

Е.В. Белоусов, В.П. Савчук, Т.П. Белоусова

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ПРОБЛЕМЕ СОЗДАНИЯ СУДОВЫХ МАЛОБОРОТНЫХ ГАЗОДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Отмечаемое последние годы повышение цен на нефтяное топливо и ужесточение экологических требований, заставили производителей судовых малооборотных двигателей сосредоточить свои усилия на разработке газодизельных двигателей на базе уже существующих моделей судовых дизелей. При этом наметилось два принципиально различных подхода к решению данной проблемы. Фирмой MAN создана и прошла успешные испытания система с прямой подачей газа в камеру сгорания под высоким давлением. Альтернативный подход с подачей газа в рабочее пространство двигателя под низким давлением разработала фирма Wärtsilä. Анализу этих подходов посвящена данная статья.

Введение

Постоянный рост цен на нефть и топлива, получаемые из нее, а также ужесточение требований, связанных с экологическими показателями судовых двигателей, заставляют все большее число производителей искать альтернативные решения, связанные как с поиском новых топлив, так и способов их использования в судовых дизелях [1].

В качестве наиболее перспективных топлив, позволяющих одновременно снизить и стоимость перевозок, и количество вредных выбросов, являются газовые топлива различного происхождения.

Наиболее перспективным газовым топливом (ГТ) сегодня считается природный газ.

Применение природного газа позволяет существенно сократить количество вредных выбросов в сравнении с топливами нефтяного происхождения – полностью исключить выбросы серы, кардинально (на 90 %) снизить выбросы оксидов азота (NO_x) и существенно (на 30 %) снизить выбросы твердых частиц и диоксида углерода (CO_2) [2]. К другим преимуществам ГТ можно отнести отсутствие жидких фракций, что исключает разжижение масла в зоне работы поршневых колец, а практически полное отсутствие зольности приводит к улучшению условий смазки и повышению срока службы циркуляционного масла. В результате ресурс двигателей, работающих на газе, может быть увеличен в 1,3...1,5 раза, во столько же снижены затраты на обслуживание и ремонт.

Первоначально вопрос использования природного газа в качестве моторного топлива на флоте встал для судов-газовозов. Накопление опыта их эксплуатации позволило расширить область применения ГТ в двигателях судов других типов. Сегодня использование сжиженного природного газа рассматривается как перспективное направление для судов – контейнеровозов, пассажирских, автобусов, паромов и т.д. [2, 3].

Специфические условия работы судов наложили свои отпечатки на развитие топливных систем судовых двигателей, работающих на газе. В первую очередь это связано с необходимостью сохранить возможность работы двигателя на жидких

топливах, которая возникает всякий раз, когда судно движется в балласте. Кроме того, в зависимости от вида груза, условий плавания и времени, состав газов, используемых в СЭУ, может существенно изменяться. Топливная система должна адекватно реагировать на такие изменения и обеспечивать работу двигателей на номинальных режимах.

Исходя из этого, основная масса судовых двигателей создается сегодня двухтопливными (dual-fuel (DF)), то есть способными работать на газовом, жидком топливе или на обоих топливах сразу в различных пропорциях [1-7].

К организации рабочего процесса в DF-двигателях при работе на газе существует два принципиально различных подхода – использование внешнего и внутреннего смесеобразования. При этом в обоих случаях воспламенение газозооушной смеси осуществляется от электрической искры или небольшой порции жидкого топлива, впрыснутого в рабочий цилиндр [1-7].

Анализ состояния проблемы перевода малооборотных двигателей на природный газ

Изначально задача использования природного газа в судовых двигателях была решена для четырехтактных двигателей, в которых преимущественно использовалось внешнее смесеобразование в комбинации с запальным зажиганием [1].

В двухтактных двигателях организовать внешнее смесеобразование достаточно сложно, так как перед поступлением в рабочий цилиндр воздух заполняет подпоршневую полость, имеющую достаточно большой объем. Наличие большого количества газозооушной смеси увеличивает опасность взрыва и серьезность его последствий. Поэтому в современных двухтактных двигателях используется внутреннее смесеобразование, при котором газовое топливо подается в рабочий цилиндр после закрытия газораспределительных органов.

К внутреннему смесеобразованию существует два основных подхода:

- газ подается в рабочий цилиндр сразу после закрытия выпускного клапана в начальной стадии такта сжатия под относительно небольшим давлением, благодаря чему такие системы получили

название систем питания низкого давления;

- газ подается в камеру сгорания вместе с запальным топливом в конце такта сжатия под высоким давлением, поэтому такие системы получили название систем питания высокого давления или прямого впрыска газа (Direct Injected Gas (GD)).

В настоящее время, к опытной эксплуатации двухтактных малооборотных двигателей с системами низкого давления приступила фирма Wärtsilä, создавшая для продвижения данных технологий дочернюю компанию Winterthur Gas and Diesel Ltd.

