

УДК 629.5.03-08:621.431.36

В.М. ГОРБОВ, В.С. МИТЕНКОВА*Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, Николаев, Украина*

ОСОБЕННОСТИ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ

Рассмотрены преимущества и недостатки, особенности приема на борт, хранения и подготовки сжиженного природного газа перед подачей в двигатель, приведена структурная схема топливной системы судовой энергетической установки. Проанализированы возможные варианты комплектации топливных систем и краткие характеристики основного оборудования: приемные криогенные трубопроводы, цистерны хранения сжиженного природного газа на судне, теплообменные аппараты для испарения и подогрева топлива и прочие элементы, которые могут включаться в схему. Представлены общие подходы к разработке математической модели топливных систем судовых энергетических установок при использовании сжиженного природного газа.

судовые энергетические установки, сжиженный природный газ, топливная система, криогенные цистерны, испарители-газификаторы, структурная схема, математическая модель

Введение

Тенденция замещения нефти природным газом в структуре мирового энергопотребления не обошла стороной и сектор судовой энергетики. Это обуславливается рядом причин: неуклонное повышение мировых цен на нефть, значительные прогнозируемые запасы природного газа, ужесточение экологических требований к судовым энергетическим установкам (СЭУ). Использование природного газа (ПГ) в СЭУ позволит судовладельцам снизить зависимость от традиционно применяемых нефтяных топлив.

Анализ публикаций свидетельствует об актуальности вопроса внедрения природного газа на судах. Это связано со значительным ужесточением требований относительно выбросов СЭУ. Правила конвенции MARPOL, Евросоюза, а также локальные государственные акты значительно ограничивают эмиссию оксидов азота и серы. Сегодня ПГ в качестве топлива используют на газозазах, паромех, судах обслуживания и судах хранения и выгрузки для обслуживания газодобывающих платформ, пассажирских судах [1, 2]. MAN DIESEL, Wartsila и другие двигателестроительные компании выпустили на рынок модели газодизельных двигателей в мор-

ском исполнении [3]. Имеющиеся публикации относительно судовой энергетики преимущественно посвящены организации рабочих процессов двигателей либо вопросам использования испарившегося в течение рейса ПГ на газозазах [4, 5].

Целью исследований является анализ особенностей использования природного газа в качестве топлива на судах, разработка структурной схемы, возможных вариантов комплектации топливных систем СЭУ и общих подходов к разработке математической модели топливной системы сжиженного природного газа (СПГ).

1. Общие положения

ПГ можно использовать в сжатом (компримированном) и сжиженном состоянии. На судах преимущественно используют СПГ, что связано с требованиями к пожаробезопасности и с ограничением объема и массы топливных емкостей. Есть опыт эксплуатации судов и на компримированном природном газе (КПГ) под давлением 20 – 25 МПа. Для КПГ на судне при той же суммарной энергоэффективности требуется в 5 раз больше объема, чем для дизельного топлива (ДТ), а для СПГ – только в 2.

Масса топливных цистерн с топливом в 1,5 раза больше для СПГ, чем для ДТ, а для КПП – в 4 раза. При хранении СПГ под давлением уменьшается объем, но увеличивается масса топливных запасов и емкостей, поэтому рациональнее использовать на судах природный газ в сжиженном состоянии.

ПГ в качестве моторного топлива имеет следующие преимущества:

- стоимость природного газа значительно ниже стоимости эквивалентного по теплотворной способности количества нефтяного моторного топлива;

- использование природного газа позволяет уменьшить на 90 – 95% эмиссию NO_x , на 20 – 25% CO_2 , почти не образуются SO_x , твердые частицы и сажа;

- уменьшается абразивный износ топливной аппаратуры.

К недостаткам ПГ можно отнести:

- необходимость поддерживать низкую температуру либо высокое давление в топливных емкостях;

- повышение тепловых нагрузок и снижение надежности двигателя;

- большее по сравнению с жидкими топливами значение коэффициента избытка воздуха.

