

## ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ НА КОНГРЕССЕ СИМАС-2007

Материал подготовил к.т.н. Г.В. Мельник

В этом выпуске журнала рубрика «Новости двигателестроения» посвящена материалам 25 Конгресса СИМАС, состоявшегося в Вене в мае этого года.

На нем были представлены 182 доклада и сообщения, охватывающие все аспекты создания и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания.

Во многих докладах отмечается тенденция к изменению приоритетов в данной отрасли. Если раньше основное внимание уделялось вопросам топливной экономичности, удельной мощности, ресурса и т. п., то в последнее время приоритет отдается вопросам экологии. Это связано с растущим во всем мире пониманием важности сохранения окружающей среды, что подтверждается постоянным ужесточением как национальных, так и международных нормативов выбросов. Эта тенденция сохранится и в ближайшем будущем, даже несмотря на бурный рост цен на нефть.

В этот выпуск включен развернутый реферат доклада, содержащего обзор действующих и перспективных международных экологических нормативов, охватывающих крупные дизели различного применения, а также оптимальных технических средств достижения требуемых показателей. Кроме того, приведены краткие рефераты еще трех докладов, освещающих наиболее характерные, на наш взгляд, темы форума.

Особый интерес представляет международный проект «Hercules», демонстрирующий степень озабоченности мирового сообщества вопросами экологии и масштабы международного сотрудничества в данной области.

В последующих выпусках журнала редакция продолжит знакомить читателей с материалами конгресса СИМАС-2007.

### СТРАТЕГИЯ ДОСТИЖЕНИЯ НОРМ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В докладе фирмы AVL рассматриваются возможные способы снижения вредных выбросов многоцелевых дизелей с тем, чтобы обеспечить их соответствие требованиям действующих и планируемых технических нормативов выбросов. Типичными для данного класса двигателей являются следующие параметры:

- диаметр цилиндра 250–280 мм,
- номинальная частота вращения 900–1150 об/мин,
- средняя скорость поршня порядка 12 м/с,
- номинальная мощность — до 8 МВт.

Этот класс двигателей выбран для анализа, поскольку он рассматривается как наиболее перспективный с точки зрения универсальности применения. Некоторые двигатели из указанной группы представлены на рис. 1. Годовая потребность в них на мировом рынке оценивается в 3500–4000 штук, а их годовой выпуск приведен на рис. 2, при этом каждое применение диктует свою стратегию достижения требуемых показателей.

#### Нормативы выбросов для двигателей различного назначения

В мире наблюдается тенденция к радикальному, до 90%, снижению предельно допустимых выбросов. Со временем они сведутся к одинаковым или схожим показателям, характеризующимся как «практически нулевые выбросы».

#### Главные судовые дизели

Международным стандартом для судовых дизелей рассматриваемого класса является Приложение VI к международной конвенции MARPOL, устанавливающее предельную норму выброса NO<sub>x</sub> на уровне ~12 г/кВт·ч. Дымность и выбросы частиц не регламентированы. В ближайшие годы ожидается снижение указанного норматива на ~30%, что приводит его в соответствие с американским стандартом EPA Tier 2. В некоторых районах мореплавания (например, в Балтийском море) поощряется существенное снижение выбросов, по сравнению с официальными нормативами MARPOL.

Стандарт EPA Tier 2 (США) соответствует «Предельному Уровню Выбросов для Европейских Водных Путей» (Stage IIIA), который должен вступить в силу в 2009 г. Кроме того, в США существует стандарт добровольной сертификации «Голубое Небо» (Blue Sky Series), действующий до 2010 г. и устанавливающий более

