

Разработка газопоршневого двигателя MD20G мощностью 1 МВт

IN BRIEF

Development of the 1,000 kW-class gas engine (MD20G).

The MD20G, the lean burn gas engine with an open chamber type micro-pilot ignition system, has been developed by Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd.

The base engine of MD20G is the diesel engine Daihatsu DK20.

Technologies such as the Miller cycle and detection of abnormal combustion by linear prediction analysis are applied to the MD20G to achieve high generating efficiency. Furthermore,

the power recovery system from exhaust gas is installed for still higher generating efficiency. It is confirmed from the operation data that the engines are operated at the expected generating efficiency of 42.5 %, the world's highest level in the 1,000 kW-class gas engines.

The gas engine has superior durability and reliability. By introduction of the technology the diesel engine was converted into gas engine resulting in high efficiency.

Газопоршневой двигатель MD20G (фото 1), работающий на обедненной смеси, с открытой камерой сгорания и системой факельного зажигания, разработан компанией Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd. Он создан на базе дизельного двигателя DK20 (производства Daihatsu Diesel Mfg Co. Ltd). С целью достижения высокого КПД при разработке MD20G применялись такие технологии, как цикл Миллера и система обнаружения неустойчивого горения посредством линейного алгоритма прогнозирования. Кроме того, двигатель оснащен системой рекуперации тепловой энергии отработавших газов, включающей в себя двойной турбокомпрессор и генератор.

Результаты эксплуатации показывают, что КПД двигателя достигает 42,5 % (в режиме работы с системой утилизации тепла выхлопных газов), что является достаточно высоким показателем в диапазоне мощности 900...1200 кВт. Среднее эффективное давление – 2 МПа.

Данный тип двигателя отличается длительным сроком службы и высокой надежностью. Эксплуатационные характеристики MD20G представлены в табл.

Система впрыска топливного газа с электронным управлением

Чтобы предотвратить попадание топливного газа из цилиндра в выхлопную трубу в стадии перекрытия впускного/выпускного клапана,

на всасывающих патрубках каждого цилиндра предусмотрен инжекторный клапан с электронным управлением (рис. 1). Таким образом, после закрытия выпускного клапана по сигналу, поступающему с системы управления двигателя, осуществляется впрыск необходимого количества топливного газа для смешивания с всасываемым воздухом. Благодаря системе управления появляется возможность регулировать время и количество впрыска топлива в соответствии с нагрузкой двигателя.

Поскольку необходимое количество топлива в каждом цикле задается непосредственно перед впрыском в цилиндр, система характеризуется высоким показателем допустимой нагрузки.

Формирование потока газа

Формирование потока газа в цилиндре является важным фактором, влияющим на характеристики и горючесть топливовоздушной смеси. Поэтому его оптимизация позволяет достичь более высокой производительности и снизить уровень содержания NO_x в выхлопных газах двигателя.

На первом этапе с этой целью проводилось моделирование состава топливовоздушной смеси посредством программного обеспечения STAR-CD для анализа течения. Исследовались характеристики системы всасывания, опреде-

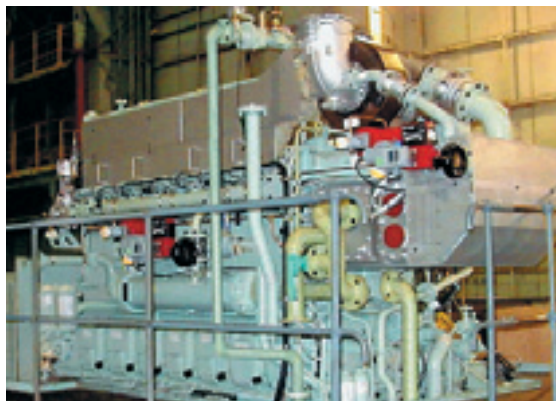


Фото 1. Двигатель MD20G

Табл. Технические характеристики двигателя

	6MD20G		8MD20G	
Количество цилиндров	6		8	
Диаметр цилиндра, мм	200			
Ход поршня, мм	300			
Основное топливо	природный газ			
Запальное топливо	газойль			
Частота, Гц	50	60	50	60
Мощность	без турбонаддува	815	815	1085
	с турбонаддувом	835	835	1105
Среднее эффективное давление, МПа	1,8	2,0	1,8	2,0
Частота вращения, мин ⁻¹	1000	900	1000	900
Тип зажигания	факельное, с прямым впрыском			