Природный газ можно использовать в газодизельных двигателях, работающих на жидком нефтяном топливе и ПГ, и в газопоршневых, потребляющих исключительно газообразное топливо. На судах согласно требованиям классификационных обществ устанавливаются газодизельные двигатели, которые могут работать на ПГ, ДТ и даже тяжелых топливах. Это связано с необходимостью обеспечить безопасность и автономность плавсредств.

2. Топливные системы СПГ СЭУ

Заправка судна СПГ может осуществляться со специализированных береговых или плавучих заправочных комплексов. Береговые причалы для подачи СПГ включают изолированные цистерны хранения газа, который поступает из портового

завода по сжижению ПГ, трубопроводы и насосы подачи топлива. Проектом обустройства причала должна быть предусмотрена защита системы распределения топлива от удара молнии, статического электричества и электромагнитной индукции, возможность приема сигнала с судна для отсечки заправки и автоматического отсоединения от патрубка с СПГ или от системы распределения топлива. Заправку судов СПГ можно осуществлять при помощи плавучих заправочных комплексов – специальных транспортных судов (барж), на которых располагаются цистерны СПГ, подача топлива осуществляется при помощи специальных криогенных насосов по изолированным трубопроводам. В комплекс для осуществления бункеровки входят: терминалы СПГ, грузовики для транспортировки топлива, суда-заправщики, наземные криогенные резервуары.

Приемные станции бункеровки располагаются по одному или обоим бортам судна. На приемном оборудовании должен быть установлен узел пробоотбора для подключения пробоотборных устройств и устройств контроля качества продукта. Периодичность бункеровки зависит от дальности плавания судна, количества и продолжительности стоянок.

Топливные танки с СПГ можно располагать вертикально в стальных коробах в надстройке судна, горизонтально в машинном отделении одноярусно (в одной плоскости с двигателями) и двухъярусно (на специальной платформе над двигателями), при небольшом объеме цистерн – непосредственно над двигателем вертикально в стальном коробе.

Требования к расположению топливных цистерн СПГ на судне: расстояние от борта судна – не менее $V/5$; от дна – $V/15$, но не менее 2 м, где V – ширина судна.

На сегодняшний день информация относительно схем судовых топливных систем СПГ ограничена, в то же время приводится много схемных решений топливных систем автомобильного транспорта, стационарных хранилищ СПГ. На рис. 1 представ-

лена структурная схема топливной системы СПГ, которая может применяться в СЭУ.

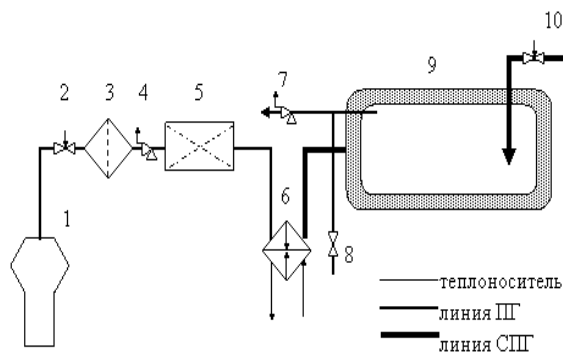


Рис. 1. Структурная схема топливной системы при работе двигателя на СПГ:

- 1 – двигатель; 2 – регулятор подачи газа,
- 3 – топливный фильтр; 4 – отсечной клапан;
- 5 – буферная цистерна; 6 – испаритель;
- 7 – сбросный клапан (сброс газа);
- 8 – регулирующий клапан;
- 9 – цистерна хранения СПГ;
- 10 – проходной клапан

К основным элементам топливной системы СПГ СЭУ можно отнести: приемные трубопроводы, цистерны хранения СПГ, теплообменники для испарения и подогрева топлива (испарители), также обязательно наличие топливных фильтров, отсечных клапанов, могут включаться криогенные насосы (необязательный элемент), буферные цистерны для кратковременного хранения ПГ перед подачей в двигатель и редукционные клапаны для понижения давление сжиженного газа после цистерны перед подачей в испаритель (устанавливаются, если давление в цистерне выше атмосферного).