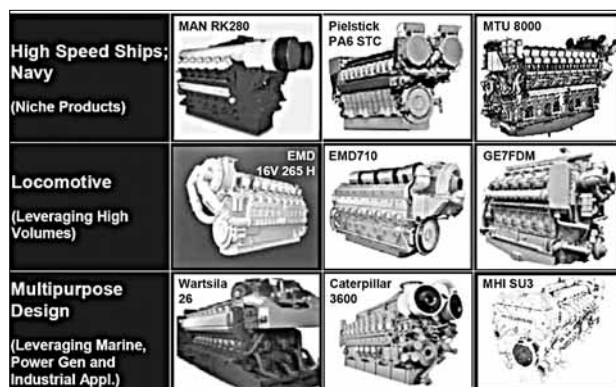
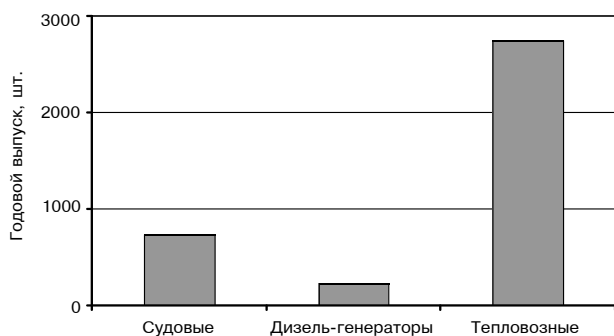


Рис. 1. Некоторые современные среднеоборотные двигатели



**Рис. 2. Распределение двигателей по применению**

низкие значения допустимых выбросов по формуле  $(\text{THC} + \text{NO}_x / \text{PM})$  (общие углеводороды + окислы азота / твердые частицы) — до уровня  $(5,0/0,3)$  г/кВт·ч.

После 2011 г. в Европе, по-видимому, войдут в силу более жесткие нормы, унифицированные с требованиями EPA Tier 4 для промышленных дизелей.

#### **Дизель-генераторы и промышленные двигатели**

Для этой группы двигателей рост экологических требований идет опережающими темпами, при этом зачастую местные региональные нормы (особенно в Германии и Швейцарии) жестче общеевропейских.

В США с 2006 г. действует стандарт Tier 2, устанавливающий нормы выбросов по формуле  $(\text{NO}_x + \text{NMHC}/\text{PM})$  на уровне  $6,4/0,2$  г/кВт·ч. С 2015 г. дизель-генераторы должны будут соответствовать стандарту Tier 4 (вводится поэтапно). При этом выбросы по формуле  $\text{NO}_x/\text{PM}$  снизятся до  $0,67/0,03$  г/кВт·ч.

Для остальных промышленных двигателей нормы EPA по  $\text{NO}_x/\text{PM}$  менее жесткие —  $3,5/0,04$  г/кВт·ч.

#### **Тепловозные двигатели**

Действующие нормы США Tier 2-2005 и вводимые с будущего года UIC 2008 сопоставимы с действующими нормами для промышленных двигателей. ЕС планирует ввести ограничение выбросов по формуле  $(\text{NMHC} + \text{NO}_x/\text{PM})$  на уровне  $7,8/0,2$  г/кВт·ч при работе по тепловозному циклу. На сегодняшний день выполнение этих норм вполне реально. Однако с 2012 г. планируется ввести Stage III B по формуле  $(\text{HC} + \text{NO}_x / \text{PM})$  на уровне  $(4/0,025)$  г/кВт·ч.

#### **Технологии снижения выбросов**

Фирма AVL провела исследование эффективности известных на сегодня технологий снижения выбросов как по отдельности, так и в комплексе.

Исследования проводились на одноцилиндровом отсеке, оборудованном гибкой системой common rail (CRS) и обычной системой подачи топлива с электронным управлением. Возможность

регулирования углов открытия и закрытия клапанов обеспечивалась так называемым «гибким кулачковым валом», обеспечивающим возможность быстрого изменения фаз газораспределения.

Стенд оборудован регулируемой системой рециркуляции отработавших газов.

Газоаналитическое оборудование обеспечивает непрерывное измерение концентрации  $\text{NO}_x$ , CO, HC и PM в отработавших газах, а также содержания сажи в масле. Кроме того, стенд оборудован фирменными оптическими системами AVL для визуализации развития струи топлива и фронта пламени. Существует возможность изменения в широком диапазоне фракционного состава выбора жидкого и газообразного топлива (последнее производится на 6-компонентной смесительной станции).