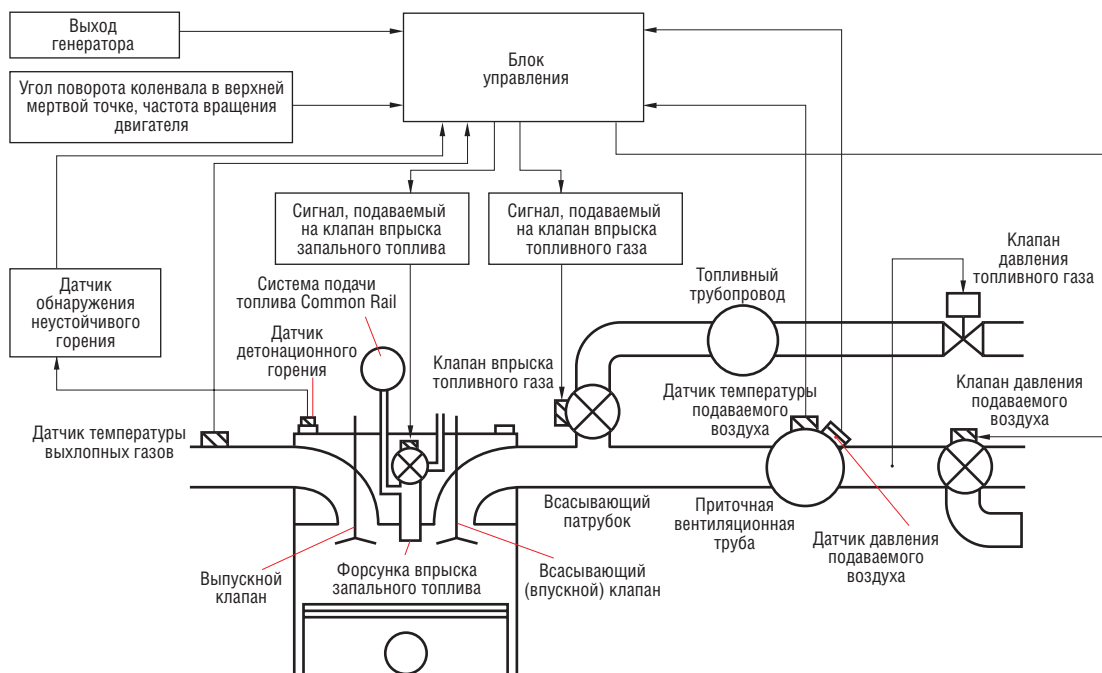


Рис. 1.
Система управления двигателем

ляющей тип течения газа – падающее и вихревое течение (вертикальный и горизонтальный спиральный поток соответственно). Несколько смоделированных систем всасывания были испытаны на одноцилиндровом двигателе – в результате была выбрана система с вихревым течением (фото 2).

Сжигание обедненной топливной смеси

Двигатель работает на обедненной топливовоздушной смеси с коэффициентом избытка воздуха около 2 (концентрация топливного газа 4,7 %). Помимо снижения уровня содержания NO_x в выхлопных газах, появляется возможность регулировать уровень детонации.

Процесс сжигания обедненной топливовоздушной смеси требует точного регулирования ее состава и поддержания стабильного воспламенения. С этой целью системой управления рассчитывается необходимое давление подаваемого воздуха с учетом его температуры, а также мощности двигателя, что дает возможность постоянно контролировать состав топливовоздушной смеси.