Криогенные трубопроводы предназначены для транспортировки жидких криогенных продуктов с минимальными теплопритоками от окружающей среды. Представляют собой двустенные трубопроводы с экранно-вакуумной изоляцией. Секции криогенных трубопроводов соединяются между собой при помощи сварных соединений. Системы трубопроводов могут комплектоваться следующими элементами: криогенными трубами; элементами компенсации; соединительными элементами; адсорбци-

онными секциями; вакуумными портами для под-соединения; средствами вакуумирования и контроля вакуума; опорами, мембранными защитными устройствами и устройствами защитного заземления.

Есть несколько способов хранения СПГ: изотермический – хранение при постоянной температуре, обеспечивающей избыточное давление насыщенных паров, близкое к атмосферному, полуизотермический – хранение СПГ в резервуарах при постоянной температуре и давлении насыщенных паров выше-атмосферного. Для комплексов СПГ максимальная технологически обоснованная величина давления полуизотермического способа хранения составляет 1,2 МПа.

СПГ на судне хранится в надежно защищенных цистернах (танках), представляющих собой обычно цилиндр с закругленными концами. Цилиндрическая форма танка обеспечивает рациональное соотношение массы, объема и стоимости. Оптимальной является, конечно, сферическая форма, но такие цистерны очень трудоемки в изготовлении. Чтобы обеспечить максимально возможный объем при минимальном теплопритоке соотношение диаметр/длина цистерны должно быть как можно больше, т.е. необходимо обеспечить минимальную площадь поверхности при данном объеме.

Цистерны СПГ состоят из двух камер – внутренней и наружной, между которыми поддерживается глубокий вакуум для изоляции сжиженного газа, хранящегося обычно при температуре -162 °С. Давление в вакуумной полости порядка $10^{-1} - 10^{-2}$ Па. Вакуумная изоляция выполняется таким образом, чтобы обеспечить надежный вакуум в пространстве между цистернами. Обычно внутренний корпус изготавливают из нержавеющей аустенитных сталей, никелевых сталей или композитных материалов. Внешний корпус изготавливают из углеродистых или низкоуглеродистых сталей в соответствии со стандартами. Трубопроводы внутри и снаружи цистерны выполняют из нержавеющей стали. Дрос-

сельные клапаны во внутреннем корпусе цистерны минимизируют колебания СПГ во время движения транспортного средства, на борту которого установлены топливные танки.

Цистерна СПГ не должна заполняться полностью, т.к. необходимо пространство для паров жидкости. Коэффициент заполнения танков 0,88 – 0,95. Цистерны могут быть по конструкции горизонтальными и вертикальными.

Преимуществом горизонтальных резервуаров является тот факт, что при одинаковом объеме у них площадь зеркала жидкости больше (больше площадь – интенсивнее происходит процесс испарения), чем у вертикальных, и потому они более производительны.

Для обеспечения минимальных энергетических потенциалов взрывопожароопасности предпочтение должно отдаваться варианту хранения с наименьшим избыточным давлением.

Перед подачей топлива в двигатель газ необходимо регазифицировать, т.е. испарить, затем подогреть. Для испарения (газификации) СПГ могут применяться испарители:

- атмосферные с подогревателями для обеспечения необходимой температуры на выходе с использованием тепла окружающей среды для дальнейшего подогрева газа до нужной температуры перед подачей в двигатель после испарителя устанавливается подогреватель;
- использующие теплоту отходящих газов двигателя;
- с обогревом горячей водой, паром и другими теплоносителями, включая незамерзающие;
- электрические.

Для предотвращения замерзания теплоносителя в испарителе он начинает циркулировать раньше или одновременно с поступлением СПГ. При снижении удельного расхода топлива на двигатель часть испаренного газа может подаваться в промежуточную (буферную) цистерну.