Системами высокого давления оборудуются малооборотные газодизельные двигатели фирмы MAN, которые используются в качестве главных, не только на газовозах, но и на других типах судов. В этом же направлении ведет разработки японская фирма Mitsubishi, которая на базе дизелей серии UEC создает собственный вариант малооборотного DF-двигателя, получившего индекс UEC-LSGi.

Пути решения проблемы

Разработка и внедрение систем низкого давления. После анализа различных концепций создания газодизельного малооборотного двигателя, проведенных фирмой Winterthur Gas and Diesel Ltd. в 2011 году, было принято решение развивать технологию подачи ГТ в двигатель под низким давлением. Первые исследования были выполнены на испытательной базе в итальянском городе Триесте в 2013 году. Для работы на ГТ в качестве основного был переоборудован дизель RT-flex50DF. Жидкое топливо (ЖТ) использовалось в качестве резервного. При этом на ГТ двигатель должен был работать по циклу, близкому к теоретическому циклу Отто.

Начиная с 2013 года, фирма Wärtsilä провела полномасштабные испытания газодизельного двигателя. Эти разработки явились продолжением работ фирмы Sulzer по созданию в 70-х годах прошлого столетия газодизельных двигателей низкого давления на базе дизелей серий RD и RNMD. Кроме того фирма располагала опытом создания газодизельных двигателей с подачей газа под высоким давлением. Так в 1986 году фирмой Sulzer совместно с фирмой Diesel United была сконструирована и испытана система высокого давления подачи газа для двигателя RTA84. На тот момент эти технологии оказались невостребованные, и только с ростом цен на нефтепродукты и ужесточением экологических требований к судовым дизелям вновь пробудился интерес к использованию в них ГТ.

Разработанная для двухтопливного малооборотного двигателя технология подачи газа под низким давлением рассчитана на сжигание обедненной топливовоздушной смеси [2]. Газ подается в цилиндр после того как все органы газообмена оказываются закрытыми но давление остается еще срав-

нительно низким. На практике клапана для подачи газа устанавливаются на некоторой высоте от продувочных окон, чтобы обеспечить необходимое время на заполнение цилиндра газом.

Поступление газового топлива на такте сжатия позволяет подавать его в цилиндры под относительно низким давлением 1,0...1,6 МПа.

В процессе сжатия в двигателе газ хорошо перемешивается с воздухом и воспламеняется с помощью запальной порции топлива. При этом ее величина во всем диапазоне нагрузок не превышает 1% от цикловой подачи ЖТ на номинальном режиме. По сравнению с ЖТ использование данной технологии позволяет снизить образование NO_x на 90%, что объясняется более равномерным распределением температур по камере сгорания. Это, в свою очередь, позволяет выполнять требования Международной морской организации (International Maritime Organization) IMO Tier-III по выбросам NO_x без какой либо последующей обработки отработавших газов после двигателя.

Для обеспечения двухтопливности двигатель оборудуется тремя независимыми друг от друга системами топливоподачи, каждая из которых может управляться электронным микропроцессорным модулем по отдельной программе в зависимости от используемого топлива и режима работы.

Для подачи резервного жидкого топлива используется штатная топливная система аккумуляторного типа, характерная для всех двигателей серии RT-flex. При этом двигатель сохраняет способность работать на тяжелых сортах топлива во всем диапазоне нагрузочно-скоростных режимов.

Подача запального топлива осуществляется отдельной аккумуляторной системой малой производительности (рис. 1). Такое решение позволяет получить устойчивую подачу малых порций топлива с возможностью гибкого регулирования режима работы системы запального зажигания.

Для улучшения условий воспламенения обедненной газо-воздушной смеси на каждом цилиндре устанавливаются два запальных модуля, состоящих из вихрекамеры с установленной в ней форсункой подачи запального топлива (рис. 2).

В качестве запального используется легкое дизельное топливо, однако рассматривается возможность применения тяжелого топлива (HFO) на котором двигатель работает как на резервном.

Внутренняя полость вихрекамеры соединяется с камерой сгорания с помощью тангенциального канала. Наличие вихрекамеры способствует хорошему перемешиванию воздуха с топливом и эффективному самовоспламенению. При этом плазменные струи выбрасываются в камеру сгорания, эффективно поджигая бедную газо-воздушную смесь.

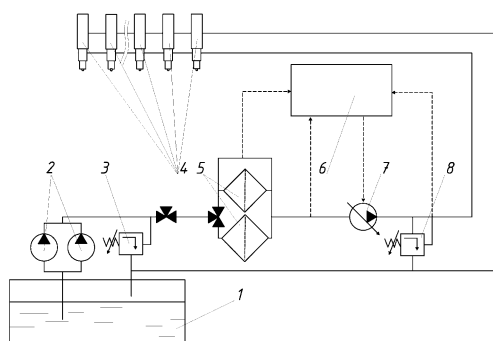


Рис. 1. Схема аккумуляторной системы запального зажигания газодизельного двигателя RT-flexDF: 1 – цистерна запального топлива; 2 – подкачивающие насосы; 3 – перепускной клапан линии низкого давления; 4 – форсунки; 5 – фильтры тонкой очистки; 6 – электронный блок управления; 7 – топливный насос высокого давления; 8 – перепускной клапан линии высокого давления; — гидравлические линии; - - - - линии управления

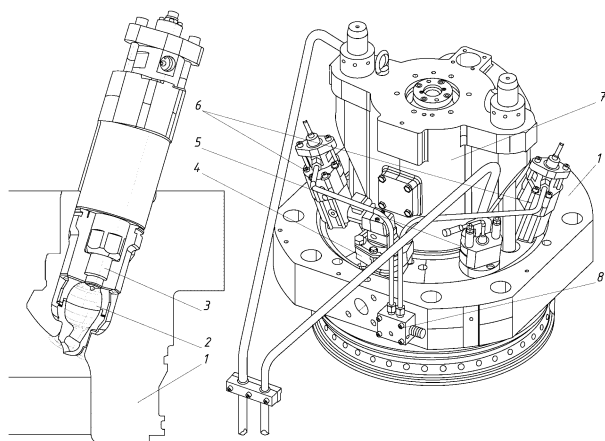


Рис. 2. Модуль запального зажигания газозадушенной смеси газодизельного двигателя RT-flexDF и его установка на крышке цилиндра: 1 – крышка цилиндра; 2 – вихрекамера; 3 – форсунка подачи запального топлива; 4 – воздушный клапан; 5 – форсунка подачи резервного жидкого топлива; 6 – запальный модуль; 7 – корпус выпускного клапана; 8 – коллектор подвода запального топлива

Распределение плазменных струй по объему камеры сгорания способствует более равномерному сгоранию газозадушенной смеси без локальных очагов высоких температур, что позволяет снизить уровень содержания в продуктах сгорания NO_x .

Форкамера выполнена из жаростойкой стали в виде двух отдельных вкладышей и по наружной поверхности охлаждается водой, подводимой из контура охлаждения крышки цилиндра.

При работе двигателя на жидком топливе, для предотвращения коксования распылителей запальных форсунок, они продолжают работать в режиме минимальной устойчивой подачи. Давление в аккумуляторе системы впрыска запального топлива

поддерживается на уровне 120 МПа. Для предотвращения попадания топлива на элементы двигателя в случае повреждения линий высокого давления, трубопроводы помещены в защитную оболочку.

Подача ГТ в цилиндры двигателя осуществляется с помощью двух газовых клапанов, которые устанавливаются напротив друг друга на высоте примерно 1/3 хода поршня. Крепятся клапана к рубашке блока цилиндров и через отверстия во втулке подают газ в рабочий цилиндр (рис. 3).

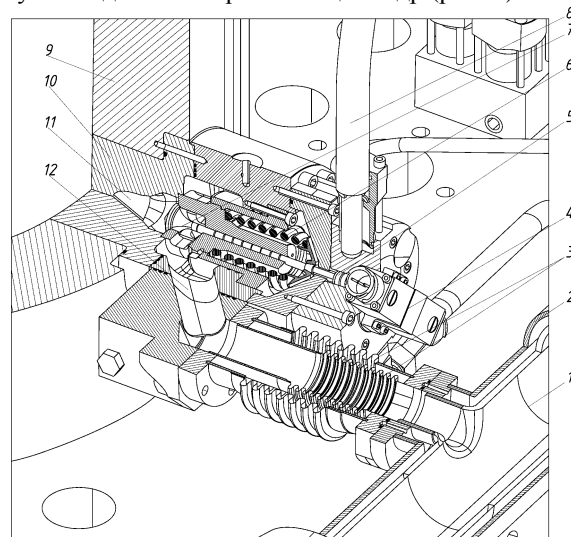


Рис. 3. Установка газового клапана на втулке цилиндра двигателя RT-flex50DF: 1 – газовая магистраль; 2 – внешняя оболочка; 3 – внешний и внутренний сильфон; 4 – электромагнитный клапан управления; 5 – гидравлический поршень привода клапана; 6 – пружина закрытия клапана; 7 – газовый клапан; 8 – гидравлическая магистраль привода клапана; 9 – втулка цилиндра; 10 – корпус газового клапана; 11 – канал подвода ГТ в рабочий цилиндр; 12 – канал подвода ГТ к газовому клапану

Открытие клапана осуществляется с помощью гидравлического поршня, а закрытие и удержание – за счет цилиндрической пружины. Масло для привода газового клапана отбирается из системы привода выпускного клапана, что значительно упрощает конструкцию системы. Управление потоками масла в системе привода газового клапана осуществляется с помощью бистабильного электромагнитного клапана, который используется в двигателях RT-flex для управления топливоподачей.

Сигнал на клапан управления поступает с микропроцессорного модуля управления двигателем.

Клапан оснащен датчиком перемещения, через который осуществляется обратная связь с блоком управления. В случае зависания клапана, блок управления автоматически прекращает подачу газа и переводит двигатель на ЖТ.