И наконец, фирменная расчетная программа AVL BOOST позволяет пересчитать результаты, полученные на отсеке, на показатели многоцилиндрового двигателя с учетом всех влияющих факторов (потерь на трение, насосных потерь, наличия турбокомпрессора и т. п.).

Были исследованы следующие технологии снижения выбросов:

- цикл Миллера и повышение содержания остаточных газов;
- множественные впрыски (в том числе предвпрыск) и профилирование закона впрыска (common rail);
- повышение степени сжатия;
- внешняя рециркуляция с охлаждением.

Цикл Миллера (с ранним закрытием впускного клапана) обеспечивает уменьшение выбросов  $\text{NO}_x$  за счет снижения наполнения и температуры в цилиндре. В этом же направлении действует увеличение теплоемкости газов, достигаемое за счет увеличения содержания остаточных газов.

Использование множественных впрысков позволяет найти оптимальный компромисс между расходом топлива и выбросом  $\text{NO}_x$ , а также снизить сажеобразование на долевых режимах.

Эффективным мероприятием по снижению выбросов  $\text{NO}_x$  является уменьшение угла опережения подачи топлива (вплоть до ВМТ) что, однако, ведет к повышению расхода топлива. Этот эффект может быть отчасти нейтрализован за счет повышения степени сжатия, реализуемой путем уменьшения высоты камеры в поршне.

Последнее, однако, вызывает ухудшение смесеобразования и повышенное образование сажи. Избежать этих нежелательных последствий удалось с помощью оптимизации давления подачи топлива и его фазирования.

Упомянутые выше технологии достаточны для выполнения требований UIC 2008 и Tier 2.

Более жесткие нормы, такие как EC Stage IIIb, Tier 3 для тепловозов ( $NO_x = 3,5-4 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ ) или Tier 4 для дизель-генераторов ( $NO_x = 0,67 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ ) требуют дополнительных средств. Одной из известных технологий является рециркуляция ОГ (EGR) с их охлаждением.

При ее использовании требуется решение ряда проблем, в том числе повышение давления рециркуляции перед охладителем. Другой вариант — система внешней рециркуляции ОГ низкого давления, которая, однако, требует установки фильтра частиц на выпуске. Такая система, установленная на опытном отсеке, имеет в своем составе винтовой компрессор (ввиду отсутствия турбокомпрессора).

Количественные результаты проведенного исследования в самом кратком виде таковы.

В качестве основного варианта была принята работа дизеля по тепловозной характеристике. Поэтому типовые режимы задавались выбором позиции контроллера.

Проверка эффективности цикла Миллера проводилась для двух позиций контроллера — 8 и 5.

При выбранной величине угла закрытия впускного клапана на 8 позиции коэффициент наполнения цилиндра составлял 79%. Снижение содержания  $NO_x$  на 8 и 5 позициях составило 25 и 15% соответственно, причем расход топлива при этом не изменился. Недостаток цикла Миллера, а именно, увеличение содержания сажи, проявился на 5 позиции. Он может быть устранен либо за счет усложнения алгоритма работы системы common rail, либо за счет применения интеллектуальной системы регулирования фаз газораспределения. В следующей таблице показан эффект от применения множественных впрысков на 4 позиции контроллера. Как предварительный впрыск, так и послевпрыск обеспечивают существенное снижение содержания сажи в ОГ при незначительном уменьшении  $NO_x$  и расхода топлива, что объясняется более глубоким окислением сажи за счет повышения температуры в последней фазе сгорания.

	Расход топлива	$NO_x$	Сажа
Исходное состояние	100,0	100,0	100,0
Предвпрыск	99,3	97,9	48,0
Послевпрыск	99,2	96,8	40,4

Повышение степени сжатия до 17 позволило снизить расход топлива на 8 позиции на  $5 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$  при том же значении  $NO_x$ . Эксперименты со степенью рециркуляции (EGR) на 8 позиции показали, что при EGR 15% содержание  $NO_x$  может быть снижено на  $3,5 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ . При увеличении EGR сажеобразование, как правило, возрастает. Этот эффект, в зависимости от действующих

норм на содержание частиц и дымности, может быть компенсирован за счет оптимизации рабочего процесса и (или) использования послевпрыска. Расход топлива при этом также возрастает (примерно на 3%), поскольку увеличение EGR замедляет сгорание.

Следующая таблица обобщает целесообразные комплексные технологии выполнения экологических требований в зависимости от области применения двигателя.

Технология	Область применения и экологические нормативы					
	EPA TIER 2 (США)	EPA Blue Sky (США)	Stage IIIb (ЕС)	TIER 4 b промышленные двигатели	UIC 2008	Stage IIIb (ЕС)
Оптимизация процесса сгорания	o	o	o	o	o	o
Цикл Миллера	o	o			o	
Совершенствование наддува	o	o	o		o	o
Гибкая система впрыска	o	o			o	
Система повышения давления впрыска			o	o		o
Рециркуляция			o	o		o
Фильтр твердых частиц				o		o
Очистка ОГ (SCR) De- $NO_x$				o		

Таким образом, для двигателей различных назначений рекомендации по снижению выбросов могут быть сформулированы следующим образом.

#### Главные судовые дизели

В ближайшем будущем на судовые дизели будут распространяться согласованные требования EPA Tier 2 (США) и Stage IIIa (ЕС), предусматривающие выбросы  $NO_x$  на уровне 7,8 и 8,7  $\text{г/кВт}\cdot\text{ч}$ , а по РМ — на уровне 0,27 и 0,3  $\text{г/кВт}\cdot\text{ч}$  в зависимости от мощности и литража. Эти нормы могут быть выполнены с помощью следующих технологий:

- оптимизация процесса сгорания: оптимизация степени сжатия, формы камеры сгорания и конструкции распылителя;
- цикл Миллера;
- совершенствование наддува, в том числе увеличение степени повышения давления в турбокомпрессоре для оптимизации цикла Миллера;
- гибкое управление впрыском (например, путем применения common rail), в частности регулирование давления впрыска, множественный впрыск, регулирование угла опережения впрыска.

Аналогичный арсенал средств достаточен и для выполнения более жестких норм EPA «Blue Sky» ( $NO_x = 5,2$  и  $5,9 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ ), однако с тем условием, что появятся технологии, обеспечивающие еще более высокую степень повышения давления в турбокомпрессоре.

### Дизель-генераторы и промышленные двигатели

В обозримом будущем промышленные двигатели попадут под действие норм Tier 4, т. е.  $NO_x = 3,5 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$  и  $PM = 0,04 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$  для промышленных двигателей, и  $NO_x = 0,67 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$  и  $PM = 0,03 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$  — для дизель-генераторов.

Выполнение требований Tier 4 может быть достигнуто с помощью следующих мероприятий:

- оптимизация процесса сгорания: оптимизация степени сжатия, формы камеры сгорания и конструкции распылителя;
- внешняя рециркуляция ОГ с охлаждением;
- совершенствование наддува для оптимизации работы системы рециркуляции;
- гибкое управление впрыском;
- фильтр твердых частиц;
- очистка ОГ в целях снижения  $NO_x$  (путем, например, селективного каталитического восстановления) — только для дизель-генераторов, поскольку именно для дизель-генераторов экологические требования оказываются наиболее жесткими.

### Тепловозные двигатели

В обозримом будущем тепловозные двигатели попадут под действие норм UIC 2008, т. е.  $NO_x = 6 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$  и  $PM = 0,2 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$  и EC Stage IIIb, т. е.  $NO_x = 4 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$  и  $PM = 0,025 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$ , а также EPA Tier 3, что составляет, как и для промышленных двигателей,  $NO_x 3,5 \text{ г/кВт} \cdot \text{ч}$ . Выполнение этих требований может быть достигнуто с помощью следующих мероприятий:

- оптимизация процесса сгорания: оптимизация степени сжатия, формы камеры сгорания и конструкции распылителя;
- цикл Миллера — для соответствия UIC 2008;
- внешняя рециркуляция ОГ с охлаждением — для соответствия Stage IIIb EC и EPA Tier 3;
- оптимизация турбонаддува с применением рециркуляции и цикла Миллера;
- гибкое управление впрыском, в частности для достижения UIC 2008;
- совершенствование системы впрыска (например, common rail) для достижения Stage IIIb EC и EPA Tier 3;
- установка фильтра частиц на выпуске для Stage IIIb и в зависимости от фактического уровня выбросов PM — для EPA Tier 3.

Перспективные нормативы для тепловозных и промышленных двигателей аналогичны как в США, так и в Европе. Это может стать серьезной проблемой, в первую очередь, для тепловозных дизелей, имеющих, по сравнению с большинством промышленных двигателей, значительно меньшую скорость и гораздо больший рабочий объем.

За последние 10 лет выбросы от автотракторных двигателей существенно снизились, при этом возрос относительный вклад крупных ди-

зелей в загрязнение атмосферы. Так что именно на них сейчас в первую очередь обращены взоры законодателей и общественности во всем мире.

По этой причине особую важность приобретают технологии снижения выбросов для этого класса машин.

*Andrei Ludu u др., AVL List GmbH*

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТРЕБОВАНИЙ IMO TIER 2

После вступления в силу в 2005 г. Приложения VI к Конвенции MARPOL Комитету по защите морской среды в соответствии с резолюцией Конференции IMO MARPOL 1997 г. было предложено пересмотреть нормы предельно допустимых выбросов  $NO_x$ . В апреле 2006 г. рабочая группа IMO пришла к соглашению о том, что с 2010 г. в два этапа будут вводиться нормы Tier 2 — в основном за счет мероприятий по совершенствованию собственно дизеля — а в дальнейшем, начиная с 2010 г., будет осуществлен переход на нормы Tier 3. По мнению рабочей группы, за счет таких мероприятий можно снизить выбросы  $NO_x$  в современных среднеоборотных дизелях, работающих на тяжелых топливах, еще примерно на 20 %. Доклад MAN Diesel SE посвящен результатам проведенного исследования возможностей снижения выбросов среднеоборотных дизелей. Были проведены эксперименты в целях выявления технологий, способных обеспечить выполнение перспективных экологических требований в двигателях со средним эффективным давлением 26 бар без увеличения расхода топлива.

Как известно, существенное снижение выбросов может быть достигнуто за счет одновременного повышения степени сжатия и изменения фаз газораспределения (так называемый цикл Миллера). Как показали эксперименты, выполненные на отсеке 1L32/44, предотвратить повышенное дымление на малых нагрузках можно за счет применения регулируемых приводов клапанов и систем электронного впрыска. Наиболее перспективны в этом смысле системы common rail. Были проанализированы и испытаны различные системы и законы впрыска, в том числе предварительный и/или вторичный впрыск, а также «башмачный» впрыск, чтобы оценить их возможности в снижении дымности и достижении оптимального компромисса между выбросами  $NO_x$  и удельным расходом топлива.

В результате экспериментов выяснилось, что в среднеоборотных дизелях со средним эффективным давлением 26 бар можно снизить выбросы  $NO_x$  на 20 % без увеличения расхода топлива в диапазоне относительных нагрузок 70–85 %.

Однако дальнейшее снижение выбросов NO<sub>x</sub>, например, на 30 %, возможно лишь ценой повышения расхода топлива и дефорсирования двигателя. Другие возможности снизить выбросы NO<sub>x</sub> на 30 %, не жертвуя расходом топлива и номинальной мощностью двигателя, состоят в использовании внешних систем, в частности водотопливной эмульсии, либо радикальном изменении фаз газораспределения в цикле Миллера с одновременным введением двухступенчатого турбонаддува.

*Georg Tinschmann и др., MAN Diesel SE, Germany*

**HERCULES — КОМПЛЕКСНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОЕКТ ПО СОЗДАНИЮ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

HERCULES (High Efficiency R&D on Combustion with Ultra Low Emissions for Ships) — это ширококомасштабный международный научно-исследовательский проект, осуществляемый при поддержке Еврокомиссии и Правительства Швейцарии.

Проект HERCULES I.P. посвящен созданию новых технологий, обеспечивающих радикальное снижение вредных выбросов дизелей как газообразных, так и в виде твердых частиц.

Для достижения этой цели проведены комплексные исследования термодинамики и конструкции двигателей с «экстремальными» параметрами, новых методов организации рабочего процесса, «интеллектуального» многоступенчатого турбонаддува, «горячих» двигателей с утилизацией тепла и компаундированием, способов подавления образования токсичных компонентов ОГ и новых способов очистки ОГ, новых датчиков состава ОГ и качества рабочего процесса, а также адаптивного управления интеллектуальными двигателями.

Разработаны новые модели рабочего процесса и программы в помощь проектировщикам. Изготовлены и испытаны опытные образцы новых компонентов и систем двигателей. Опытные образцы двигателей прошли стендовые испытания. Следующий этап включает испытания компонентов и технологий на полномасштабном судовом двигателе в условиях эксплуатации.

Вся работа разбита на 9 разделов и 54 подпроекта. В консорциум, возглавляемый такими крупными фирмами, как MAN и «Wartsila», входит 41 участник, в том числе поставщики комплектующих, производители оборудования, ряд университетов, научно-исследовательских институтов и судоходных компаний. Промышленная часть консорциума владеет 80 % мирового рынка крупных судовых дизелей, и располагает наиболее

современными технологиями. Начавшийся в 2004 г. проект рассчитан на 3 года.

Это — первый в истории случай сотрудничества двух крупнейших производителей двигателей в общем проекте с разделением сфер деятельности по обоюдному соглашению. Поскольку эти компании являются прямыми конкурентами, каждая из них самостоятельно ведет работы по своему направлению. Однако обе они отметили в совместном заявлении, что их деятельность в рамках проекта направлена исключительно на оздоровление природной среды и поддержание невозобновляемых ресурсов земли.

Совместные исследования проводятся в следующих областях.

- Термо- и гидродинамика процессов в двигателе.

- Меры по снижению выбросов как «внутренние», так и «внешние» (т.е. очистка ОГ).

- Новые методы организации высокого наддува с помощью «интеллектуальных» многоступенчатых турбоагрегатов, обеспечивающих дальнейшее повышение КПД двигателя при экстремальных рабочих параметрах.

- Использование микроэлектроники и современных средств управления двигателем в целях адаптации к меняющимся условиям, включая неблагоприятную погоду, а также компенсации старения и отказов оборудования на протяжении срока службы.

- Новые датчики и программное обеспечение обработки сигналов, позволяющие гораздо подробнее исследовать процессы в двигателе, а также повысить точность и достоверность непрерывного мониторинга параметров в условиях эксплуатации.

- Создание силовых установок для работы в зонах с особо чувствительной экологией (таких как, например, порты, где действуют жесткие ограничения на выбросы NO<sub>x</sub> и дыма).

В следующей таблице представлены основные направления проекта и наименования его разделов.

Область	Наименование раздела
Термо- и гидродинамика	Экстремальные рабочие параметры
Рабочий процесс	Новые концепции организации сгорания
Турбонаддув	«Интеллектуальный» многоступенчатый турбонаддув
Комбинированный цикл	Турбодизель/«горячий» двигатель*
Снижение выбросов	Методы снижения выбросов (внутренние)
Снижение выбросов	Очистка ОГ
Трибология	Снижение трения в двигателе
Управление и контроль	Адаптивный двигатель
Администрирование	Управление проектом

\* Так называемый «горячий двигатель» представляет собой дальнейшее развитие концепции комбинированных систем с высоким теплосодержанием отработавших газов.

По каждой позиции назначены исполнители, представляющие 43 организации из 10 европейских стран. Бюджет проекта равен 33,3 млн Евро.

Следует отметить, что непосредственными участниками проекта HERCULES на 25 Конгресс SIMAC были представлены еще 10 докладов, посвященных работе над отдельными его разделами.

*N. Kyrtatos (Германия) и др.*

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ И С ПОМОЩЬЮ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

С июля 2005 г. JGA (Газовая Ассоциация Японии) и Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., ведут совместную работу над проектом «Создание комбинированного газового двигателя со сверхвысоким КПД». По этому проекту до конца марта 2008 г. должны быть разработаны принципиальные основы для создания систем когенерации на базе газовых двигателей мощностью до 8 МВт. При этом КПД по электричеству должен быть не менее 48% с учетом только главного двигателя и не менее 50% в комбинированной системе. Под комбинированными системами в данном случае понимаются дополнительные средства совершенствования рабочего процесса, такие как сверхкритический впрыск воды в цилиндр и двухступенчатый наддув. В апреле 2007 г. начались испытания 18-цилиндрового двигателя для проверки найденных технических решений. В качестве базового двигателя выбрана модель газодизеля форкамерного типа Mitsubishi MACH-30G; более 110 таких двигателей уже работают в системах когенерации. В каждом его цилиндре установлены датчики, с помощью которых ведется контроль процесса сгорания и осуществляется управление количеством и углом

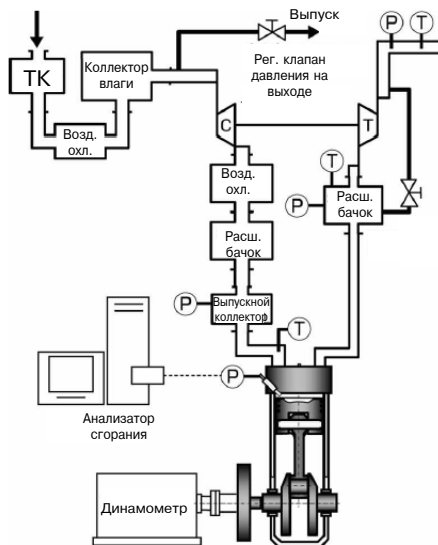


Рис. Схема опытной установки

опережения впрыска пилотного топлива, а также расходом главного газового топлива.

Для достижения заявленной цели — увеличения КПД — необходимо гарантировать отсутствие детонации, что может быть достигнуто путем увеличения степени сжатия и угла опережения зажигания. Для этого авторы проекта исследовали возможные варианты распределения топливо-воздушной смеси в цилиндре на установке, схема которой приведена на рисунке. В дополнение к технологиям, используемым в серийных двигателях, была разработана и проверена новая концепция управления составом топливо-воздушной смеси и рабочим процессом, которая должна стать ключевой с точки зрения повышения КПД.

Эта концепция включает в себя следующие три основных элемента: CFD (гидродинамическое моделирование), FFID (определение мгновенных значений плотности газа методом ионизации пламенем), ТОМО (томография с помощью аппаратуры AVL). Сначала с помощью программы CFD были проведены предварительные расчеты распределения топливо-воздушной смеси в цилиндре двигателя во время всасывания и сжатия. Для оценки качества сгорания и тенденции к возникновению детонации как в однородной, так и в расслоенной смеси (рассчитанной с использованием CFD), измерялась концентрация углеводородов в смеси. Измерение производилось с помощью аппаратуры FFID в 19 точках рабочего объема, до начала сгорания. Наконец, с помощью ТОМО (метод оптического анализа рабочего процесса) определялись характеристики сгорания и тенденция к возникновению детонации в опытном отсеке с диаметром цилиндра 300 мм, при среднем индикаторном давлении 2,13 МПа.

В докладе описаны методика и результаты экспериментов с использованием CFD, FFID и ТОМО, направленных на совершенствование процесса сгорания. Результат расчетно-экспериментального исследования дал необходимую исходную информацию для разработки опытного образца 18-цилиндрового двигателя. Целевые показатели проекта (при низшей теплотворной способности топлива) представлены в следующей таблице.

Газовый двигатель с системой когенерации	Электрическая мощность	Класс 8 МВт
	КПД по электричеству	≥ 48 %
	Общий КПД	≥ 80 %
Газовый двигатель с комбинированной системой когенерации	Концентрация NO <sub>x</sub>	≤ 320 ppm (при O <sub>2</sub> = 0%)
	КПД по электричеству	≥ 50 %

*Shunsaku Nakai,*

*The Japan Gas Association, Japan, и др.*