Наличие системы рекуперации энергии выхлопных газов позволяет регулировать дав-

ление подаваемого воздуха. В случае отсутствия системы рекуперации подача воздуха осуществляется по сигналу системы управления двигателем (рис. 1).

Для достижения стабильного воспламенения была применена система факельного зажигания с прямым впрыском. Эффективность такой системы гораздо выше, чем системы искрового зажигания.

Цикл Миллера

С помощью цикла Миллера регулируется момент закрытия впускного клапана, что позволяет снизить коэффициент сжатия и поддерживать высокий коэффициент расширения.

Высокий коэффициент расширения, в свою очередь, способствует поддержанию высокого КПД цикла, а уменьшение коэффициента сжатия – снижению температуры топливовоздушной смеси. В результате становится возможным регулирование (предупреждение) детонации двигателя, а также снижение уровня содержания NO_x в выхлопных газах.

Система факельного зажигания с прямым впрыском

Традиционно двигатель MD20G оснащен системой искрового зажигания и/или системой факельного зажигания с форкамерой. Кроме этого, может использоваться и система факельного зажигания с прямым впрыском. Благодаря системе подачи топлива Common Rail, где впрыск регулируется с помощью электромагнитного впускного/выпускного клапана, запальное топливо (газойль) впрыскивается непосредственно в цилиндр для воспламенения топливовоздушной смеси (рис. 1).

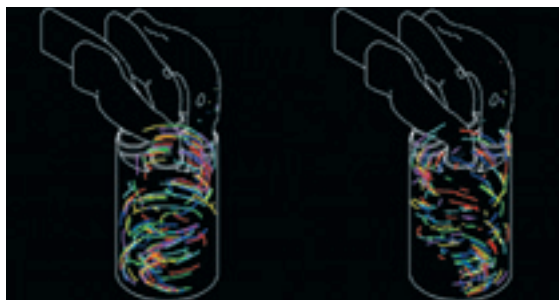
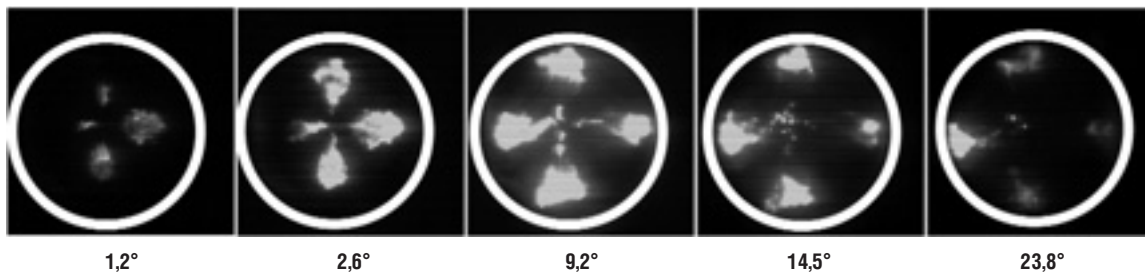


Фото 2. Формирование потока газа в цилиндре

➤ **Фото 3.** Процесс сгорания запального топлива и обедненной топливовоздушной смеси



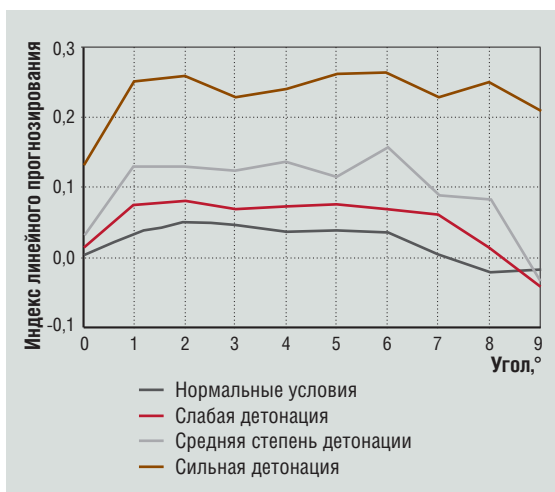
В ходе изучения процесса воспламенения и горения обедненной смеси был разработан небольшой экспериментальный двигатель (диаметр цилиндра 96 мм, ход поршня 108 мм, частота вращения 1000 об/мин) для визуального отображения стадий горения с помощью высокоскоростной съемки. Сначала происходит возгорание газойля (угол поворота вала 1,2°), впрыскиваемого через четыре распылительные форсунки, затем – топливовоздушной смеси, и начинается распространение горения (угол 2,6...23,8°) (фото 3).

Благодаря системе прямого впрыска, газопоршневой двигатель, как и дизельный, может запускаться только на жидком топливе. В отличие от двигателя с форкамерой, в данном случае не требуется применения специальных зажигающих устройств, таких как запальная свеча и/или свеча предпускового подогрева.

Конструкция головки цилиндра такого двигателя более простая, чем в двигателе с форкамерой, а камера сгорания характеризуется более высокой надежностью.

Характеристики процесса воспламенения значительно лучше, чем в двигателе с искровым зажиганием, и сопоставимы с рабочими параметрами двигателя, оснащенного форкамерой. Стабильное возгорание топливовоздушной смеси обеспечивается в том случае, если при 100 %-й нагрузке содержание газойля в требуемом объеме топлива будет менее 1 %. Таким образом, двигатель сможет работать на обедненной смеси.

➤ **Рис. 2.** Индекс линейного прогнозирования в моменты наличия и отсутствия детонации



➤ **Рис. 3.** Пример выходной величины нейронной сети

Определение неустойчивого горения

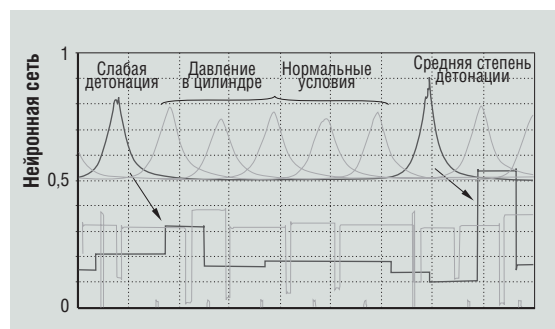
Для определения и регулирования процесса неустойчивого горения (детонация и пропуск зажигания) было разработано специальное устройство. В момент обнаружения детонации происходит задержка момента впрыска запального топлива в соответствующем цилиндре с учетом интенсивности детонации. Соответственно, при пропуске зажигания увеличивается количество впрыскиваемого в цилиндр запального топлива.

На основе данных выходного сигнала датчика детонационного горения и графика колебаний в обычных условиях и при слабой, средней и сильной детонации был вычислен индекс линейного прогнозирования (ИЛП). Наблюдения показали, что он напрямую зависит от интенсивности детонации – чем интенсивнее детонация, тем выше индекс ИЛП (рис. 2). Полученные данные были переведены в цифровую форму посредством нейронной сети в соотношении 0/1 и преобразованы в электрическое напряжение, подаваемое системой управления двигателем.

На рис. 3 представлена диаграмма результатов исследования с учетом давления в цилиндре, откуда видно, что выходная величина нейронной сети при детонации выше, чем в обычных условиях.

Эффективность данной системы обнаружения была проверена путем моделирования детонации и изменения ее интенсивности. С помощью выходного сигнала датчика давления, выявляющего возникновение детонации и изменение ее интенсивности, определялась эффективность оборудования.

Посредством настройки угла опережения впрыска запального топлива двигатель выво-



дился на режим работы, при котором достигается максимальная производительность.

Система рекуперации тепла отработавших газов

Благодаря модернизации турбокомпрессора и увеличению его КПД количество тепловой энергии отработавших газов, подаваемых в турбокомпрессор, увеличилось и оказалось гораздо большим, чем необходимо для сжатия воздуха в двигателе. Для того чтобы утилизировать излишки энергии, была разработана компактная система рекуперации энергии тепла отработавших газов (turbo-compound system), в которой высокооборотный генератор напрямую соединен с турбокомпрессором (фото 4).

Номинальные характеристики генератора следующие: мощность 40 кВт, частота вращения 45 000 об/мин при частоте 750 Гц, напряжение (490 ± 30) В. Поскольку частота тока и напряжение изменяются в соответствии с изменением частоты вращения генератора (и турбокомпрессора), возникает необходимость их преобразования. Для этого используется источник стабилизированного электропитания, который регулирует выходной сигнал системы рекуперации, чтобы давление подаваемого воздуха всегда соответствовало заданным параметрам. В частности, если при работе двигателя давление подаваемого воздуха превышает допустимые значения, частота вращения турбокомпрессора снижается посредством системы контроля, и давление регулируется. И наоборот, при снижении давления подаваемого воздуха увеличивается частота вращения турбокомпрессора.

Для газопоршневого двигателя, работающего на обедненной топливной смеси, система контроля коэффициента избытка воздуха (или система контроля давления подаваемого воздуха) играет решающую роль. Обычно давление подаваемого воздуха регулируется за счет высвобождения части отработавших газов или подачи воздуха в выхлопную трубу. Однако в



С Фото 4. Внешний вид системы рекуперации энергии тепла отработавших газов

двигателе, который оснащен системой рекуперации, данная система используется как тормозное устройство турбогенератора, контролирующее частоту его вращения для регулирования давления воздуха. Энергия торможения в этом случае используется для выработки электроэнергии.

На рис. 4 представлена схема системы рекуперации тепла отработавших газов, используемой в двигателе. При ее создании необходимо было разработать надежный механизм, соединяющий нагнетатель турбокомпрессора и высокооборотный генератор. Еще одной важной технологической задачей была разработка системы контроля вибрации вала.

При создании передаточной системы выполнены исследования по течению в обсадной трубе на входе в турбокомпрессор, через которую проходит передаточный вал, а также по вибрации вала. Проведены эксплуатационные испытания системы рекуперации со сжатым воздухом в качестве движущей силы. Передаточный вал присоединяется к нагнетателю турбокомпрессора с помощью болтов, а к высокооборотному генератору – шлицевых соединений для устранения линейных деформаций и/или погрешностей центрирования. Результаты замеров вибрации на соединительном валу (рис. 4, точка А) и валу турбокомпрессора (точка В) показывают, что значение вибрации вала ниже уровня, допустимого на опорном подшипнике.

Эксплуатационные характеристики

Двигатель применяется в составе энергетических установок независимо от того, оснащен он системой рекуперации тепла отработавших газов или нет. Электрический КПД соответствует изначально заданным параметрам.

На начальной стадии эксплуатации возникла проблема, связанная с форсункой впрыска запального топлива, но после ее устранения двигатель продолжал исправно работать.

Работы по совершенствованию MD20G еще не закончены. Основное внимание будет уделяться увеличению его производительности и расширению сферы применения. ■

По материалам доклада Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd. №135 на конгрессе CIMAC-2007, Вена, Австрия

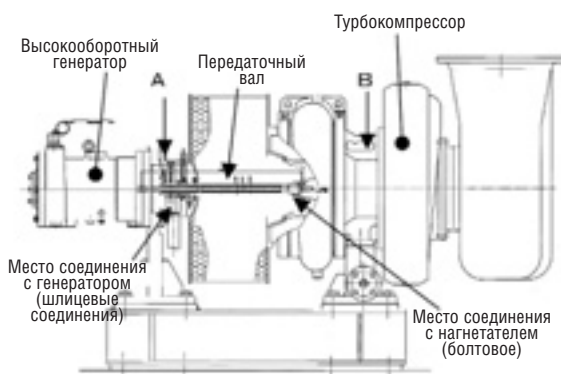


Рис. 4. Схема системы рекуперации