Подвод газа к клапанам осуществляется через

двустенные сильфоны от газовых магистралей, проложенных с двух сторон двигателя.

Все магистрали так же выполнены двустенными, а пространство между стенками используется для сбора просочившегося газа. Это пространство постоянно вентилируется, а на выходе вентиляционной системы установлены газовые датчики, которые в случае обнаружения утечки газа передают на блок управления сигнал на аварийную остановку двигателя или на перевод его на ЖТ. С целью безопасности все газопроводы обвязки двигателя сделаны из нержавеющей стали.

Работа двигателя на газе позволяет получить на выходном фланце мощность на уровне 80% от номинальной мощности базового дизеля (рис. 4).

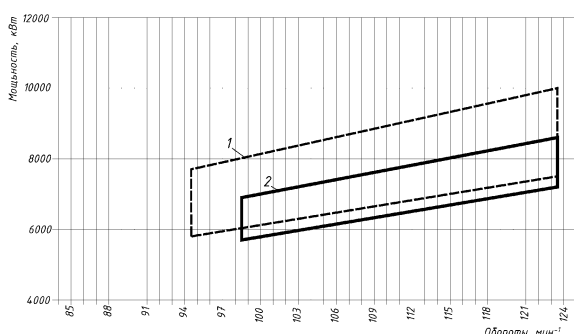


Рис. 4. Области рекомендуемых режимов работы двигателей RT-flex50B на жидком топливе (1) и RT-flex50DF на газовом (2)

При необходимости получения более высоких мощностей двигатель переводится на ЖТ. В целях безопасности пуск и остановка так же производится на ЖТ. Следует отметить, что получаемая на ГТ мощность соответствует основному эксплуатационному режиму большинства судовых двигателей.

Основным фактором ограничения мощности является возможность появления детонационного сгорания, возникновению которого способствует достаточно высокая степень сжатия, необходимая для работы двигателя на ЖТ. С целью предотвращения детонации, состав обедненной газозооушной смеси необходимо поддерживать в достаточно узком диапазоне, что приводит к снижению энергетического потенциала заряда. Кроме того, это не позволяет быстро увеличивать мощность двигателя резким увеличением подачи газа, так как может привести к пропускам воспламенения. Снижение нагрузки так же не должно сопровождаться резким уменьшением подачи газа, так как это приведет к детонационному сгоранию.

Таким образом, двигатели с подачей газового топлива на такте сжатия отличаются замедленной реакцией на изменение нагрузки. Переход с режима на режим должен осуществляться постепенно с задержками на промежуточных режимах для стабилизации состава газозооушной смеси.

Продолжительное сжатие газозооушной

смеси, сопровождающееся ростом ее температуры, делает рабочий процесс чрезвычайно чувствительным к температуре воздуха на входе в двигатель.

Исходя из приведенных выше особенностей, для работы двигателя на номинальной мощности, метановое число газа не должно быть меньше 80, при снижении мощности, оно может быть уменьшено до 60...67 единиц.

На каждом цилиндре двигателя установлены датчики детонации, которые передают сигнал на электронный блок управления, который в случае обнаружения детонации снижает нагрузку на двигатель или переводит его на ЖТ. Переход с одного вида топлива на другой может осуществляться без остановки двигателя на мощностях до 80% от номинальной. Кроме того, как перспективное направление, рассматривается комбинированная работа систем питания жидкого и ГТ топлива. При этом часть энергии в цилиндре выделяется за счет сжигания ГТ, подаваемом в количестве необходимом для обеспечения бездетонационного сжатия, а недостающую часть энергии получают путем впрыска в камеру сгорания жидкого топлива.

Чтобы предотвратить взрывы газозооушной смеси в выпускном ресивере вследствие пропусков зажигания, двигатель оборудуется датчиками давления в рабочем цилиндре. К пропускам зажигания или к неэффективному сгоранию ГТ могут привести неисправности в системе запального воспламенения.

Предусмотрена так же возможность контролировать попадание ГТ в подпоршневое пространство, причиной которого может быть неплотное закрытие или повреждение клапанов подачи газа. Кроме того, некоторая часть ГТ постоянно будет просачиваться в подпоршневую полость через зазоры поршневых колец.

Неполное сгорание ГТ, в силу названных причин приводит к попаданию незначительной части метана в отработавшие газы. Следует отметить, что в настоящее время нет действующих ограничений на выбросы метана судовыми двигателями, однако необходимо иметь ввиду, что вклад метана в возникновение парникового эффекта в 20...25 раз выше чем CO₂. В целом выбросы метана в атмосферу энергетической установкой судна не превышают 0,3%, а общее количество выбрасываемых парниковых газов на 20...30% ниже, чем у двигателей, работающих на жидком топливе.

В настоящее время фирма Wärtsilä наладила выпуск нового поколения двухтопливных малооборотных двухтактных двигателей на базе дизелей серии X. К таким двигателям относятся W-X62DF, W-X72DF, W-X82 и W-X92. В целом разработанная технология ориентирована как на создание новых двигателей, так и на модернизацию

уже находящихся в эксплуатации. По оценкам фирмы стоимость переоборудования составит 20...25% от первоначальной стоимости двигателя.

Разработка и внедрение систем высокого давления ведется на протяжении последних лет крупнейшим производителем судовых малооборотных двигателей – фирмой MAN.

В качестве базовых моделей для газодизельных двигателей используются двухтактные малооборотные дизели серий MC и ME. Модернизированные под газодизельный процесс, двигатели получили индекс GI (Gas Injector). При этом на двигателях с механическим управлением (MC) устанавливается дополнительно электронная система управления процессом подачи газа, а на двигателях с электронным управлением (ME) функции регулирования возлагаются на штатную систему управления.

Для работы на жидком топливе и для запального впрыска используется штатная топливная система. Это упрощает конструкцию, но не позволяет значительно сократить расход жидкого топлива на запальное зажигание, доля которого, для данного типа двигателей, составляет 5...8 %.

Отчасти вопрос значительного снижения затрат топлива на запальное зажигание для двигателей LNG-танкеров не стоит так остро, поскольку практика эксплуатации показывает, что на номинальном режиме количество испарений способно только на 80...90% перекрыть потребности двигателя в топливе. При движении в балласте доля испарения может составлять 40...50%. Поэтому топливная система должна иметь возможность автоматически замещать недостающее ГТ жидким в любом соотношении. Кроме того, теплотворная способность газа, поступающего в двигатель, может изменяться. В начале газы содержат большое количество азота, который, имея более низкую температуру кипения ($-195,75^{\circ}\text{C}$), и испаряется первым. Поэтому для данного типа газодизельных ДВС рассматривается два режима:

- при постоянной подаче запального топлива, когда на режиме пуска и малых нагрузок двигатель работает на жидком топливе (MDO, MGO, HFO). Начиная с 25%-ой нагрузки устанавливается постоянная запальная подача, а необходимая мощность регулируется путем изменения количества газа, подаваемого в цилиндр;

- при использовании всего располагаемого газа, когда на малых и средних нагрузках двигатель работает на жидком топливе. На высоких нагрузках весь испарившийся газ поступает в цилиндры, а необходимая мощность регулируется путем изменения цикловой подачи жидкого топлива.

Переход с одного вида топлива на другой, как и переход с режима на режим, осуществляется автоматически без снижения мощности во всем диа-

пазоне нагрузок двигателя. Оборудование для подачи ГТ под высоким давлением включает в себя компрессоры, теплообменные аппараты, систему подвода ГТ к рабочим цилиндрам, модули управления подачей газа и газовые форсунки.

Все газопроводы на двигателе выполняются цельносварными и только в местах присоединения трубок, отводящих ГТ на блоки управления подачей, используются фланцевые соединения, необходимые для обслуживания элементов газовой системы. Конструкция трубопроводов спроектирована таким образом, чтобы компенсировать тепловые расширения при нагреве двигателя. Все трубы газовой системы рассчитаны на давление, превышающее рабочее на 50%, и помещаются в защитные оболочки, способные выдержать давление, возникающее при разрыве основной магистрали. Внутреннее пространство между оболочкой и трубопроводом соединяется с системой принудительной вентиляции, которая обеспечивает примерно 30-кратную смену воздуха в час. К вентилируемому относятся и полости, прилегающие к основным элементам топливной системы, в которых может возникнуть утечка газа. В остальных мерах безопасности такие же, как и в рассмотренных ранее установках низкого давления. Фрагмент газовой магистрали представлен на рис. 5.

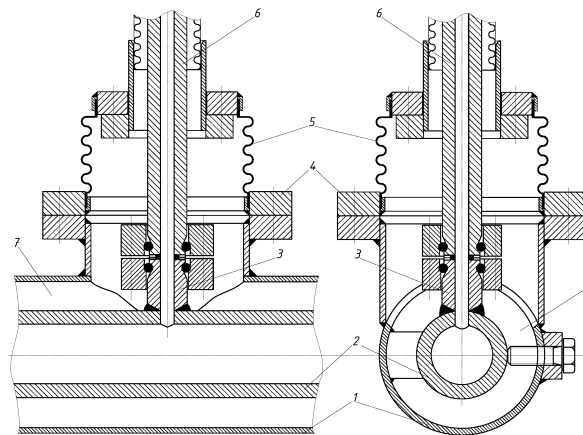


Рис. 5. Фрагмент газовой магистрали газодизельного двигателя серии ME-GI: 1 – защитная оболочка; 2 – газовая магистраль; 3 – присоединительный штуцер; 4 – соединительный фланец; 5 – защитная гофрированная оболочка; 6 – трубки отвода газа к блоку управления подачей; 7 – вентилируемое пространство

Для повышения безопасности эксплуатации двигателей в составе энергетической установки предусмотрена система инертных газов, которая позволяет под давлением 0,4...0,8 МПа продуть как всю систему подачи ГТ, так и ее отдельные элементы. Такая очистка является обязательной процедурой при переходе на ЖТ или при повреждении какого-либо из участков системы газоснабжения.

Подача газа в камеру сгорания осуществляется сразу после того, как в цилиндр подана и воспламенилась запальная порция ЖТ. Таким образом, достигается высокая степень выгорания топлива и предотвращается опасность пропуска зажигания, а так же попадания газа через зазоры поршневых колец в подпоршневое пространство.

Все элементы управления подачей газа сконпонованы в одном модуле, который включает: газовый аккумулятор, главный отсечной клапан с гидравлическим приводом, клапана продувки системы инертным газом, клапана управления гидроприводом форсунок (рис. 6).

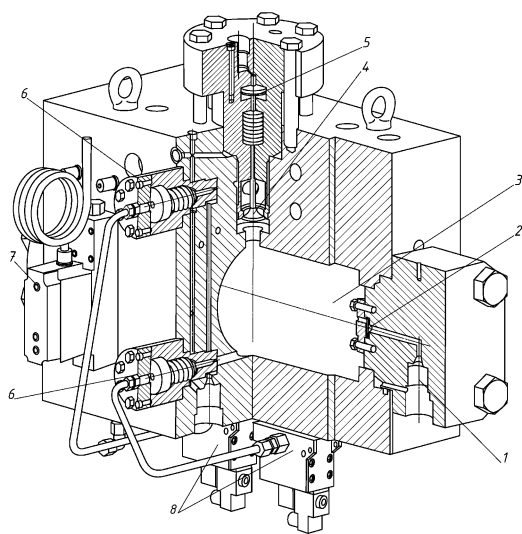


Рис. 6. Модуль управления подачей газа двигателя серии ME-GI: 1 – узел ввода ГТ; 2 – обратный клапан; 3 – полость аккумулятора давления; 4 – главный отсечной клапан; 5 – поршень привода главного отсечного клапана; 6 – клапан продувки инертным газом; 7 – блок управления главным отсечным клапаном; 8 – блок управления клапаном продувки инертным газом

Сам модуль крепится к крышке цилиндра, которая имеет внутренние сверления для подвода газа от модуля управления к газовым форсункам, установленным в крышке цилиндра рядом с форсунками для впрыска жидкого топлива.

Газовое топливо из подводящей магистрали через обратный клапан поступает в аккумулятор давления, выполненный как полость в корпусе модуля. Емкость аккумулятора эквивалентна примерно 20 цикловым подачам газа на номинальной нагрузке.

Наличие аккумулятора в блоке управления служит для уменьшения падения давления в процессе впрыска топлива. Стабильное давление необходимо, чтобы система управления могла правильно определить время открытия клапана, которым и задается величина цикловой подачи.

При отсутствии управляющего сигнала на блок управления главным отсечным клапаном по-

следний закрыт и газ не поступает к газовым форсункам. При поступлении электрического сигнала с блока управления двигателем на блок управления главным отсечным клапаном его золотник перемещается и подает управляющее масло на механизм гидропривода главного отсечного клапана. Клапан открывается, и газ поступает к форсункам, игольчатые клапана которых на этот момент остаются закрытыми. Заполняя каналы между модулем и форсунками, газ воздействует на датчик давления. Информация о фактическом давлении, полученная с датчика, поступает на блок управления двигателем и используется при вычислении необходимого времени открытия форсунки. На основании полученной информации блок управления формирует сигнал, подаваемый на блок управления гидроприводом форсунок. Под действием сигнала золотник блока перемещается и подает управляющее масло на привод форсунок. Открываясь, форсунки производят подачу газа в камеру сгорания двигателя.

После снятия управляющего сигнала с блока управления гидроприводом форсунок золотник, перемещаясь, переключает масло из контура гидропривода на слив, клапана форсунок закрываются. Снятие сигнала с блока управления главным отсечным клапаном приводит к его закрытию, и система возвращается в исходное состояние.

В рассмотренной схеме подачи газа в рабочий цилиндр применено двухступенчатое подключение – сначала через главный отсечной клапан, а затем через клапана форсунок. Такое решение позволяет повысить уровень безопасности эксплуатации, а в случае необходимости, очистить поврежденные полости, продув их через специальные клапана инертными газами.

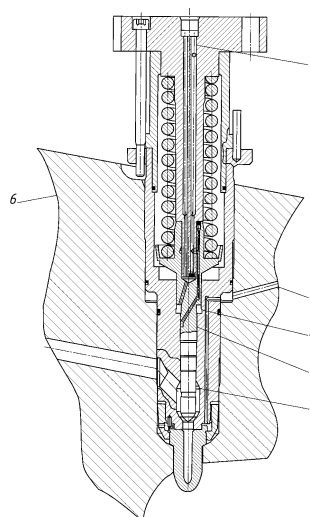


Рис. 7. Газовая форсунка двигателей ME-GI: 1 – канал подвода управляющего масла; 2 – вентиляционный канал; 3 – полость гидравлического управления игольчатым клапаном; 4 – игольчатый клапан; 5 – газовая полость; 6 – крышка цилиндра

Общее устройство газовой форсунки представлено на рис. 7. Устанавливаются газовые форсунки по две на цилиндр в специальных колодцах в крышке цилиндра, расположенных в непосредственной близости от форсунок жидкого топлива. Газ подводится к форсунке через сверления в крышке цилиндров и поступает к запорному конусу игольчатого клапана через отверстия в ее корпусе.

Для предотвращения утечек газа между корпусом форсунки и крышкой цилиндра устанавливаются уплотнительные кольца. Полости, расположенные за пределами уплотнений, соединяются с общей вентиляционной системой.

В закрытом состоянии игольчатый клапан удерживается за счет усилия пружины, действующей на тарелку, выполненную с ним как одно целое. В нижней части игольчатого клапана имеется

бурт, прецизионно подогнанный к корпусу, выполняющий роль гидравлического поршня. По каналам в направляющей и в теле игольчатого клапана масло от модуля управления подачей поступает в кольцевую полость под буртом, заставляя игольчатый клапан открываться. Для предотвращения просачивания газа между игольчатым клапаном и корпусом в зазор между ними постоянно подается уплотняющее масло под давлением на 0,2...0,3 МПа выше, чем давление газа перед распылителем. Уплотняющее масло поступает по системе каналов в кольцевую проточку на теле игольчатого клапана.

В таблице 1 приведены основные особенности, связанные с конструкцией, организацией рабочего процесса и эксплуатацией газодизельных двигателей, оборудованных системами низкого и высокого давления.

Таблица 1 – Сравнение систем низкого и высокого давления

Особенности конструкции и организации рабочего процесса	Низкого давления	Высокого давления
Мощность на газовом топливе	80% от $N_e^{ЖТ}$	100% от $N_e^{ЖТ}$
Чувствительность к качеству газа (метановое число)	не ниже 80	нет
Чувствительность к температуре воздуха на входе	есть	нет
Доля запального топлива	≈ 1%	3...5%
Наличие отдельной системы запального впрыска	Есть	Нет
Возможность использования НФО как запального	В перспективе	Да
Возможность использования НФО как резервного	Да	Да
Возможность работы на двух топливах одновременно (кроме запального)	Нет/В перспективе	Да
Смесеобразование	С перемешиванием	Без перемешивания
Давление подводимого газового топлива	1,6 МПа	30,0 МПа
Максимальное давление цикла	Возрастает	Без изменений
Возникновение детонации при изменении нагрузки	Возможно	Нет
Вероятность пропуска воспламенения	Есть	Нет
Вероятность взрыва в подпоршневом пространстве	Есть	Нет
Вероятность взрыва в выпускном ресивере	Есть	Нет
Вероятность утечек газа в машинное отделение	Низкая	Высокая
Эффективный КПД на газовом топливе	Без изменений	Возрастает
Эффективный КПД на жидком топливе	Снижается	Без изменений
Соответствие нормам выбросов IMO по NO_x	Tier III	Tier II
Выбросы CO_2 с отработавшими газами г/(кВт·ч)	485,7	452,4
Выбросы метана с отработавшими газами г/(кВт·ч)	3...6	≈ 0,5
GWP (потенциал глобального потепления в эквиваленте CO_2) от ЖТ	На ниже 10%	На ниже 23%
Возможность перехода с одного топлива на другое под нагрузкой	До 80% от $N_e^{ЖТ}$	Без ограничений
Реакция двигателя на изменение нагрузки	Замедленная	Без изменений

Заключение

На сегодня существует два принципиально разных подхода к организации работы малооборотных двигателей на ГТ, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Преимущества систем низкого давления:

- хорошее перемешивание газо-воздушной смеси в ходе процесса сжатия;
- использование минимальной порции запального топлива для поджога газо-воздушной смеси;
- подача газ в рабочий цилиндр под относительно низким давлением, что позволяет снизить вероятность утечек, упростить топливную систему,

повысить безопасность ее использования;

- для подачи ГТ можно использовать более дешевые и надежные винтовые или центробежные компрессоры.

Недостатки систем низкого давления:

- возможность возникновения детонации и, как следствие, более высокие требования к качеству ГТ;
- неизбежное просачивание газо-воздушной смеси через поршневые кольца в подпоршневое пространство на такте сжатия, а так же вероятность попадания газа в подпоршневое пространство в случае повреждения газового клапана;

- ограничения по мощности двигателя при работе на ГТ на уровне 80% от номинала, замедленная реакция на изменение нагрузки.

Преимущество систем прямого впрыска:

- при подаче ГТ непосредственно в камеру сгорания можно полностью исключить возникновение детонации, поэтому, отсутствуют какие либо ограничения по мощности двигателя при работе на ГТ, да и требования к качеству ГТ менее жесткие;

- исключено попадание ГТ в подпоршневое пространство;

Недостатки систем прямого впрыска:

- использование газа под высоким давлением усложняет топливную систему, повышает требования к ее безопасности;

- большой расход жидкого топлива на запальное зажигание газо-воздушной смеси;

- для сжатия природного газа необходимо использование многоступенчатых компрессоров, что повышает энергетические затраты установки.

Очевидно, что оба подхода к организации рабочего процесса в газодизельных двигателях имеют свои преимущества, которые для определенного типа установок могут оказаться решающими, а развитие конструкций позволит избавиться от большинства присущих на сегодня недостатков.

В этой связи, очевидно, что в обозримом будущем оба направления будут развиваться параллельно. Несмотря на существенные отличия в подходах наличие альтернативных решений дает возможность заказчику выбрать систему, наиболее

удовлетворяющую его требованиям.

Список литературы:

1. Rolsted H. *MAN B&W 2-stroke Marine Engine Leading today's Environmental challenges* [Текст]. / Rolsted H. // Korea: MAN Diesel & Turbo SE, 2010. – 86 p. 2. ME-GI – Dual Fuel Done Right [Текст]. MAN Diesel, ME-GI, SNAME NY, 2013. – 73 p. 3. ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas [Текст]. Denmark, Copenhagen: MAN Diesel & Turbo. 2012. – 36 p. 4. Wettstein R. *The Wärtsilä low-speed, low-pressure dual-fuel engine* [Текст]. / Wettstein R. // AJOUR Conference, Odense, 27/28 Nov 2014. – 31 p. 5. Wärtsilä 2-stroke dual fuel technology [Текст]. CIMAC NMA norge annual meeting 22.01.2014. – 32 p. 6. Ott M. *X-DF low-pressure dual-fuel engine technology* [Текст]. WinGD low-speed engines Licensees, Conference 2015. – 7 p. 7. Nylund I., *Low pressure at low speed. Marine / In Detail. Dual-Fuel Technology* [Текст]. / Nylund I. / Wärtsilä. 2014. – 6 p.

Список литературы:

1. Rolsted H. (2010), *MAN B&W 2-stroke Marine Engine Leading today's Environmental challenges*, Korea: MAN Diesel & Turbo SE, 86 p. 2. ME-GI – Dual Fuel Done Right. (2013) MAN Diesel, ME-GI, SNAME NY, 73 p. 3. ME-GI Dual Fuel MAN B&W Engines A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas, (2012). Denmark, Copenhagen: MAN Diesel & Turbo, 36 p. 4. Wettstein R. (2014) *The Wärtsilä low-speed, low-pressure dual-fuel engine*, AJOUR Conference, Odense, 27/28 Nov, 31 p. 5. CIMAC NMA (22.01.2014), *Wärtsilä 2-stroke dual fuel technology*, Norse annual meeting, 32 p. 6. Ott M. (2015), *X-DF low-pressure dual-fuel engine technology*, WinGD low-speed engines Licensees, Conference – 7 p. 7. Nylund I. (2014), *Low pressure at low speed. Marine In Detail. Dual-Fuel Technology*, Wärtsilä, 6 p.

Поступила в редакцию 30.05.2016

Белоусов Евгений Викторович – канд. техн. наук, доц., декан факультета судовой энергетики Херсонская государственная морская академия, Украина, ewbelousov@yandex.ua

Савчук Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Эксплуатация судовых энергетических установок», Херсонская государственная морская академия, Украина, postsavchuk@gmail.com

Белоусова Татьяна Петровна – старший преподаватель кафедры «Высшей математики», Херсонский национальный технический университет, Украина, tbelousova@yandex.ua

ANALYSIS OF CONTEMPORARY APPROACHES TO THE CREATION OF GAS-DIESEL SHIP LOW-SPEED ENGINES

E.V. Belousov, V.P. Savchuk, T.P. Belousova

The observed increase in recent years in the price of fuel derived from petroleum, and tightening environmental regulations have forced manufacturers of marine low-speed engines to focus its efforts on the development of gas diesel engine options on the basis of existing models of marine diesel engines. At the same time there has been two fundamentally different approaches to solving this problem. MAN Company established and successfully tested system with direct injection of gas into the combustion chamber under high pressure. An alternative approach is to feed gas into the working space of the engine under low pressure developed by Wärtsilä. Analysis of these approaches and the focus of this article.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ГАЗОДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Є.В. Білоусов, В.П. Савчук, Т.П. Білоусова

Відмічуване останні роки підвищення цін на нафтове паливо і посилення екологічних вимог змусили виробників суднових малооборотних двигунів зосередити свої зусилля на розробці варіантів газодизельних двигунів на базі вже існуючих моделей суднових дизелів. При цьому намітилося два принципово різних підходи до вирішення даної проблеми. Фірмою MAN створена і пройшла успішні випробування система з прямою подачею газу в камеру згорання під високим тиском. Альтернативний підхід з подачею газу в робочий простір двигуна під низьким тиском розробила фірма Wärtsilä. Аналізу цих підходів присвячена ця стаття.