Наиболее приемлемым вариантом на судах для газификации СПГ является использование рекуперативных теплообменников. Испарение жидкой фазы ПГ должно происходить в трубах большого диаметра, т.к. объем может увеличиваться до 600 раз.

Газификация СПГ осуществляется в два этапа:

- испарение и перевод в газообразное состояние;
- подогрев газообразного топлива до необходимой температуры (порядка 293 К).

В этом случае можно установить два теплообменника: испаритель жидкой фазы и подогреватель газообразного топлива.

С учетом судовых условий целесообразно применять в качестве теплоносителя в испарителях и подогревателях СПГ воду из систем охлаждения двигателя.

Достигается двойной эффект: утилизируется низкопотенциальная тепловая энергия после систем охлаждения двигателей; охлажденную воду можно использовать в качестве хладагента в холодильных системах и системах кондиционирования на судне.

3. Математическая модель топливной системы сжиженного природного газа для судовой энергетической установки

Математическая модель топливной системы низкого давления СЭУ будет включать в себя уравнения, описывающие процессы приема, хранения и подготовки топлива в системе, а также уравнения для нахождения рациональных параметров основного оборудования топливных систем. Это даст возможность спроектировать систему с оптимальными параметрами для данного судна с исходными заданными характеристиками.

Разработка проекта топливной системы сжиженного природного газа должна включать следующие обязательные этапы:

- разработка принципиальной схемы системы;
- определение диаметра, типа и толщины изоляции приемных криогенных трубопроводов;
- подбор типа и основных параметров перекачивающего насоса;
- определение давления и температуры хранения сжиженного природного газа в цистерне, что позволит установить массу и объем топливных запасов;
- определение количество ПГ, которое испарится в процессе изохорного нагрева (величина расчетной испаряемости);
- выбор материала, типа и количества криогенных цистерн для хранения топлива, а также размеры их внутреннего и наружного корпусов (оптимизируемые величины, некоторые рекомендации по их выбору были представлены выше);
- определение толщины и типа изоляции топливных танков (также оптимизируемые параметры);
- выбор греющей среды и установление ее параметров на входе в испарители,
- выбор типа и количества теплообменников, необходимых для испарения и нагрева ПГ до требуемой для подачи в двигатель температуры, расчет поверхности нагрева;
- разработка мероприятий по возможности утилизации теплоносителя после теплообменника;
- расчет и подбор оборудования топливной системы СПГ (редукционные клапаны, топливные фильтры для сжиженного и газифицированного ПГ, буферные танки и т.д.), предусмотренного в схеме.

Заключение

Приведенные данные об организации бункеровки, хранения и подготовки топлива могут использо-

ваться как основа при разработке детальных рекомендаций для проектирования и обслуживания систем СЭУ СПГ.

Представленная в статье структурная схема может приниматься за основу при разработке топливных систем СЭУ для СПГ.

Приведенный (далеко не полный) перечень возможных вариантов размещения топливных цистерн, оборудования, возможности организации хранения и испарения сжиженного природного газа можно использовать для разработки топливных систем низкого давления.

Дальнейшие исследования по данной теме будут направлены на детальную разработку математической модели и методики расчета топливных систем СЭУ при использовании на судне СПГ.

Литература

1. Первое судно на газовом топливе // Судостроение. – 2003. – № 7/8. – С. 51.
2. LNG-fuelled vessels increase in popularity // Ship and Boat International. – 2007. – № 3. – Р. 22.
3. Dual fuel engines make mark on LNG // The Naval Architect. – 2007. – № 3. – Р. 15.
4. Мамедова М.Д. Работа дизеля на сжиженном газе. – М.: Машиностроение, 1980. – 149 с.
5. Придатыко А.А. Современные морские газовозы. Проблемы и некоторые решения // Двигательостроение. – 2005. – № 1. – С. 39-41.

Поступила в редакцию 15.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Г. Тимошевский, Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев.