечественной практике для изготовления таких насосов могут использоваться стали марок 0Х13, 1Х13, Х14, Х17, 0Х18Н9, Х18Н12М2Т, 0Х23Н28М3Д3Т, НМЖМц 28-2,5-1,5. Подробное описание погружных насосов, выпускаемых зарубежными фирмами, приведено в работе [13].

Для разгрузки метана может быть применена и так называемая «газлифтная» схема (рис. 132). При этом способе выгрузки установленный на верхней палубе компрессор создает некоторое разрежение в специальном сепараторе и в него всасывает поступающую из цистерны газожидкостную смесь. Из сепаратора жидкий метан перекачивается насосом в береговую емкость, а газообразный — конденсируется в теплообменнике и вновь поступает в цистерну или непосредственно в береговую емкость. Уровень жидкости в сепараторе поддерживается автоматическим регулятором, включающим в случае изменения уровня компрессор или насос.

другой ее конец снабжен роликами, катающимися во время перемещения насосной установки по полкам шкелетной стойки. На траверсе имеется подвижное звено, на котором укреплен подъемный цепь.

Когда насосная установка находится в рабочем положении, звено, оттягиваемое пружиной, западает за приваренный к стойке упор, чем создается дополнительная фиксация насосной установки. При натяжении цепи во время подъема звено выходит из контакта с упором, не препятствуя перемещению установки.

Производство погружных насосов, которые могут применяться для выгрузки сжиженного метана, осуществляется рядом зарубежных фирм, таких, как фирма KSB (ФРГ), Бреге (Франция) и

При абсолютном давлении в цистерне 1,05 кг/см² подобная система позволяет поднимать жидкость на высоту 15,2 м при абсолютном давлении в сепараторе 0,866 кг/см². Газлифтная система разгрузки обходится дешевле, чем разгрузка с вспомогательными погружными насосами. Однако в этом случае необходима большая мощность компрессоров, так как в процессе перекачки газа происходит его интенсивное испарение.

Кроме описанных систем, на танковом должны быть предусмотрены система опрессовки палубы заборной водой, предупреждающая повышение температуры в трюме и увеличение степени испарения газа, система вентилирования межпалубного и междудокового пространства, а также коффердамов, и система подогрева балластной воды.

§ 25

Использование испаряющегося метана

При перевозках сжиженного метана на судах даже при достаточно надежной теплоизоляции цистерн потери груза от испарения в течение рейса достигают весьма значительных величин (до 0,5% от грузоподъемности судна в сутки).

Кроме эффективности теплоизоляции, на степень испарения газа влияют конструкция, форма и объем грузовых цистерн, остойчивость судна, количество газа и цистерне и т. п. Если и цистерне мало газа, то потеря от испарения составляет ~0,3% в сутки. В заправленной же почти целиком цистерне количество испаряющегося газа составит в хорошую погоду 0,4% в сутки, а в штиль — 0,5% и даже более [112].

В коротких рейсах (при небольшой грузоподъемности судна) можно избежать испарения газа, охлаждая его во время погрузки ниже температуры кипения при атмосферном давлении так, чтобы в момент прибытия судна в порт назначения температура сжиженного метана составляла примерно минус 161,5°С.

В длительных рейсах самым простым способом удаления испаряющегося газа, как уже указывалось, является его выброс в атмосферу, однако это связано с потерей значительного количества груза, особенно при большой грузоподъемности судна. На газовом грузоподъемности около 10 000 м³ ежегодно теряется от испарения 30–50 м³ метана. Этого количества газа при сжигании его в главных двигателях или котлах было бы достаточно для обеспечения судна скоростью хода порядка 15–17 узл.

Однако применение только испаряющегося метана в качестве топлива для главных двигателей практически невозможно,

поскольку испарение метана происходит неравномерно. Наиболее интенсивное испарение метана происходит в штильную погоду, когда судоводители вынуждены снижать число оборотов двигателя (т. е. уменьшать его мощность). При этом, естественно, уменьшается и расход топлива. В тихую погоду, наоборот, двигатель работает на полную мощность, расход топлива максимальный, а испарение метана — наименьшее. Поэтому для равномерного поступления газа в двигатель необходимо либо сбрасывать в атмосферу лишний газообразный метан, либо его недостаток восполнить обычным нефтяным топливом. В связи с этим все двигатели, работающие на метане, должны быть приспособлены также для работы только на нефтяном топливе и на его смеси с метаном.

Для оценки экономической эффективности использования испаряющегося метана в главных двигателях судна были выполнены технико-экономические расчеты для газовой грузоподъемностью 12 000 м, результаты которых приведены в табл. 37. При расчете потерь груза от испарения в крутовом рейсе протяженностью 700 миль принимались равными 400 м (в среднем 20—30 м в сутки). Кроме того, считалось, что в балластом переходе в цистернах остается некоторое количество сжиженного газа (~100 м) для предотвращения нагрева цистерн. При частичной замене нефтяного топлива испаряющимся газом в количестве 400 м в при-

Таблица 37

Экономическая эффективность использования в главных двигателях судна испаряющегося в процессе эксплуатации газа

Испаряющийся в процессе эксплуатации судна метан	Топливо		
	кофее	метан	газ
Частичная грузоподъемность, м	11 500	11 500	10 800
Количество рейсов за период	16,4	16,4	16,4
Продуктивность на миль, м	189	189	177
Строительная стоимость, тыс. руб.	840	860	820
Эксплуатационные расходы за эксплуатацию, тыс. руб.	1180	1110	880
Собственность, потери 1 м груза, руб. (%)	6,27 (100)	5,90 (94)	5,10 (80)
Капитализация из 1 м перевозимого груза, руб. (%)	46,6 (100)	45,9 (100)	46,5 (100)
Показатель эффективности затрат, руб./м (%)	10,73 (100)	10,49 (97,5)	9,64 (90)

установке на судно специального оборудования для сжигания газа в топках котлов паротурбинной установки его строительная стоимость несколько возрастает. При полной замене нефтяного топлива испаряющимся газом путем интенсификации испарения за счет уменьшения толщин изоляции строительная стоимость судна уменьшается, улучшаются также его эксплуатационно-экономические показатели.

Повторное сжижение газа на судах может оказаться выгодным лишь при перевозке больших количеств метана, так как установка для конденсации испаряющегося газа имеет большие габариты, вес, высокую стоимость и требует значительного количества энергии для своей работы. При грузоподъемности судна около 10 000 м, когда испарение составляет ~0,5% в сутки, расхода энергии на повторное сжижение 2 м метана в час составляет 1800 квт-час (при расходе топлива 0,6 м/час).

При оборудовании судна установкой повторного сжижения его стоимость возрастает на 8—12%.

По данным английских специалистов стоимость повторного сжижения 1 м метана составляет около 4 ф. ст. Если учесть еще стоимость нефтяного топлива, которое необходимо затратить для движения судна, повторное сжижение метана будет выгодно лишь в том случае, если его отпускная стоимость на месте потребления будет выше суммарной стоимости сжиженного метана и порту отапливания, расхода на повторное сжижение и стоимости топлива, затрачиваемого на движение судна.

Английский специалист Солитен [112] произвел экономический анализ использования испаряющегося метана в качестве топлива с учетом затрат на повторное сжижение газа и потерь, вызванных выбросом испаряющегося газа в атмосферу. Анализ выполнялся на примере английского метановоза «Methane Progress» грузоподъемностью 11 200 м. Для повторного сжижения метана на борту судна предполагалось использование криогенатора, принцип работы которого и описание даны в работе [112]. Производительность криогенатора составляет 246 м/час, в процессе повторного сжижения каждый час теряется примерно 2 м сжиженного метана. На судно грузоподъемностью 11 200 м требуется 9 криогенаторов. Они устанавливаются в отдельном помещении на верхней палубе.

Стоимость оборудования судна установкой повторного сжижения составляет, по расчетам Солитена, 360 тыс. ф. ст., что увеличивает стоимость судна примерно на 9%.

Для метановоза «Methane Progress», эксплуатируемого на линии Алжир—Англия, годовые потери от испарения метана составляют около 16,3 тыс. м. Таким образом, при стоимости 1 м сжиженного метана 14,7 ф. ст. годовой убыток от его испарения достигает 240 тыс. ф. ст. Применение установки повторного сжижения позволяет сохранить примерно 15 тыс. м метана при поте-

рах 1,5 тыс. м газа в год. При стоимости повторного сжижения 1 м метана 3,14 ф. ст. каждая тонна сэкономленного газа приносит 5,06 ф. ст. прибыли. В итоге прибыль за год составит около 75 тыс. ф. ст. на судно.

При использовании испаряющегося метана в главных двигателях годовой убыток от испарения газа уменьшится за счет экономии нефтяного топлива (стоимостью 6,5 ф. ст. за тонну) с 240 до 133 тыс. ф. ст.

В 1962 г. Английский Регистр Ллойд, а позднее Французское Бюро Веритас и другие классификационные общества разрешили использовать испаряющийся в процессе эксплуатации газ в качестве топлива для главных двигателей при условии, что он должен собираться в специальные прочные цистерны и проходить соответствующую обработку перед сжиганием при соблюдении необходимых мер безопасности.

Давление газа, подаваемого к котлам паросиловой установки, не должно превышать $1,02 \text{ кг/см}^2$, а подаваемого к двигателям внутреннего сгорания — $7,03 \text{ кг/см}^2$.

Для того чтобы работа главных двигателей не зависела целиком от испарения газа, на судне необходимо предусмотреть соответствующий запас нефтяного топлива.

Трубопроводам для подачи газа в машинное отделение должны прокладываться в специальных каналах, давление в которых при помощи вытяжных вентиляторов несколько понижается по сравнению с давлением воздуха в машинном отделении. Отсасываемый из каналов воздух необходимо проверить на утечку метана. Возле применения вытяжной вентиляции в каналы может подаваться инертный газ под давлением, значительно превышающим давление метана.

Примером паротурбинной установки, рассчитанной на сжигание нефтяного топлива (мазута), а также смеси мазута с метаном, может служить механическая установка английских метановозов «Methane Princess» и «Methane Progress».

Подогреватель, установленный на верхней палубе, рассчитан на подогрев 10,4 м газа в час от температуры минус 51 до плюс 60° С. Пар подводится к подогревателю под давлением 15,5 атм при температуре 343° С. Автоматический клапан, регулирующий расход пара на подогрев газа, полностью не закрывается, поэтому подогреватель не обмерзает при работе.

Котлы метановозов «Methane Princess» и «Methane Progress» приспособлены к работе на смеси нефтяного топлива с метаном. Пароперегреватели котлов имеют пределы регулирования, соответствующие переменным режимам работы топки при изменении процентного соотношения метана и нефтяного топлива в рабочей смеси.

Нормальная паропроизводительность каждого котла равна 22,2 в максимальной 33,2 м³/час. Пар, выходящий из пароперегрева-

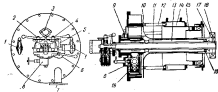


Рис. 133. Топочное устройство котла метановоза «Methane Princess».

1 — ручей, выходящий изнутри; 2 — карман; 3 — смеситель; 4 — топливный канал; 5 — блокировочное устройство; 6 — клапан подачи мазута; 7 — клапан подачи воздуха; 8 — резервуар для горячей воды; 9 — клапан системы горячего газа; 10 — отверстие для охлаждения воздуха; 11 — трубопровод подачи мазута в котел; 12 — трубопровод подачи воздуха; 13 — трубопровод подачи мазута; 14 — клапан; 15 — клапан подачи воздуха; 16 — клапан; 17 — клапан подачи воздуха; 18 — клапан; 19 — клапан.

теля, имеет давление 42,2 атм и температуру 544° С. При установке водного экономизера при нормальной нагрузке и сжигании только мазута к. п. д. котла достигает 88% *. Конструкция воздушнонаправляющих устройств позволяет использовать их при сжигании только мазута или мазута и метана одновременно. При заданной паропроизводительности котла количество воздуха, подаваемого в топку, должно быть почти одинаковым как при сжигании мазута, так и при сжигании смеси мазута с метаном.

Топочное оборудование состоит из трех форсунок с воздушно-направляющими устройствами. Форсунки с диапазоном регулирования производительности 10 : 1 позволяют обеспечить любые нагрузки котла на режимах маневрирования. Топочное устройство котла метановоза «Methane Princess» показано на рис. 133.

Блокировочное устройство прерывает поступление газа в топку до зажигания нефтяного топлива. Кроме того, оно предотвращает поступление топлива в форсунки до открытия воздушных задвижек.

Независимо от того, сжигается ли только мазут или смесь мазута с метаном, на метановозах обеспечивается автоматическое регулирование горения топлива во всем диапазоне намечаемых нагрузок котлов.

Обычно в котлах сжигается весь газ, испарившийся в грузовых цистернах судна; однако в целях безопасности в форсунки

* Значения к. п. д. относятся к расчету теплоотдачи с учетом теплоотдачи топлива, как это принято в США.

котла следует одновременно поднимать такое количество мазута, которое обеспечивает не менее 10% производительности котла. При плавлении судна порожнем из цистерны поступает газ с большим содержанием азота, при плавлении в грузу — почти чистый метан. Если поступающего газа окажется недостаточно для обеспечения требуемой производительности котла, система автоматического регулирования увеличивает подачу мазута.

Большую роль в безаварийной работе котельной установки на смеси нефтяного топлива с метаном играет защитное блокировочное устройство. Основным элементом этого устройства является быстрозапорный клапан, через который газообразный метан подводится к форсункам. В аварийных случаях (при снижении уровня воды в котле, прекращении подачи воздуха от вентилятора, нарушении факела в форсунке и низком давлении метана) быстрозапорный клапан закрывается. При срабатывании блокировки включается звуковой сигнал.

Быстрозапорный клапан установлен также на трубопроводе, по которому метан поступает к клапану, регулирующему его подачу.

В аварийном случае сначала закрывается быстрозапорный клапан, затем регулирующий, после чего трубопровод подачи газа автоматически сообщается с атмосферой.

На английских металловозах применена обычная система подачи и подогрева мазута. Давление мазута равно $22,8 \text{ кг/см}^2$, его распыление производится паром или метаном. Максимальный расход распыляемого пара составляет 795 кг/час , минимальный — $79,5 \text{ кг/час}$; при использовании парового распыления только мазута минимальный расход пара составляет 396 кг/час . Максимальный расход газа равен 335 кг/час , минимальный — 82 кг/час .

Блокировочное устройство не допускает открытия топливного клапана до частичного открытия воздушного шибера. Клапан подачи мазута должен быть полностью открыт к моменту открытия клапана подачи метана. При остановке котла эти клапаны закрываются в обратном порядке.

Трубопровод подачи метана к воздухонаправляющим устройствам помещается в рубашку, заполненную инертным газом.

Воздухонаправляющие устройства обеспечивают такой подпор воздуха, что различие между факелом при сжигании одного мазута или при сжигании мазута с метаном незначительно. При работе котлов на переменных режимах в топку обычно подается только мазут.

Природный газ, как уже указывалось, в принципе можно использовать в качестве топлива и в двигателях внутреннего сгорания, несмотря на то, что характер рабочего процесса при переходе дизеля на газ резко меняется. Температура воспламенения метана значительно выше, чем у дизельного топлива. Это

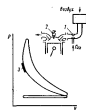


Рис. 134. Переход четырехтактного дизеля без наддува на газо-жидкостный процесс.

1 — газожидкостный процесс; 2 — процесс сжигания топлива.
1 — впускной клапан; 2 — выпускной клапан; 3 — клапан, регулирующий давление топлива.

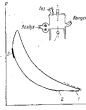


Рис. 135. Переход двухтактного дизеля на газо-жидкостный процесс.

1 — впускной и впускной клапан; 2 — выпускной клапан; 3 — клапан, регулирующий давление топлива.

создает основное препятствие к осуществлению цикла с воспламенением от сжатия при использовании метана. Кроме того, метан и отличие от обычного топлива плохо смешивается с воздухом, что сильно сказывается на качестве рабочего процесса. Поэтому использование испаряющегося метана в двигателях с воспламенением от сжатия без их переделки является неосуществимым.

Выход из положения может быть найден в переходе дизеля на искровое зажигание или в переходе на так называемый газо-жидкостный процесс [11], [12]. В последнем случае никаких изменений в конструкцию дизеля не вносится, лишь добавляется газовый смеситель, который устанавливается на всасывающий патрубок (для четырехтактных двигателей без наддува), или газовый клапан, через который газ поступает внутри цилиндра после продувки (для двухтактных дизелей и четырехтактных дизелей с наддувом).

Таким образом, при газо-жидкостном процессе в цилиндр двигателя (рис. 134, 135) поступает газожидкостная смесь. В конце сжатия температура газожидкостной смеси недостаточно высока для самовоспламенения, но превышает температуру воспламенения дизельного топлива. Поэтому зажигание газожидкостной смеси производится в конце сжатия впрыском небольшого количества дизельного топлива, которое, воспламеняясь, зажигает газожидкостную смесь. На рис. 135 приведена принципиальная схема системы управления четырехтактным дизелем с наддувом, исполь-

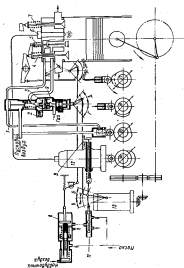


Рис. 136. Принципиальная схема системы управления четырехтактным двигателем, использующим для работы метан: А — рабочий метан; Б — газ, поступающий из газопровода; В — газ, поступающий из газопровода; Г — газ, поступающий из газопровода; Д — газ, поступающий из газопровода; Е — газ, поступающий из газопровода; Ж — газ, поступающий из газопровода; З — газ, поступающий из газопровода; И — газ, поступающий из газопровода; К — газ, поступающий из газопровода; Л — газ, поступающий из газопровода; М — газ, поступающий из газопровода; Н — газ, поступающий из газопровода; О — газ, поступающий из газопровода; П — газ, поступающий из газопровода; Р — газ, поступающий из газопровода; С — газ, поступающий из газопровода; Т — газ, поступающий из газопровода; У — газ, поступающий из газопровода; Ф — газ, поступающий из газопровода; Х — газ, поступающий из газопровода; Ц — газ, поступающий из газопровода; Ч — газ, поступающий из газопровода; Ш — газ, поступающий из газопровода; Щ — газ, поступающий из газопровода; Ъ — газ, поступающий из газопровода; Ы — газ, поступающий из газопровода; Ь — газ, поступающий из газопровода; Э — газ, поступающий из газопровода; Ю — газ, поступающий из газопровода; Я — газ, поступающий из газопровода.

1 — главный клапан; 2 — предохранительный клапан; 3 — предохранительный клапан; 4 — предохранительный клапан; 5 — предохранительный клапан; 6 — предохранительный клапан; 7 — предохранительный клапан; 8 — предохранительный клапан; 9 — предохранительный клапан; 10 — предохранительный клапан; 11 — предохранительный клапан; 12 — предохранительный клапан; 13 — предохранительный клапан; 14 — предохранительный клапан; 15 — предохранительный клапан; 16 — предохранительный клапан; 17 — предохранительный клапан.

зующим для работы метан. При изменении количества газа, поступающего из газопровода клапаны, автоматически изменяется подача жидкого топлива в цилиндры двигателя.

К средствам защиты дизеля, использующего в качестве топлива метан, относятся:

а) мембранный и предохранительный клапаны, предотвращающие заброс продуктов сгорания в газопроводящий трубопровод;
б) аппаратура обнаружения утечек метана, прекращающая подачу газа в цилиндры дизеля, если содержание метана в картере превышает 1—2%;

в) устройство, обнаруживающее неполадки в системе подачи жидкого топлива; при отклонении температуры от допустимой в системе подачи жидкого топлива подача газа прекращается;

г) реле давления в трубопроводе жидкого топлива, прекращающее подачу газа, если давление топлива падает ниже минимально допустимого, например, при пустом расходном топливном баке;

д) реле давления в напорной магистрали насоса пресной воды системы охлаждения цилиндров, прекращающее подачу газа, когда давление воды падает ниже минимально допустимого;

е) терморегулятор в системе охлаждения дизеля, включающий систему подачи газа в цилиндры двигателя, когда температура охлаждающей воды достигнет заданного значения.

§ 26

Суда для перевозки сжиженного метана

В последние годы в различных странах велись интенсивные исследования по изучению возможности транспортировки сжиженного метана морем и по созданию для этой цели специализированных судов. Было спроектировано большое количество метановозов, создано несколько экспериментальных судов, а в 1964—1965 гг. спустили в эксплуатацию первые суда, предназначенные для регулярных перевозок сжиженного природного газа. В табл. 38 приведены основные элементы и характеристики находящихся в эксплуатации метановозов и некоторых наиболее интересных проектов метановозов, разработанных в различных странах.

Как уже указывалось, первый в мире метановоз «Methane Pioneer» был перестроен из сухогрузного судна «Norman» (1961) и предназначался для экспериментальных перевозок сжиженного метана из США в Англию (подробнее см. стр. 15).

На судне «Methane Pioneer» (рис. 137) в двух транеях установлено пять прямоугольных цистерм длиной 9 м, шириной 12 м, высотой 9 м и емкостью 970 м³ каждая. Толщина стенки цистерм,

Environ Monit Assess (2008) 142:299–304

Замечание 4. Субординированная конструкция может быть использована для построения более сложных предложений.

Имя/Страна Адрес	Возраст группы лет м	Главные параметры в соотношениях										Таб. № матрицы Адреса д. с.	9-й класс всего классов в школе	Оценки диплома
		$\frac{L_{1,1}}{L_{1,2}}$	$\frac{A}{B}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{L_{1,1}}{B}$	$\frac{L_{1,1}}{A}$	$\frac{B}{F}$	$\frac{F}{A}$	$\frac{L_{1,1}}{B}$	$\frac{L_{1,1}}{A}$	$\frac{B}{F}$			
«Рубин»	605	52,11	8,50	4,49	3,56	6,12	11,53	2,30	1,29	0,681	0,397	11,0	принят улучшен	
«Белый»	700	120,00	17,40	11,70	7,40	11,00	-	-	-	-	-	11,0	принят улучшен, улучшен, улучшен, улучшен	
«Метель» Роскош	9 100	97,60	15,25	12,50	6,40	4,38	7,61	2,39	1,25	-	0,374	9,0	принят улучшен	
«Jules Verne»	23 600	188,25	24,70	16,90	7,52	7,62	11,40	3,29	2,19	0,728	0,333	17,5	принят улучшен	
«Светлая» Роскош	28 720	175,38	24,86	17,64	7,90	7,05	9,83	3,12	2,24	0,619	0,369	17,25	принят улучшен	
Проект «Формы» Белар	29 200	172,00	25,00	18,50	8,00	6,88	10,42	3,13	2,06	0,602	0,299	16,0	принят улучшен	
Проект Космос	33 900	183,00	23,80	17,70	8,20	7,53	10,34	3,48	2,15	0,727	0,311	15,5	принят улучшен	
Проект «Формы» Белар	43 300	206,50	27,40	17,60	8,60	7,54	11,74	3,19	2,05	0,637	0,400	18,0	принят улучшен	

* Прямой контакт между L_1 и L_2 может с нулевой вероятностью возникнуть.

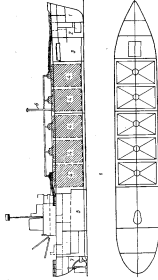


Рис. 137. Схема общего разложения асимптотического интеграла в области Рунге.



Рис. 138. Схема общего расположения судна «Pythagore».

1 — цистерны для сжиженного метана; 2 — теплоизоляция испаряющегося газа; 3 — теплоизоляция сиденья.

изготовленной из алюминивно-магниевого сплава 5456-0 по американскому стандарту, равна 10 мм. В качестве теплоизоляции использовалось бальзовое дерево толщиной 30,5 см и маты из стекловолокна, которыми изолировался верх цистерн. После переоборудования дредрейт судна уменьшился с 5100 до 2100 м. Для приема водного балласта в порожнем рефсе выделены емкости в двойном дне и двойных бортах. В связи с увеличением высоты борта несколько повысились центр тяжести судна, вследствие чего в опытных рейсах отмечалась малая остойчивость судна. Недостаток остойчивости компенсировался приемом водного балласта в двойное дно.

Главным двигателем метановоза служит дизель мощностью около 2000 л. с. Электроэнергию на суда вырабатывают два дизель-генератора мощностью по 250 лкв.

Французский экспериментальный метановоз «Beauvais», как уже указывалось, переоборудован на сугрузовое судно типа «Liberty» (195). На судне устанавливалось три цистерны для сжиженного метана общей вместимостью около 700 м³. Одна из цистерн имеет прямоугольную в плане форму и изготовлена из листов алюминивно-магниевого сплава толщиной 7—10 мм с внутренним набором. Для изготовления двух других цистерн использована специальная сталь с 9%-ным содержанием никеля. При этом в одном случае сталь выполняет функцию защитного бортера и имеет относительно тонкую оболочку, закрывающей изоляцию (сма прочная цистерна изготовлена из листов алюминивно-магниевого сплава толщиной 4 мм), а в другом служит материалом прочной цистерны. Одна из этих цистерн является многодольной, а другая имеет форму вертикального цилиндра.

Во время экспериментальных рейсов испытывались эффективность различных теплоизоляционных материалов (бальзовое дерево, стекловолокно, асбест, перлит, кагелит и пр.), а также арматура, насосы и другое оборудование.

Небольшой экспериментальный метановоз «Pythagore» (рис. 138) перевозит сжиженный метан в двух изолированных цистернах

емкостью 300 и 270 м³. Кроме метана, судно может перевозить сжиженные этилен (при $t = -104^{\circ}\text{C}$), пропан (при $t = -42^{\circ}\text{C}$) и некоторые другие газы [51].

Для выгрузки сжиженного метана используются два грузовых насоса производительностью по 60 м³/час, всасывательный насос — 120 м³/час и компрессор — 600 м³/час.

Судно оборудовано системой повторного сжижения испаряющегося газа. Ее производительность по этилену составляет 7,2 м сжиженного газа в сутки.

Главные двигатели судна — два дизеля мощностью по 600 л. с. при 1200 об/мин, работают через редуктор на один вал с винтом регулируемого шага. Управлением двигателями — дистанционное с ходового мостика. Электроэнергию вырабатывают два генератора мощностью по 300 лкв, питаемых на главные двигатели. Команда метановоза состоит из 13 чел.

Два английских одностинных судна «Methane Princess» и «Methane Progress» перевозят сжиженный метан в 9 цистернах, расположенных в трех изолированных трюмах (рис. 139) [163]. Цистерны изготовлены из листов алюминивно-магниевого сплава толщиной 15,9—19,0 мм с 5%-ным содержанием магния (сплав 5063-0 по американскому стандарту). Наибольшая из цистерн имеет длину 10,35 м, ширину 21,60 м и высоту 14,30 м, ее вес равен около 180 т, в общий вес девяти грузовых цистерн достигает 1200 т. Цистерны проходили предварительную сборку на берегу и проверку качества сварки. Крепление и центровка цистерн в трюмах такие же, как на судне «Methane Pioneer» (рис. 116).

Теплоизоляция трюмов состоит из слоев стекловолокна и пазелей бальзового дерева, покрытых пластинами из многослойной фанеры. Суммарная толщина теплоизоляции каждой стенки трюма составляет около 30 см. Верх цистерн изолирован листами из стекловолокна. Каждая цистерна установлена на слое бальзового дерева, уложенном на втором деке (рис. 117). По расчетам суточное испарение газа в течение рейса должно составлять около 0,3%.

Пространство между теплоизолирующей трюмой и цистернами заполняется сухим жидким газом — азотом, который в жидком виде хранится в двух цистернах, установленных в специальном помещении на верхней палубе. Там же расположены испарители.

Разгрузка судна осуществляется девятью погружными насосами производительностью по 240 м³/час, приводимыми к которым служат расположенные на верхней палубе электродвигатели, и двумя центробежными турбонасосами, перекачивающими метан с судна на берег. В каждой цистерне, кроме того, имеется пневматический запорный насос. Производительность насосов обеспечивает разгрузку судна за 10 час.

Водный балласт в количестве до 13 700 м принимается в носовой балластной танк, коффердами, двойные борта и двойное

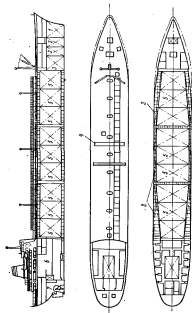


Рис. 139. Схема общего расположения метановоза «Methane Princess».

а — топливный аппарат; б — балластный якорь; в — поперечная перегородка; г — горизонтальная перегородка; д — вертикальный корпус; е — вертикальный корпус; ж — вертикальный корпус; з — вертикальный корпус.

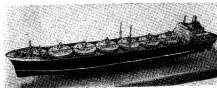


Рис. 140. Вид французского метановоза «Jules Verne».

дно. Запас нефтяного топлива (около 1600 м³) хранится в носовом днитнике.

Главным двигателем метановоза служит паровая турбина максимальной мощностью 13 750 л. с. При эксплуатационной мощности 12 500 л. с. (при 107 об/мин) судно развивает скорость 17,25 узл. В балластном режиме скорость возрастает до 20 узл.

При давлении 42 кг/см² при температуре 475°С вырабатывается двумя котлами Фостер Уиллер паропроизводительностью по 26 т/час, приспособленными для работы на нефтяном и газовом топливе.

Электростанция судна состоит из двух турбогенераторов мощностью по 600 кВт и одного дизель-генератора мощностью 100 кВт.

Дальность плавания метановоза составляет 1500 миль; экипаж насчитывает 55 чел., стоимость постройки равна 4,75 млн. ф. ст.

Французский метановоз «Jules Verne» (рис. 140 и 141) перевозит сжиженный природный газ в 7 вертикальных цилиндрических цистернах, из которых 6 имеют диаметр 18,35 м и вместимость по 4087 м³, а одна носовая — диаметр 12,0 м и вместимость 1126 м³ [78]. Днище цистерн имеет коническую форму, а верх — эллиптическую (рис. 142).

Цилиндрическая форма цистерн обеспечивает, по сравнению с прямоугольной, меньшую концентрацию напряжений от температурных деформаций при заправке.

С другой стороны, установка цилиндрических цистерн приводит к значительным потерям кубатуры, а следовательно, при той же вместимости требует больших размеров судна. При практически равной ширине и меньшей на 700 м³ вместимости судно «Jules Verne» имеет большую на 13 м длину по сравнению с английским метановозом «Methane Princess».

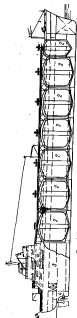


Рис. 141. Схема общего расположения оборудования «Jules Verne».

1 — аппарат для сжижения метана; 2 — резервуар-кожух для хранения жидкого азота; 3 — резервуар-кожух для хранения жидкого азота; 4 — цистерна.

Цистерны на судне «Jules Verne» изготовлены из стали с 9%-ым содержанием никеля. Поперечная жесткость цистерны обеспечивается шестью коробчатыми балками, а вертикальная — диаметром 3 м, который служит, кроме того, для размещения трубопроводов, погружает насоса и троса (см. рис. 122). Верхняя и нижняя коробчатые балки через 8 подвешенных опор связаны с наружным цилиндрическим кожухом, который жестко встроен в корпус. Подвешенные опоры воспринимают перемещения цистерны, вызванные колебаниями судна и температурными деформациями. Опоры изолированы и заключены в газонепроницаемую оболочку.

Защитный кожух имеет внутреннюю оболочку из стали с 9%-ным содержанием никеля, и внешнюю оболочку из нержавеющей стали. Пространство между оболочками заполнено изоляцией из полиэфирной смолы типа «Агелсод». Наружная оболочка кожуха составляет одно целое с корпусом судна, жесткость кожуха обеспечивается концентрическими и радиальными ребрами жесткости. Вес цистерны в прямом или наклонном положении судна воспринимается двойным дном.

В необходимых случаях можно производить наружный осмотр днища цистерны, для чего в трюме установлены докраны, позволяющие подвешивать цистерну на высоту 0,85 м.

Основным изоляционным материалом цистерн служат гранулированный шлак (перлит), которым заполняется пространство между цистерной и внутренней оболочкой кожуха. Выбор типа изоляционного материала для этого судна определялся следующими требованиями:

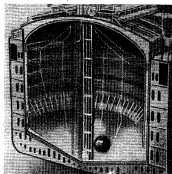


Рис. 142. Схема установки цистерны в трюме судна «Jules Verne».

- испарение метана не должно превышать 0,27% в сутки;
- температура смежных с цистернами конструкций корпуса не должна превышать минус 5°С;
- необходимо, чтобы изоляция днища служила одновременно и опорой цистерны;

— изоляция верха и стенок цистерны должна легко удаляться с тем, чтобы обеспечить возможность осмотра цистерны.

Изоляционный материал можно удалять из пространства между цистерной и кожухом с помощью сжатого воздуха. Перлит находится в атмосфере инертного газа (азота), давление которого может регулироваться.

Аварийный запас инертного газа хранится в сферических емкостях внутри цистерны и служит для экстренного заполнения цистерны в случае разрушения ее оболочки, а также для компенсации утечек инертного газа из изоляции.

Разгрузка каждой цистерны производится двумя погружными насосами производительностью по 450 м³/час, подающими жидкий метан к установленным на верхней палубе трем центробежным насосам производительностью по 800 м³/час. Чтобы при разгрузке не образовался вакуум, приводящий к интенсивному испарению

жидкого метана, цистермы заполняются поступающим под небольшим избыточным давлением с берега газообразным метаном. Если погружные насосы выйдут из строя, сжиженный газ может быть вытеснен из цистермы газообразным метаном. Разгрузка асептической цистерны занимает 10 час.

Испарившийся в течение рейса метан может использоваться в качестве топлива в судовых котлах, либо выбрасывается в атмосферу через мачты.

В рейсе порожнем в бортовые танки прижимается водная балласт, количество которого выбирается так, чтобы осадка судна и его остойчивость соответствовали осадке и остойчивости в грузу. Откачка балласта производится двумя центробежными турбо-насосами производительностью по 900 м³/час и двумя закрываемыми насосами производительностью по 90 м³/час, установленными в машинном отделении. Бортовые балластные танки имеют систему подогрева на случай необходимости аварийной защиты судовых конструкций от действия чрезмерно низкой температуры.

Для сохранения в рейсе порожнем низкой температуры в грузовых цистермах на судне предусмотрена система орошения, по которой подается сжиженный газ, оставаемый в небольшом количестве в носовой цистерме.

Все операции по разгрузке, балластировке и орошению осуществляются из поста управления, расположенного в носовой части надстройки.

Цистерны оборудованы дистанционными указателями степени заполнения. В различных частях судна установлены газоанализаторы, сигнализирующие об утечке метана из цистерн.

Для тушения пожаров служит система пенотушения и система химического тушения на специальном пенообразующем составе.

В целях повышения безопасности эксплуатации судна предусмотрены запасной разгрузочный трубопровод, идущий к корме и позволяющий вытеснить жидкий метан в море. Главным двигателем судна служит ТЗА максимальной мощностью 15 000 л. с. при 135 об/мин. Пар давлением 50 кг/см² при температуре 480° С генерируется двумя котлами Фостер Уиллер производительностью по 26 м³/час. В качестве топлива может использоваться мазут, испарившийся метан или смесь мазута с метаном.

Два турбогенератора мощностью по 700 лкв и дизель-генератор мощностью 320 лкв вырабатывают переменный ток напряжением 440 в. Судно оборудовано носовым подруливающим устройством мощностью 700 л. с.

Проект метановоза фирмы Везер разработан в двух модификациях с вместимостью цистерн 21 200 и 34 500 м³ [122]. В первой модификации сжиженный метан предусмотрено разместить в 20 грузовых цистермах, установленных в пяти трюмах (рис. 143). Перечное сечение судна и крепление цистерм в трюме показано на рис. 118 и 119.

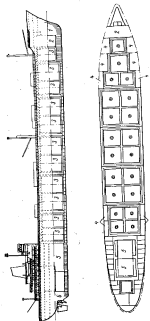


Рис. 143. Схема общего расположения метановоза по проекту фирмы Везер.
1 — форштевень; 2 — диаметр; 3 — цистерны для сжиженного метана; 4 — цистерны для жидкого балласта; 5 — машинно-отделение; 6 — котельная; 7 — дизель; 8 — турбогенератор; 9 — турбогенератор; 10 — турбогенератор; 11 — турбогенератор; 12 — турбогенератор; 13 — турбогенератор; 14 — турбогенератор; 15 — турбогенератор; 16 — турбогенератор; 17 — турбогенератор; 18 — турбогенератор; 19 — турбогенератор; 20 — турбогенератор.

Отличительными особенностями первой модификации являются крепление изоляции непосредственно на цистерне, выполненной из холодоустойчивой стали, и отсутствие двойных бортов.

Судно второй модификации отличается от первой наличием двойных бортов.

Применение на судах небольших прямоугольных цистерм, устанавливаемых в два ряда по ширине судна, преследовало цель получения малых по носу цистерн, которые могли бы устанавливаться на судно заводскими кранами.

По проекту Корлетта [66] перевозка сжиженного метана на газозвезе предусмотрена в 5 больших вертикальных цилиндрических цистернах и в дополнительных небольших цилиндрических резервуарах, расположенных по бортам и в носу в отдельных отсеках (рис. 144).

Грузовые цистерны изготовлены из алюминий-магниевого сплава с 4,5—5,0%-ым содержанием магния. Наружная теплоизоляция, выполненная из предварительно напряженного стекловолокна, покрыта слоем полиизолена и металлической решеткой. Общая толщина изоляции составляет около 25 см. Патрубки цистерн и их днища изолированы трапециевидным шлаком (перлитом).

Большие цистерны имеют диаметр около 21,4 м и вес приблизительно 230 т; такие же цистерны из нержавеющей стали весят около 460 т. Общий же вес цистерн на судне должен составить около 1400 т.

На судне по проекту Корлетта предусмотрена возможность перевозки вместе с газом ~1000 т нефти или нефтепродуктов в бортовых цистернах и отсеках двойного дна, которые при отсутствии нефти должны заполняться водным балластом.

Поскольку у метанола предусмотрен относительно высокий излодный борт, для обеспечения устойчивости на курсе судно оборудовано двумя анкетами и двумя рулями.

Предполагается, что суточное испарение газа составит в процессе эксплуатации 25—30 т. Предусмотрена установка конденсации испаряющегося газа, хотя судно рассчитано на короткое рейсы и погрузку метана предполагается производить при температуре несколько ниже его температуры кипения. Установка повторного сжижения имеет мощность 2000 л. с. Строительная стоимость судна оценивается в ~3,8—3,9 млн. ф. ст.

Метановоз по проекту фирмы Ховальтсверке отличается от рассмотренных судов тем, что на нем сжиженный метан предполагается перевозить в газонепроницаемых трюмах (рис. 145) [100]. Корпус предусмотрено изолировать изнутри пластинами стропора, обшитыми со стороны груза тонкими листами из алюминий-магниевого сплава.

Корпус судна выполнен с двойным дном и двойными бортами, а также с продольными и поперечными переборками, образующими коффердамы.

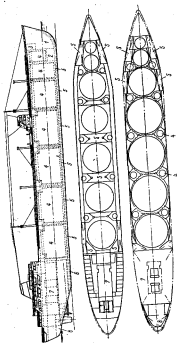


Рис. 144. Схема общего расположения цистерм на проекте Корлетта.
1 — корпус; 2 — донная; 3 — киль; 4 — балластные цистерны; 5 — цистерны для сжиженного метана; 6 — цистерны для сжиженного метана; 7 — цистерны для сжиженного метана.

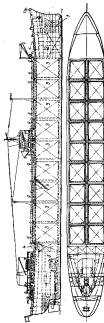


Рис. 145. Схема общего устройства судна для перевозки сжиженного метана фирмы Ховиллсберга.
1 — форштевень; 2 — дилкатер; 3 — вентри для сжиженного метана; 4 — турбинный насос для отбора испаряющегося газа; 5 — малый-моторный агрегат; 6 — вентри.

Каждый трюм оборудуется трубопроводом с предохранительным клапаном для отвода испаряющегося газа. Эти трубопроводы соединяются с общим изолированным трубопроводом, идущим по верхней палубе и присоединяющимся к прочим цилиндрическим цистернам. Из цистерны испаряющийся газ будет поступать к топкам котлов. Кроме того, предусмотрена возможность отвода газа для смешивания его с азотом и последующего выпуска в атмосферу.

Погрузка метана производится в заполненный инертным газом трюм и начинается с охлаждения легкой алюминиевой оболочки и изоляции через разбрызгивающие насадки. Затем трюм заполняется полностью.

Выгрузка сжиженного газа производится с помощью насосов, размещенных в шахтах продольного коффердама. Дилкатер для привода насосов вынесены на верхнюю палубу.

Судно будет перевозить за рейс около 16 600 т сжиженного метана. За время рейса примерно 300 т метана испарится, а около 500 т останется в трюмах на обратный рейс.

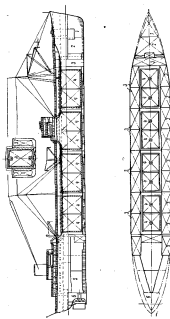


Рис. 146. Проект переоборудования танкера Т-2 в судно для перевозки метана и нефти, арктический Кукан.
1 — форштевень; 2 — дилкатер; 3 — палла для нефти; 4 — вентри для нефти; 5 — малый-моторный агрегат; 6 — вентри.

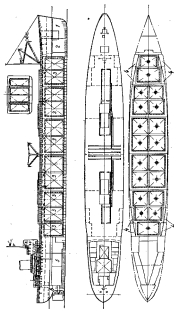


Рис. 147. Проект переоборудования танкера Т-2 в мостовое, предлагаемый фирмой Везер.

1 — дымовая труба; 2 — детали; 3 — главный корпус; 4 — главный корпус; 5 — корпус.

Таким образом, при приеме в шуните отправки 16 600 м сжиженного метана и нужде доставки будет выгружено лишь 15 800 м, т. е. 95% груза.

Одно из первых предложений переоборудования танкера Т-2 в мостовое принадлежало американскому инженеру Крекку [100]. Сжиженный метан предполагалось перевозить в 8 изолированных цистернах объемом около 4170 м³, установленных в центральных отсеках танкера (рис. 146), где предусматривалось второе дно, а в бортовых танках предполагалось перевозить нефть. В качестве теплоизоляции цистерн предполагалось использовать старопор и стекловатно-топливную приблизительно 30,5 см. Согласно предварительным расчетам, стоимость переоборудования танкера в мостовое составила бы около 3,6 млн. долл.

Главные размеры и основные характеристики судна имеют следующие значения:

	До переоборудования	После переоборудования
Длина между перпендикулярами, м	153,30	153,30
Ширину, м	20,70	20,70
Высота борта, м	11,96	11,96
Осадка в полном грузу, м	9,5	8,58
Вес судна в порожнем, т	5365	6150
Грузоподъемность, т	16 800	11 510
Количество нефти, т	16 800	16 800
Количество сжиженного газа, т	—	1740
Запас топлива и других расходных материалов, т	2150	2150
Водоизмещение в полном грузу, т	24 330	19 610
Мощность главного двигателя, л. с.	7500	7500
Скорость хода, узл.	14,5	15,0

Немецкая фирма Везер рекомендовала при переоборудовании заменить среднюю часть танкера Т-2 и сохранить кормовую и носовую оконечности (рис. 147). Предполагалось также, что новое судно будет перевозить только сжиженный метан. Судно по проекту фирмы Везер должно иметь следующие основные элементы и характеристики:

Длина между перпендикулярами, м	168,20
Ширину, м	22,30
Высота борта, м	14,5
Осадка, м	8,95
Емкость цистерн для газа, м³	15 620
Мощность главного двигателя, л. с.	7500
Скорость хода, узл.	14,5

Вопросы экономики перевозки газа на судах

§ 27

Экономическая эффективность
газоборгов

Вопросу оценки экономической целесообразности создания судов-газовозов посвящено большое количество работ. Особенно много работ было выполнено с целью определения целесообразности постройки судов для перевозки сжиженного природного газа, используемого в качестве быстрого и промышленного топлива. Это объясняется острой нехваткой энергетического сырья в ряде стран Западной Европы, а также в Японии, и поисками таких видов топлива, стоимость которых на месте потребления была бы наименьшей. Эта стоимость складывается из стоимости топлива на месте добычи и расходов на транспортировку до места потребления.

В случае использования в качестве топлива природного газа, доставляемого морем, стоимость его на месте потребления будет складываться из следующих составляющих:

- расходов на добычу и очистку газа от примесей;
- расходов на транспортировку газа по трубопроводу до установки для сжижения в порту отправки;
- стоимости сжижения газа;
- расходов на хранение газа в береговых емкостях;
- расходов на транспортировку морем;
- стоимости реганификации и доставки потребителям.

Наиболее серьезное исследование экономической целесообразности транспортировки природного газа морем было выполнено П. Верре [119].

Этой проблемой занимались также Коракет [66], Бернс и Кларк [6] I, Ледерманн и Вильямс [92], Мак-Мулен [99] и др., а также специалисты ряда западно-европейских, американских

и японских компаний. В Советском Союзе данный вопрос рассматривался в работе [25].

Добыча газа обходится в несколько раз дешевле добычи таких видов топлива, как нефть или уголь. Стоимость добычи газа в различных районах составляет, по зарубежным данным, ~0,1—0,9 цента за 1 м³. Например, стоимость газа у скважины в Сахаре составляет около 0,1 цента за 1 м³. В СССР средняя стоимость добычи природного газа в 1968 г. составляла ~0,07 коп. за 1 м³, а в 1965 г. — 0,05 коп. за 1 м³ [38].

Расходы по перекачке газа по трубопроводам от места добычи до морского порта складываются из амортизационных отчислений от стоимости газопровода и перекачивающих станций, из расходов на электроэнергию, ремонтные работы, заработную плату обслуживающего персонала, затрат на освещение, отопление и охрану станций. Некоторые из перечисленных статей расхода зависят от количества перекачиваемого газа, другие — нет. Исходя из этого, стоимость перекачки 1 м³ газа П. Верре предлагает выражать в следующем виде [119]:

$$T_{\text{пер}} = \frac{A}{VQ} + B, \quad (81)$$

где A — эксплуатационные расходы, не зависящие от объема перекачиваемого газа;

B — относительные эксплуатационные расходы, зависящие от объема перекачиваемого газа;

Q — объем перекачиваемого газа.

По отечественным данным, стоимость транспортировки газа по трубопроводу составляет 1,5—2,0 коп. на 1000 м³/км в зависимости от диаметра трубопровода и расстояния [36].

В общем расходах на транспортировку газа наибольшую долю составляют затраты на его сжижение. Для крупных установок по сжижению стоимость сжижения 1 м³ газа, по П. Верре, можно с достаточной степенью точности выразить формулой

$$S_{\text{сж}} = \frac{c}{V} + b + 0,14(c + T_{\text{пер}}), \quad (82)$$

где

$S_{\text{сж}}$ — стоимость сжижения 1 м³ газа;

V — производительность установки по сжижению, млн. м³/сут;

c — стоимость 1 м³ газа у скважины;

$T_{\text{пер}}$ — стоимость перекачки 1 м³ газа до установки для сжижения;

a — эксплуатационные расходы, не зависящие от производительности установки;

b — относительные эксплуатационные расходы, зависящие от производительности установки (амортизационные отчисления, стоимость энергии, потребляемой установкой, и т. п.).

Последний член в формуле (82) выражает стоимость газа, расходуемого в процессе сжижения (14% от всего поступающего к установке газа). Величина отношения $\frac{P}{V}$ при высокой производительности установки весьма незначительна по сравнению с величиной b , т. е. стоимость сжижения 1 м³ газа мало зависит от общего количества сжижаемого газа. С увеличением производительности установки свыше 2 млн. м³/сут. стоимость сжижения практически перестает снижаться.

По данным Корлетта, а настоящее время стоимость сжижения 1 м³ газа составляет 3,5—4,0 ф. ст.

Построенный в 1964 г. в порту Арзея (Алжир) завод сжижения природного газа, транспортируемого в Англию и Францию, имеет производительность 4,25 млн. м³/сут. Мощность энергооборудования завода составляет 34 500 квт. Постройка завода обошлась в 40 млн. долл.

Следующими по величине после расхода на сжижение наиболее крупными являются расходы на транспортировку газа морем. По данным П. Верре, стоимость метановоза (в млн. франков) равна

$$S_{\text{судна}} = 0,40 P_{\text{гр}} \quad (83)$$

где $P_{\text{гр}}$ — грузоподъемность судна, т.

По расчетам Корлетта, стоимость метановоза грузоподъемностью 10 000 т составит 3,5 млн. ф. ст. В случае оборудования судна установкой повторного сжижения испаряющегося газа его стоимость возрастает до 3,8—3,9 млн. ф. ст. Немногим меньше половины указанных расходов приходится на цистерны, изоляцию и необходимое оборудование.

Результаты проектных проработок метановозов и оценка их строительной стоимости показали, что в первом приближении стоимость метановоза может быть выражена следующей зависимостью (в тыс. руб.):

$$S_{\text{судна}} = K \cdot P_{\text{гр}} \quad (84)$$

где K — коэффициент, зависящий от грузоподъемности судна и равный 1,0—1,2 руб./т. Меньшее значение коэффициента относится к судам грузоподъемностью 10 000 т и выше, а большее — к судам грузоподъемностью около 2000 т.

Стоимость транспортировки 1 м³ газа морем можно определять по формуле

$$S_n = \frac{N}{V} (a + b \sqrt{P_{\text{гр}} \cdot 10^{-3}}), \quad (85)$$

где N — число судов грузоподъемностью $P_{\text{гр}}$, доставляющих в порт назначения V млн. м³ газа в сутки (количество судов определяется с учетом эксплуатационного времени на ремонт и т. п.);

a — общие административные расходы, заработная плата экипажа и другие затраты, не связанные со стоимостью судна и его эксплуатации;

b — расходы, связанные со стоимостью судна и его эксплуатацией (амортизационные отчисления, расходы на топливо, смазочное масло и т. д.).

С увеличением грузоподъемности судна стоимость транспортировки газа морем снижается. Однако это не значит, что следует стремиться к постройке судов наибольшей грузоподъемности. Анализ стоимости хранения газа и портовых сооружений для приема сжиженного газа показывает, что из-за большой грузоподъемности судна возможно резкое увеличение расходов на хранение сжиженного газа. В связи с этим при выборе грузоподъемности газовоза необходимо учитывать капиталоотложения в береговое хозяйство (хранилища, трубопроводы, установка регазификации и т. п.).

Для того чтобы судно не простаивало в портах, необходимо предусматривать общую грузоподъемность резервуаров, примерно в 1,5 раза превышающую грузоподъемность судна. Иногда выгодно сооружать резервуары вместимостью по 2000 м³, а необходимое число их определять по следующей формуле (округлив результат до большего целого числа):

$$n = 1,8 \cdot 10^{-3} P_{\text{гр}} \quad (86)$$

По данным П. Верре, затраты на изготовление резервуаров для хранения газа в тыс. франков составляют (2,85 + 3,00) $P_{\text{гр}}$, а стоимость портового оборудования, необходимого для приема жидкого метана, примерно 58 $\sqrt{P_{\text{гр}}}$.

Стоимость хранения 1 м³ метана в резервуарах в жидком виде можно определить по формуле

$$S_{\text{гр}} = \frac{a + b \sum P_{\text{гр}} \cdot 10^{-3}}{V}, \quad (87)$$

где $P_{\text{гр}}$ — грузоподъемность всех судов, обслуживающих порт выгрузки и перевозках в среднем V млн. м³ газа в сутки, т;

a — расходы, не зависящие от объема хранимого газа (заработан плата персонала и т. д.);

b — расходы, зависящие от объема хранимого газа (амортизация, страхование и т. п.).

Формула (87) может применяться также для определения стоимости хранения газа в портах оттаивания. Входящие в эту формулу коэффициенты a и b для данного случая имеют одинаковый порядок величины.

О величине затрат на сооружение береговых хранилищ сжиженного метана можно также судить по опубликованным данным о стоимости береговых хранилищ на о. Кайков в устье Темзы.

На эту базу сжатый газ доставляется двумя метановозами «Methane Princess» и «Methane Progress». В состав базы входят 5 хранилищ вместимостью по 4000 м³ и одно вместимостью 2000 м³, а также установка регазификации с трубопроводами. Большие хранилища имеют форму цилиндров диаметром около 30 м и высотой около 14 м. Они изготовлены из алюминивно-магниевого сплава и помещены в стальной кожух.

Пространство между стенками (расстояние между которыми равно 760 мм) заполнено изоляционным материалом. Общая стоимость базы составляет около 8 млн. долл., или ~30% от стоимости судна, обслуживающего эту базу.

По американским данным, затраты на сооружение наземного стального хранилища для метана емкостью около 70 000 м³ составляют около 50 долл./м³, а стоимость подземного железобетонного хранилища такой же емкости — около 20 долл./м³.

Стоимость регазификации 1 м³ газа П. Верре предлагает определять по следующей формуле:

$$S_{\text{рег}} = \frac{a}{V} + b, \quad (88)$$

где a — расходы, не зависящие от объема газа;

b — относительные расходы, зависящие от объема газа.

Величина b примерно на 90% состоит из расходов на регазификацию и на 10% — из расходов на амортизационные отчисления (поскольку установки для регазификации не требуют больших капиталовложений).

В табл. 39 приведены подсчитанные П. Верре значения коэффициентов a и b , входящих в формулы (82), (85), (87) и (88). Эти значения определены для следующих условий: процент на капитал составляет 6%; срок службы установки сжатия, установки регазификации и газопровода — 15 лет, срок службы резервуаров-хранилищ — 25 лет. Объем газа, поставляемого ежегодно, принимался равным 330 V млн. м³, где V — средний суточный объем

Таблица 39

Значения коэффициентов a и b в формулах (82), (85), (87) и (88)

Виды действий газа	a	b
Сжатие газа	0,04—0,06	0,18—0,20
Транспортировка морем	0,07—0,08	0,18—0,22
Хранение	0,006—0,006	0,0065—0,0090
Регазификация	0,004—0,005	0,004—0,005

Таблица 40

Сравнительные значения значений M (по данным П. Верре)

Характеристики	Лос-Анжелес — Мериен			Даллас — Алавер — Атланта		
	1	4	8	1	4	8
Объем газа, транспортируемый за год, млн. м ³	12 000	18 000	18 000	15 000	15 000	15 000
Средний суточный объем доставляемого газа, млн. м ³	32	27	27	27	27	27
Проектируемая установка для сжатия газа, млн. м ³ /сут	1	3	6	2	8	16
Потребная емкость судна	2000	2000	2000	2000	2000	2000
Грузоподъемность судна, м	220	650	1200	300	900	1650
Потребное количество резервуаров для хранения газа	0,41—0,44	0,32—0,35	0,31—0,34	0,54—0,59	0,45—0,50	0,43—0,48
Вместимость резервуара, м ³						
Суточная капитализация (в млн. долларов)						
Валовая M , млн. долл./1000 тонн						

поставляемого газа. Эксплуатационный период для судов составляет 312 сут., теплотворная способность газа равна 10 000 ккал/м³.

Приведенные значения даны в качестве примера. Однако они позволяют сравнивать затраты на каждом этапе доставки газа к потребителю.

С учетом приведенных формул стоимость доставки газа потребителю равна

$$S_{\text{дос}} = (c + T) S_{\text{сж}} + S_{\text{н}} + S_{\text{сп}} + S_{\text{мр}} \quad (89)$$

Отсюда

$$S_{\text{дос}} = M + 1,14 (c + T), \quad (90)$$

где

$$M = \left(\frac{a}{V} + b \right)_{\text{сж}} + \left[\frac{N}{V} (a + b) \sqrt{P_{\text{гп}} \cdot 10^{-3}} \right]_{\text{н}} + \left(\frac{a + b}{V} \sum P_{\text{гп}} \cdot 10^{-3} \right)_{\text{сп}} + \left(\frac{a}{V} + b \right)_{\text{мр}}.$$

Стоимость транспортировки может быть выражена аналогичной формулой

$$S_{\text{тр}} = M + 0,14 (c + T). \quad (91)$$

В табл. 40 приведены результаты выполненных П. Верре расчетов величины M для двух конкретных случаев.

Кроме исследований П. Верре, как уже указывалось, было проведено много работ с целью оценки экономичности доставки жидкого метана морем. Их результаты в большинстве случаев несогласны, так как в каждой работе приняты свои исходные данные. Тем не менее некоторые из этих результатов представляют определенный интерес (табл. 41).

С целью предварительной оценки экономической эффективности газовозов были проведены сравнительные экономические расчеты стоимости доставки 1 м условного топлива газовозом и танкером [25]. При сравнении экономических показателей газовозов и танкеров рассматривалась не стоимость транспортировки газа и нефти морем, а стоимость 1 м условного топлива *, доставляемого газовозом или танкером в пункт потребления (табл. 42). Из-за большой стоимости специального оборудования (цистерны, колонны и т. п.) и меньшего коэффициента утилизации водоземзаклада по грузоподъемности (0,35–0,50 вместо 0,55–0,70 у танкеров) стоимость морской транспортировки 1 м условного топлива на газовозе на 15–85% выше, чем на танкере. Однако из-за чрезвычайно низкой стоимости газа в месте добычи (в 3–10 раз ниже,

* Для сравнения все виды топлива приводятся к условному топливу, теплотворная способность которого принимается равной 7000 ккал/м³.

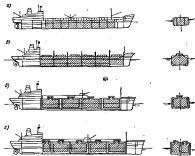


Рис. 148. Конструктивные типы судов, перевозящих различные виды топлива: а — танкер; б — угольщик; в — судно для перевозки сжиженного природного газа; г — метановоз.

чем для нефтепродуктов) стоимость 1 м условного топлива, доставляемого газовозом, на 10–30% ниже, чем у танкера.

Западногерманская фирма Ховальдтсберге [100] провела сравнение стоимости транспортировки морскими судами топлива разных видов с одинаковым запасом энергии 17,5 · 10⁹ ккал (рис. 148). Основные элементы этих судов, а также экономические характеристики транспортировки на них различных видов топлива приведены в табл. 43.

Как видно из таблицы, стоимость морской доставки газа потребителям (с учетом расхода на сжижение и хранение в береговых емкостях) значительно превышает стоимость морской доставки эквивалентного количества угля и нефти.

§ 28.

Выбор оптимальной грузоподъемности и скорости хода

На выбор грузоподъемности газовоза, как и любого другого судна, наибольшее влияние оказывают величина годового грузопотока, партийность груза, дальность плавания и скорость хода.

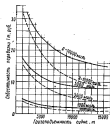


Рис. 149. Зависимость себестоимости перевозки 1 м³ сжиженного газа от грузоподъемности судна и дальности плавания.

— для перевозки газа под давлением;
--- при парогазовом охлаждении газа.

шением грузоподъемности себестоимость перевозки снижается. Дело в том, что при увеличении размеров судна сопротивление воды его движению возрастает медленнее, чем водоизмещение и грузоподъемность, в результате чего относительная потребляемая мощность механизмов, расход топлива, а также эксплуатационные расходы, приходящиеся на 1 м³ перевозимого груза, уменьшаются. С увеличением грузоподъемности судна снижаются затраты стали на 1 м³ перевозимого груза, а следовательно, и относительные капиталоиздержки. Однако, как это видно из рис. 149 [25], снижение себестоимости с ростом грузоподъемности судна происходит неравномерно. С повышением грузоподъемности в определенных пределах себестоимость резко падает, а затем снижается весьма незначительно и даже возрастает. Для судов, перевозящих пропан, бутан и аммиак, целесообразным пределом грузоподъемности, дальнейшее увеличение которой не идет к заметному уменьшению себестоимости перевозок, можно считать величину 5000—6000 м³ при дальности плавания, не превышающей 1000 миль, а при дальности плавания 10 000 миль эта величина возрастает до 15 000—20 000 м³. Приведенные на рис. 149 кривые зависимости себестоимости перевозки 1 м³ сжиженного пропана от грузоподъемности судна и дальности плавания подсчитаны без учета партийности груза, которую следует принимать во внимание при окончательном выборе грузоподъемности судна.

Как указывалось выше, при выборе грузоподъемности газовоза целесообразно также учитывать капиталоиздержки в береговые хранилища сжиженного газа, так как постройка слишком больших газопроводов может привести к чрезвычайно высоким затратам на постройку береговых хранилищ. Однако влияние этих затрат не так значительно, как влияние эксплуатационных факторов, поэтому при предварительном определении грузоподъемности газовоза ими можно пренебречь.

Анализ изменения себестоимости перевозки 1 м³ сжиженного газа в зависимости от грузоподъемности судна показал, что с повышением грузоподъемности перевозки снижаются.

Для судна, перевозящего сжиженный метан, целесообразный предел грузоподъемности (опять-таки, без учета партийности) равен 25 000—30 000 м³ при дальности плавания 10 000 миль.

В качестве примера определения целесообразной грузоподъемности можно привести результаты расчета технико-экономических характеристик метановозов, предназначенных для эксплуатации на короткой линии протяженностью 300 миль (например, Клайпед — Санкт-Петербург). Расчеты производились при принятом годовом грузооттоке сжиженного метана 1—3 млн. т. *

Были рассмотрены четыре варианта метановозов, основные характеристики которых приведены в табл. 44. Скорости хода этих судов определялись из условия равенства относительных скоростей, что стоит их в одинаковом положении с точки зрения сопротивления воды движению. В качестве главного двигателя предусматривался маломоторный дизель Брянского завода.

Для рассматриваемых вариантов метановозов были подсчитаны суммарные капиталоиздержки в постройку судов, обеспечивающих одинаковые грузооттоки. Результаты расчета приведены в табл. 45. Анализ показал, что для принятой дальности плавания при перевозке метана на судах грузоподъемностью около 6000 м³ удельные капитальные затраты при грузооттоке 2,5 млн. т метана в год будут минимальными. При грузооттоке в 1 млн. т затраты на постройку таких судов увеличатся по сравнению с минималь-

Таблица 44

Основные характеристики метановозов, рассматриваемых при выборе оптимальной грузоподъемности

Характеристика	Варианты			
	I	II	III	IV
Грузоподъемность, м	2500	3000	10 000	20 000
Длина между перпендикулярами, м	110,0	136,0	170,0	212,0
Ширина, м	14,9	18,4	22,9	28,8
Высота борта, м	10,8	12,3	16,7	20,9
Осадка, м	4,8	5,9	7,4	9,3
Коэффициент общей полезности	0,70	0,70	0,70	0,70
Водоизмещение, м	8450	10 620	20 700	41 000
Грузоемкость, м³	6250	12 500	25 000	50 000
Мощность главного двигателя, л. с.	2500	5750	11 900	27 000
Скорость хода, узл.	16,1	18,6	17,5	19,5

* Работа выполнена в ЦУСНМФс (Ленинград).

Таблица 45

Суммарные затраты на постройку металловозов, обеспечивающих заданной грузоподъемности

Характеристики	Варианты				Оптимальный
	I	II	III	IV	
Грузопоток 1 млн. т					
Грузоподъемность, т	2500	5000	10 000	20 000	3500
Необходимое количество судов	4,75	2,57	1,45	0,82	4,0
Суммарные капиталовложения*, тыс. руб.	13 100	13 100	13 600	15 900	13 050
Средняя стоимость судна, тыс. руб.*	2760	5100	9400	19 400	3280
Грузопоток 2 млн. т					
Грузоподъемность, т	2500	5000	10 000	20 000	4500
Необходимое количество судов	9,50	5,14	2,90	1,64	5,0
Суммарные капиталовложения, тыс. руб.	23 500	23 100	24 000	28 700	23 100
Средняя стоимость судна, тыс. руб.*	2480	4500	8300	17 500	4830
Грузопоток 3 млн. т					
Грузоподъемность, т	2500	5000	10 000	20 000	6500
Необходимое количество судов	14,25	7,71	4,35	2,45	6,0
Суммарные капиталовложения, тыс. руб.	33 600	32 400	33 600	40 100	32 200
Средняя стоимость судна, тыс. руб.*	2370	4200	7720	16 300	5360

* При определении стоимости постройки судна учитывалось влияние неравномерности

ными затратами менее чем на 1%. Расходы по эксплуатации оказываются минимальными, если грузоподъемность судов принята равной примерно 7000 т.

Таким образом, грузоподъемность металловозов, обеспечивающая минимальные суммарные капиталовложения и эксплуатационные расходы, оказывается почти одинаковой. С учетом паритетности груза и капитальных затрат на береговые хранилища грузоподъемность судна должна быть скорректирована окончательно.

Выбор скорости хода газовоза определяется экономичностью его эксплуатации. Технико-экономические расчеты по газовозам показали, что их оптимальные скорости в зависимости от грузоподъемности и дальности плавания лежат в пределах 15—18 узл. для судов, перевозящих сжиженный пропан, бутан и аммиак и имеющих грузоподъемность более 2000 т, и 17—20 узл. — для металловозов грузоподъемностью более 10 000 т.

В сравнении с танкерами их оптимальная по себестоимости скорости выше на 2—3 узла. Сдвиг оптимальных скоростей у газовозов в сторону более высоких значений объясняется в первую очередь тем, что доля стоимости топлива в эксплуатационных расходах у газовозов меньше, чем у танкеров, из-за высоких амортизационных отчислений (стоимость газовозов в 1,5—2,0 раза выше, чем стоимость танкеров равной грузоподъемности). Зависимость себестоимости перевозки 1 т сжиженного метана от скорости хода показана на рис. 150.

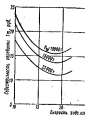


Рис. 150. Изменение себестоимости транспортировки метана 1 т метана в зависимости от дальности плавания и грузоподъемности судна.

Принятые сокращения

BuWB — BuW Bladet;
 BATMA — Bulletin de l'Association
 Technique Maritime et
 Aéronautique;
 BTBV — Bulletin Technique du
 Bureau Veritas;
 CAM — Correspondent Air Magazine;
 DTT — Dansk Teknik Tidsskrift;
 DHA — Dock and Harbour Au-
 thorities;
 ESh — European Shipbuilding;
 F — Fairplay;
 G — Gas;
 GA — Gas Age;
 H — Harze;
 HPPR — Hydrocarbon Process and
 Petrol Refining;
 HSh — Holland Shipbuilding;
 IMDME — International Marine De-
 sign and Equipment;
 ISBP — International Shipbuilding
 Progress;
 JapShoS — Japan Shipping and Ship-
 building;
 JindG — Journal Industrial Gas;
 JIM — Journal of the Institute of
 Metals;
 JMA — Journal de la Marine Mar-
 chande;
 ME/Log — Marine Engineering/Log;
 MENA — Marine Engineer and Na-
 val Architect;
 MJ — La Marina Italiana;
 Mnk — Maskinbeligt;

MSH — Motor Ship;
 NACH — Navires, ports et chan-
 niers;
 OoGInt — Oil and Gas International;
 Pinf — Petrole Information;
 Poon — Petroleum;
 RevM — Revue Maritime;
 RevMB — Revue Maritime Belge
 Wandelen;
 RevN — Revue Nautique;
 SShG — Scandinavian Shipping
 Gazette;
 Sch — Schiff und Hafen;
 Sch — Schiffbau-technik;
 SeW — Schip en Werf;
 ShoSAR — Shipbuilding and Shipping
 Record;
 ShWoSh — Shipping World and Ship-
 building;
 SSTid — Svensk Sjöfart Tidning;
 SpreSh — Ships and Shipping Illu-
 stration;
 TanD — Tanker Directory;
 TanT — Tanker Times;
 Tet — Trafik og Teknik;
 Tr — Transports;
 TRINA — Quarterly Transactions of
 the Royal Institution of
 Naval Architects;
 TSNAME — Transactions of the Society
 of Naval Architects and
 Marine Engineers;
 C — Contaque;
 ФК — Фундаментация.

Литература

1. Александров А. В., Судовые системы, Судостроение, 1962.
2. Анухин П. А., Войтунский Я. И., Сопровождение газа
 движением судов, Машин, 1953.
3. Базде Ф., Морское энергетическое хозяйство, Изд-во иностранной
 литературы, 1960.
4. Берг М. Н., Морские перевозки сжиженных газовых газов из стран
 Ближнего Востока в Японию, «Морской флот», № 4, 1963.
5. Берг М. Н., Судовые системы «Катан» и «Красная», «Технико-экономи-
 ческая информация ММФ СССР», № 20, 1965.
6. Боксерман Ю. Н., Газоснабжение народного хозяйства и техни-
 ческий прогресс, Гостотехиздат, 1961.
7. Борисов П. А., Рабкина А. Л., Газы — источник энергии
 и химического сырья, Изд-во АН СССР, 1959.
8. Борисов Г. Ф., Трутов Н. А., Хохлаев П. А., Углеводородные газы — сырьевые ресурсы нефтехимии, Гостотехиздат, 1960.
9. Войтунский Я. И., Перкин Р. Я., Титов Н. А., Сопро-
 вождение по теории морских, Судостроение, 1960.
10. Газовое оборудование, приборы и аппаратура (Справочное руководство),
 Гостотехиздат, 1963.
11. Гаслауэр Дж., Делессауль Дж., Четырехтактные двигатели,
 работающие на газе и жидком топливе, «Морское судостроение и флот», № 2,
 1962.
12. Генкин К. И., Газовые двигатели, Машин, 1962.
13. Давидов И. П., Калининский В. Л., Химическое высоко-
 давление из рубина, ЦИНИАН, М., 1964.
14. Долгополов К. В., Соколов А. В., Федоров Е. Ф.,
 Нефть и газы СССР, Углеуголь, 1960.
15. Зенков М., Газовые двигатели сжиженных газов, «Морской
 флот», № 10, 1958.
16. Исаков Н. М., Посланский Д. А., Передача сжиженного
 газа на судах, «Промышленно-техническая сборная, ТУ ММФ РСФСР, № 4,
 1961.
17. Каминский А. П., Сжиженные углеводородные газы, Гостотех-
 издат, М., 1962.
18. Крайнев Н. Б., Суды для перевозки сжиженных газов, «Судостро-
 ение», № 12, 1958.
19. Козин В. Ф., Применение сжиженного газа для судовых двигателей
 в Каспийском пароходстве, «Общество, технико-экономической информации,
 ТУ ММФ СССР, № 3, 1961.
20. Кулашин Е., Колыба Н., Переоборудование танкеров типа
 «Казбек» под перевозку жидкого аммиака, «Морской флот», № 3, 1962.
21. Ланген В. А., Основы проектирования морских танкерных судов,
 ч. 1, ОГНЗ — Гострансфлот, 1932.
22. Логачев С. И., Суды для перевозки сжиженного газа, «Морской
 флот», № 12, 1964.
23. Логачев С. И., Суды для перевозки сжиженными нефтяными газами,
 «Судостроение», № 9, 1965.
24. Логачев С. И., Определение грузоподъемности судов «Экспресс»,
 Труды ЦНИИМФ, вып. 67, Изд-во «Трансфлот», Л., 1965.
25. Логачев С. И., Николаев М. М., Ивченко А. П., Вопросы
 проектирования судов для перевозки сжиженных газов, «Судостроение», № 8,
 1965.

26. Малахов М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадкин А. В., Справочник по физико-химическим свойствам сжиженных газов, Госгостехиздат, 1963.

27. Морские суда для перевозки сжиженных газов, «Библиотека технико-экономической информации», ТУ ММФ СССР, № 9, 1969.

28. Ногда Л. М., Проектирование морских судов, Изд-во «Судостроение», 1964.

29. Норвежский Веритас, Правила постройки и классификации стальных судов, 1962, Изд-во «Транспорт», 1964.

30. Попов А. А., Транспортные средства сжиженных газов на судах, «Библиотека технико-экономической информации», ТУ ММФ СССР, № 10, 1969.

31. Попов С. С., Транспорт нефти, нефтепродуктов и газа, Гостехиздат, 1963.

32. Пастухов В. И., Сазов Г. Н., Опыт эксплуатации портового верса ПШР 190/50 на танкере, «Промышленно-технологический сборник», ТУ ММФ ДОСР, № 2, 1968.

33. Преображенский Н. И., Эксплуатация установок сжиженного газа, Гостехиздат, 1964.

34. Регистр Судовостроения Дании, Правила постройки и классификации стальных судов, 1963, Изд-во «Транспорт», 1964.

35. Риббейн Н. И., Естественные и искусственные газы, Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1960.

36. Савельев В. К., Сравнительно-экономическая эффективность транспорта топлива и передачи электроэнергии, Изд-во АН СССР, 1963.

37. Сидоренко М. В., Газовая промышленность Европы, Гостехиздат, 1962.

38. Смышляева Л. М., Развитие газовой промышленности и экономическая эффективность капитальных вложений, Изд-во АН СССР, 1961.

39. Стаховский Н. А., Майбаев С. Б., Вигдорчик Д. Я., Справочник по сжиженным углеводородным газам, Изд-во «Недра», 1964.

40. Технико-экономические проблемы транспорта сжиженного метана на танкерах, «Общая промышленность», № 2, 1962.

41. Голоцкий Е. С., Исследования влияния главнейших элементов надстройки судов на их грузоподъемность, Сб. «Теория и практика судостроения», т. I, 1957, т. II, 1958, т. III, 1960.

42. Фурман Н. Я., Экономическая эффективность использования природного газа как промышленного топлива, Гостехиздат, 1961.

43. Черныш А. В., Нефтегаз и газовая промышленность СССР, Изд-во «Высшая школа», 1964.

44. Абрахамсен Е., Состояние суда для перевозки сжиженных газов с точки зрения классификационных обществ, ESH, т. 9, № 4, 1960.

45. Абрахамсен Е., Транспортировка газа и классификация судов, ESH, т. 12, № 2, 1963.

46. Абрахамсен Е., Перевозка сжиженных жидких грузов (сжиженных газов), ESH, т. 13, № 6, 1964.

47. Абрахамсен Е., Правила постройки судов для перевозки сжиженных газов, SSTJd, т. 58, № 2, 1963.

48. Абрахамсен Е., Перевозка сжиженных газов на морских судах, ESH, т. 13, № 6, 1964; т. 14, № 1—2, 1965.

49. Алленштейн Л., Перевозка морем сжиженных газов. Некоторые технические и экономические проблемы, BATMA, т. 62, 1962.

50. Алленштейн Л., Перевозка морем сжиженных нефтяных газов, RevM, № 197, 1963.

51. Алленштейн Л., Судно «Пифагор» для перевозки металла и этилена, RevM, № 278, 1968.

52. Amlairic P., Технико-экономические обоснования судов для перевозки сжиженных газов, CAM, т. 68, № 11, 1963.

53. Attoma P., Рассмотрение принципов, касающихся судов-метанокозов, BTBV, т. 45, № 3, 1963.

54. Bauer A. E., Транспорт сжиженного метана из судов, SeW, № 3, 1964.

55. Bengtsson B., Эксплуатация судов для перевозки сжиженных газов, Msh, т. 72, № 5, 1962.

56. Bengtsson B., Цистерны из судов для перевозки сжиженного газа, остающиеся после сдачи с жидкостью, MENA, т. 36, № 1043, 1963.

57. Breglia R., Перевозка металла морем, Salm, т. 33, № 10, 1962.

58. Brulex M., Заметки о морской перевозке сжиженного природного газа, IUDUE, 1963.

59. Brulex M., Эксплуатационно-технические требования к судам для сжиженных газов, IUDUE, 1964.

60. Burney S. C. D., Leathard I. F., Перевозка сжиженного метана, Amer. nat. kl. 8(2), 113 (F25), № 505991 от 03. 07. 1963.

61. Burns I., Clark L. C., Океанская транспортировка жидкого метана, SeWash, т. 126, № 8291, 1965.

62. Barton D., Перевозка сжиженных газов морем, ShashR, т. 101, № 8, 1963.

63. Christopher P., Burrell, Изучение опыта эксплуатации судов, транспортирующих сжиженный газ под давлением, BATMA, т. 63, 1963.

64. Corrack C. P., Какое будущее морской транспортировке метана, MSH, т. 43, № 538, 1965.

65. Corrack C. P., Перевозка сжиженного природного газа морем, Общая металл, TmD, 1964.

66. Corlett E. C. B., Leathard I. F., Транспортировка метана морем, TRINA, т. 102, № 3, 1960.

67. Davies J. B., Перевозка сжиженных газов на судах, HSH, т. 12, № 9 и 10, 1963.

68. Delave T. J., Подводные газопроводы для танкеров, RevM, № 173, 1961.

69. Delave T. J., Первый французский метаноков «Jules Verne», RevM, № 272, 1964.

70. Dolcini E., Замечания относительно проектирования судов для перевозки сжиженных нефтяных и природных газов, MI, т. 62, № 12, 1964.

71. Delbene G., Транспортировка сжиженных газов кой охлаждением, MI, т. 60, № 78, 1962.

72. Ducloux K. H., Меры по безопасности при перевозке жидкого газа на танкерах, H, т. 101, № 12, 1964.

73. Ferguson W., Адекватные цистерны для морской транспортировки природного газа, TmT, т. 7, № 3, 1960.

74. Filstead C. G., Хранение и перевозка природного газа, GA, т. 128, № 12, 1961.

75. Filstead C. G., Banister M., Транспортировка газа при низкой температуре, TSNAME, т. 69, 1961.

76. Galleis J., Delecallet L., Применение металла в качестве топлива для двигателей судовых двигателей, *BATMA*, т. 64, 1964.
77. Goryl W. M., Howard F. A., Транспортировка нефтепродуктов и сжиженных газов над водой, патент США, кл. 114-16, № 3085333 от 16. 04. 1963 г.
78. Grilliat M., Французский патент «Jules Verne», *BATMA*, т. 64, 1964.
79. Grover A. C., Суда для перевозки сжиженных газов, *TaT*, т. 9, № 8, 1962.
80. Haines, Перевозка сжиженными газом моря, *P*, т. 206, № 4142, 1963.
81. Hardy A. C., Сжиженные нефтяные газы, *SSHG*, т. 45, № 1, 1961.
82. Haulteacille R., Эксплуатация морских перевозок сжиженных газов, *JRM*, т. 45, № 2277, 1963.
83. Henry J. I., Танкер для перевозки сжиженных газов, патент США, кл. 114-74, № 3085338 от 16. 04. 1963 г.
84. Jacques J., Судно-газовик, *H*, № 6, 1965.
85. Jacques L., Суда для перевозки сжиженного газа, *Pinf*, № 351, 1963.
86. Jacques L., Эксплуатация судов для перевозки сжиженного газа, *Pinf*, № 347, 1963.
87. Jakov F., Вопросы безопасности в связи с морскими перевозками сжиженных газов, *H*, т. 190, № 6, 1963.
88. Kaidager M., Изучение топлива на судах для перевозки сжиженных газов, *ESB*, № 5, 1964.
89. Kinnig W., Will K., Kern H., Двигатель, работающий на двух видах топлива, или комбинированный двигатель судов, перевозящих сжиженный газ, *NSL*, т. 44, № 517, 1963.
90. Kraus G., Neukircher O., Веса и габариты движущихся устройств морских судов, *Sci*, т. 14, № 4, 1964.
91. Lanchi H., Транспортировка сжиженного газа на судах с толкой арены берегового хозяйства, *H*, № 5051, 1960.
92. Ledermann P. B., Williams V., Будет ли открыться сжиженные природные газы? *Petrof. Ref.*, т. 36, № 8, 1959.
93. Leroux R., Применение металлохимических цистерн для перевозки сжиженных газов, *BATMA*, т. 62, 1962.
94. Lindblad A., Проектирование обводов тентовых судов, *Globeborg*, 1961.
95. Lischer R. E., Свойства некоторых металлов и сплавов при высоких температурах, *JIM*, т. 89, № 1, 1960.
96. Lorentzen H. L., Lorentzen O., Bengtsson B., Выгрузка сжиженных сжиженных нефтяных газов, *ME/Log*, № 8, 1961.
97. Macduff T., Определение минимальной устойчивости судов в начальных стадиях проектирования, *ShW&Sh*, т. 151, № 3708, 1964.
98. Magliano D., Конструкция судна для перевозки сжиженных газов при атмосферном давлении, патент США, кл. 114-74, № 3083608 от 02. 04. 1963 г.
99. McMullen L. I., Технологические и экономические аспекты перевозки транспортировки через канал жидкого металла, *ISMP*, т. 7, № 75, 1960.
100. Meeson H., Проект судна для перевозки сжиженного металла, разработанный фирмой Кларк Ховардсберн, *ShW&Sh*, т. 98, № 28, 1961.
101. Meeson E. S., Поперечный контрфорсный настил для резервуаров со сжиженными газом, патент США, кл. 222-333, № 3093369 от 11. 06. 1963 г.

102. Monroe W. S., Crockett I. W., Armstrong T. N., Суда для жидкотопливных двигателей, предназначенных для хранения сжиженного газа, *TSSAME*, т. 67, 1959.
103. Payford P., Транспорт морем сжиженного газа, *RevN*, № 247, 1962.
104. Payford P., Новый тип цистерн для перевозки металла на танкеры, *RevN*, № 253, 1962.
105. Payford P., Транспорт природного газа, *RevN*, № 260, 1963.
106. Peisinger R. E., Применение стали с 5% никеля для резервуаров с жидким металлом, *G*, т. 40, № 10, 1964.
107. Pitard L., Транспорт жидкого металла, *O&GInt*, № 3, 1965.
108. Rougeton C., Прогресс в области постройки судов для перевозки газа, *JRM*, т. 41, № 3363, 1959.
109. Rutland P., Суда для перевозки жидкого металла, *New Scientist*, т. 12, № 262, 1961.
110. Salmkoff W., Морские перевозки сжиженного газа, *H*, т. 97, № 3431, 1960.
111. Schierack H., Опытные установки на судах-газовиках, *H*, т. 100, № 22, 1963.
112. Solingen I. W., Транспортировка природного газа, *ISHP*, т. 12, № 125, 1965.
113. Stettin E., Погрузка и выгрузка сжиженного газа, *Diesel and Gas Engine Program*, т. 28, № 3, 1963.
114. Stich K. H., Судно «Штадт» длиной 40 м для перевозки пропан-бутана в Матковском проливе, *H*, т. 98, № 16, 1961.
115. Talbot L., Перевозка сжиженных нефтяных газов морем, *ShW&Sh*, т. 104, № 24, 1961.
116. Thomsen D. R., Heath D. J., Аспекты сварки стали с 9% никеля, *ISHP*, т. 11, № 114, 1964.
117. USCom Guard, Правила для плавучих судов, Washington, 1960.
118. Vaughan H. E., Осуществление проекта использования сжиженного природного газа, *ISHP*, т. 44, № 3, 1965.
119. Verret P., Соединение металла и межсоставительных соединений природного газа, *Revue Française de l'Énergie*, III, IV, 1960.
120. Verret P., Водные перевозки сжиженных газов, *J. Ind. G.*, т. 89, № 2, 1965.
121. Verret P., Судно «Jules Verne» для перевозки сжиженных газов, *Tr.*, т. 9, № 93, 1964.
122. Volger M., Морские перевозки сжиженных природных газов, *H*, т. 97, № 2322, 1960.
123. Volger M., Морской транспорт сжиженных газов при высоких температурах, *H*, т. 99, № 22, 1962.
124. Watson P. B., Оборудование для газовиков, *IND&E*, 1965.
125. Windkind, Морские перевозки природного газа, *RevSB*, т. 36, № 234, 1959.
126. Wustera D., Морской транспорт сжиженного газа, *Europe and Technik*, 14/VI, 1962.
127. Wustera D., Stahmann H., Wiesner W., Танкер для перевозки сжиженного газа «Elmo Centro America», *SoH*, т. 14, № 11, 1962.
128. Газовый «Аргон», *NPCh*, т. 14, № 155, 1963.
129. Газовый «Bridgstone Maru», *TaT*, т. 8, № 12, 1962.
130. Газовый «Bridgstone Maru» № 2, *JapShW&Sh*, т. 9, № 10, 1965.

131. Газовое «Bulago», ShWuSh, т. 134, № 3265, 1964.
132. Газовое «Vicio», MSh, т. 44, № 519, 1963.
133. Газовое «Galileo», MSh, т. 43, № 511, 1963.
134. Газовое «Gaston Ricard», MSh, т. 45, № 525, 1964.
135. Газовое «Ducario», TanT, т. 2, № 2, 1964.
136. Газовое «Cap Carbon», JMM, т. 38, № 1506, 1956.
137. Газовое «Cap Crie Nera», MSh, т. 43, № 512, 1963.
138. Газовое «Lili Thelstrup», OsGist, т. 3, № 8, 1962.
139. Газовое «L. P. Hara No 1», C, т. 33, № 4, 1960.
140. Газовое «L. P. Hara No 2», ФК, т. 14, № 6, 1961.
141. Газовое «Morlan P. Billaro», ME/Log, т. 62, № 5, 1957.
142. Газовое «Mardagos Beaulin», MSh, т. 42, № 493, 1961.
143. Газовое «Noodonta», MSh, т. 45, № 509, 1963.
144. Газовое «Paul Enfoicollis», SeW, т. 31, № 19, 1964.
145. Газовое «Petrobras Luter», MSh, т. 40, № 471, 1959.
146. Газовое «Petrobras Maris», H, № 1/3, 1964.
147. Газовое «Petrobras Oeste», ФК, т. 16, № 3, 1963.
148. Газовое «Propane Hara No 1», ФК, т. 14, № 1, 1961.
149. Газовое «Ramos Thelstrup», BTBV, т. 37, № 2, 1955.
150. Газовое «Signe Thelstrup», ShashR, т. 91, № 6, 1958.
151. Газовое «Toto Maris», C, т. 34, № 2, 1961.
152. Газовое «William R. Graces», HSh, т. 13, № 6, 1964.
153. Газовое «Albania», NPCh, № 178, 1965.
154. Газовое «Fred H. Billaro», HSh, т. 9, № 2, 1960.
155. Газовое «Chico Hara No 2», JapShSh, т. 9, № 10, 1965.
156. Газовое «Aldridge Quanta», MJ, т. 61, № 3, 1963.
157. Импарт Нисомей сжиженного газа, JapShSh, т. 9, № 8, 1964.
158. Игиро Я., Постройка специальных судов-газовозов, C, т. 35, № 9, 1962.
159. Конструкция судов для перевозки сжиженного газа, Франц. патент, кл. В 63b, F25j, № 78499 от 18.06.1962 г.
160. Конструкция судов для перевозки газов при низкой температуре, Франц. патент, кл. В 63b, F25j, № 1307297 от 11.09.1964 г.
161. Контроль и процесс тары контейнеров в резервуарах для хранения сжиженных газов, Revue Aluminé, т. 39, № 304, 1963.
162. Маскавядоу Ф., Танкеры для перевозки охлажденных сжиженных газов, Нитро Кэпкан, т. 43, № 435, 1963.
163. Метановое «Methane Process», MSh, т. 45, № 533, 1964.
164. Морские перевозки жидкого газа, ФК, т. 11, № 9, 1958.
165. Насосы для сжиженных газов, TanT, т. 9, № 6, 1962.
166. Обслуживание судов для перевозки метана в период их регулярной проверки, TanT, т. 11, № 8, 1964.
167. Перевозка газов и жидкостей на судах, F, № 4342, № 4243, 1964.
168. Перевозка жидкого метана, Syntex Sl, т. 254, № 3316, 1960.
169. Плавучие емкости для сжиженных газов, Франц. патент, кл. B63b, F55j, № 31145 от 18.05.1961 г.
170. Правила прохода Панамского канала судами, перевозящими сжиженный газ, TanT, 1964.
171. Проблемы перевозки морем жидкого газа, Рос, т. 18, № 1—2, 1963.

172. Проект танкера для перевозки сжиженным газом, Норвежский патент, кл. 63, а 15 № 100663 от 4.06.1962 г.
173. Проекты газовозов, разработанные компаниями Moss Werft ved Дюнк, Норвегия, MSh, т. 46, № 540, 1965.
174. Прямоугольные цистерны из нержавеющей стали «Pythagore», RevN, № 266, 1964.
175. Специальные насосы для разгрузки сжиженных газов, MSh, т. 45, № 535, 1965.
176. Специальный тарный металлический цистерны, TanT, т. 9, № 12, 1963.
177. Специальные суда для транспортировки сжиженного газа, NPCh, № 182, 1965.
178. Суды для перевозки сжиженного метана, Plaf, № 359, 1963.
179. Суды для перевозки сжиженных газов, OsGist, т. 14, № 48, 1964.
180. Суды для перевозки сжиженных газов, SSTid, т. 57, № 11, 1962.
181. Суды для перевозки сжиженных газов, SSTid, № 44, 1964.
182. Суды для перевозки нефти и газа «Galebo Maris», JapShSh, т. 6, № 8, 1961.
183. Суды для перевозки нефти и газа «Nisoki Maris», JapShSh, т. 6, № 12, 1962.
184. Суды для перевозки нефти и газа «Toyon Maris», JapShSh, т. 8, № 9, 1963.
185. Суды для перевозки нефти и газа «Elmo Puerto Rico», SeH, т. 10, № 8, 1958.
186. Суды для перевозки нефти и газа «Ene el Salvador», ShWuSh, т. 134, № 3265, 1964.
187. Технические требования и характеристики судов для перевозки метана, Aluminé, т. 33, № 8, 1963.
188. Топы газовозов, разработанные фирмой Гиннеркел, SSTid, т. 59, № 14, 1963.
189. Технические системы из нержавеющей стали, установка которых приспособлена к работе на нефтяных и газовых танкерах, ME/Log, т. 70, № 5, 1965.
190. Транспортировка жидкого кислорода, Enginert, т. 215, № 5585, 1963.
191. Транспортировка сжиженного природного газа морем, DHA, т. 45, № 530, 1964.
192. Универсальные суда, приспособленные для перевозки сжиженных газов, Франц. патент, кл. B63b, F25j, № 79089 от 1.02.1961.
193. Холодильная установка на судах для перевозки сжиженного газа, SABROE News, № 53, 1962.
194. Цистерны для метановозов, NPCh, № 182, 1963.
195. Экспериментальное судно-метановоз «Methane Process», BTBV, т. 45, № 3, 1963.
196. Экспериментальное судно-метановоз «Methane Process» ME/Log, т. 60, № 9, 1963.

Оглавление

От авторов	3
Введение	5

Глава I. Развитие перевозок сжиженных газов

§ 1. Краткий очерк истории развития газовозов и их классификация	11
§ 2. Перевозка сжиженных газов морем	21

Глава II. Общие вопросы проектирования газовозов

§ 3. Физико-химические свойства газов	28
§ 4. Выбор способа транспортировки газа	30
§ 5. Выбор типа цистерн	41
§ 6. Главные размеры и коэффициенты полезности	53
§ 7. Грузовместимость. Емкость балластных цистерн	64
§ 8. Виссовая нагрузка	82
§ 9. Особливость	91
§ 10. Обеспечение пожарной и взрывобезопасности	99

Глава III. Особенности судов, перевозящих сжиженные газы в цистернах под давлением

§ 11. Конструкция корпуса	102
§ 12. Грузовые цистерны. Расчет на прочность	107
§ 13. Материал цистерн и их изоляция	112

§ 14. Арматура цистерн и контрольно-измерительные приборы	113
§ 15. Грузовые системы	116
§ 16. Тапканые газомом с дисковыми выходящими клапанами	121

Глава IV. Особенности судов, перевозящих охлажденные нефтяные газы при температуре кипения

§ 17. Конструкция корпуса	153
§ 18. Цистерны. Материалы для изготовления. Изоляция	154
§ 19. Грузовые системы. Использование испаряющегося газа	156
§ 20. Суда, перевозящие сжиженные нефтяные газы при температуре кипения	161

Глава V. Особенности судов, перевозящих сжиженный метан

§ 21. Конструкция корпуса	174
§ 22. Определение размеров и расчет прочности цистерн	177
§ 23. Материал цистерн и их изоляция	196
§ 24. Системы	204
§ 25. Использование испаряющегося метана	211
§ 26. Суда для перевозки сжиженного метана	219

Глава VI. Вопросы экономии перевозок газа на судах

§ 27. Экономическая эффективность газовозов	226
§ 28. Выбор оптимальной грузоподъемности и скорости хода	245

Литература 250

Показано, формула (89) на стр. 107 следует читать так: $p = p_0 + 2p_1$.

Рис. 118 и 119 - НЕПЕРЕЧИСЛЕННЫЕ
(а не перечисленные)

ЛОГАНЕВ СТАНИСЛАВ ИВАНОВИЧ,
НИКОЛАЕВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ
СУДА ДЛЯ ПЕРВОЙ
СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ
Томск 1995 г. № 12

Редакционн: проф. д. т. н.
В. В. Лавин;
и. н. Е. Г. Фрид
Научный редактор В. Г. Логанович
Редактор Г. П. Лавин
Технический редактор
А. Н. Киселевич
Корректор М. А. Ежович
Оформление переклада художника
В. С. Соловьев

Сдано в набор 07/1995 г. М-1050.
Подписано к печати 20/VI 1995 г.
Формат бумаги 60 x 90/16.
Печать литографическая № 2.
Пол. 2, 862 (включая вкладки).
Заказ. № 103.
Изм. № 1054-45. Тираж 1200 экз.
Цена 57 к. Заказ № 1022.

Подготовлено «Сударовичи»
Ленинград, Д-60, ул. Гоголя, 8

Литографическая литография № 6
Литографическая Комитет на печать
при Совете Министров СССР
Ленинград, ул. Мясницкая, 10

ЗАМЕЧАНИЕ ОБ ОБЪЕМЕ

Стр.	Наименование	Средняя стоимость
107	$p = p_0 + 2p - p_0$	$p = p_0 + 2p_0$

С. Н. Логанов, М. Н. Николаев. Зам. 107.

