

## РАЗВИТИЕ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ ЗА РУБЕЖОМ ПО МАТЕРИАЛАМ КОНГРЕССА CIMAC 2013

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

Вопросы экологии и топливной экономичности продолжают оставаться в центре внимания проектантов и производителей двигателей. Об этом свидетельствуют материалы 27 Конгресса CIMAC, проходившего с 13 по 16 мая 2013 года в Шанхае.

Один из докладов посвящен предварительным итогам комплексного проекта HERCULES, выполняемого консорциумом двух крупнейших в Европе производителей дизелей — MAN и Wartsila, при финансовой поддержке Евросоюза.

Цель проекта — оценить все известные на сегодняшний день технологии снижения вредных выбросов дизелей и выяснить, до какого предела можно в принципе снизить выбросы за счет применения этих технологий. Рассматривается возможность создания двигателя с выбросами, близкими к нулевым при условии сохранения на существующем уровне топливной экономичности.

Одним из перспективных направлений развития двигателестроения считается создание двухтопливных двигателей (газодизелей). Авторы доклада, подготовленного австрийской фирмой AVL, отмечают, что газодизели, давно применяемые в стационарных установках, могли бы столь же успешно использоваться и на транспорте, в частности в качестве судовых и тепловозных двигателей. Пока примеры такого применения единичны ввиду отсутствия развитой инфраструктуры для снабжения и заправки газом. Кроме того, остаются проблемы сертификации со стороны классификационных обществ, связанные с безопасностью хранения и использования газа. Однако, по мнению авторов доклада, экономические и экологические преимущества двухтопливных двигателей становятся все более очевидными, поэтому их широкое применение на транспортных средствах — дело не столь отдаленного будущего.

### ДЕСЯТЬ ЛЕТ СПУСТЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛНЕНИЯ ПРОГРАММЫ HERCULES A–B–C ПО НИР В ОБЛАСТИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

*Nikolaos Kyrtatos. National Technical University of Athens. Греция*

*Lars Hellberg. Wartsila Corporation. Финляндия*

*Christian Poensgen. MAN Diesel and Turbo SE. Германия*

В 2004 г. две ведущие двигателестроительные корпорации MAN и Wartsila, на долю которых совместно приходится 90 % мирового рынка судовых дизелей, приступили к реализации проекта HERCULES-A (Комплекс ОК и НИР по созданию судовых дизелей со сверхнизкими значениями вредных выбросов). Этот проект стал первым этапом исследовательской программы HERCULES применительно к двигателям большой размерности. Проект HERCULES-A привлек 42 организации, представлявших промышленность

и университеты; бюджет проекта, составивший 33 млн евро, частично финансировался Евросоюзом. Тематика проекта была чрезвычайно разнообразна. Она охватывала самые различные технологии, направленные на повышение экономических и экологических показателей двигателей. Второй этап проекта HERCULES-B выполнялся в период с 2008 по 2011 г.; бюджет проекта составивший 26 млн евро, также частично финансировался Евросоюзом. Его задачи в основном совпадали с задачами предыдущего этапа, а именно — повышение экономических и экологических показателей двигателей.

Однако используя результаты проекта HERCULES-A и полученные в ходе его выполнения «ноу-хау», на данном этапе появилась возможность сузить область поисков, сосредоточившись на тех областях, где можно ожидать серьезных прорывов в части снижения удельного расхода топлива (наряду с выбросами CO<sub>2</sub>), а также резкого уменьшения вредных выбросов и твердых частиц. Проект HERCULES-C (2012–2015), в котором участвуют 22 организации и бюджет которого составляет 17 млн евро, является третьим этапом программы. Его содержание — синтез целого ряда новых технологий, разработанных на этапах I и II и посвященных вопросам оптимизации рабочего процесса, системной интеграции, повышения надежности и ресурса двигателей. В настоящем докладе представлены общий обзор структуры проекта и основные достижения программы HERCULES за последние 10 лет.

#### Введение

Для судового дизеля важнейшими качествами всегда были и остаются надежность, топливная экономичность, а также (начиная с 2000 г.) — минимальные вредные выбросы. Ведущиеся в настоящее время исследования показывают, что проблема вредных выбросов будет решена в ближайшие годы путем сочетания методов очистки отработавших газов, совершенствования рабочего процесса и систем управления.

Основные направления исследований в области обеспечения надежной и экономичной работы двигателей в течение всего срока службы — это улучшение показателей рабочего процесса двигателей, оптимизация режимов их эксплуатации, диагностика и адаптивное управление.

Программа HERCULES отражает совместное видение перечисленных проблем двумя крупней-

шими в Европе производителями дизелей — MAN и WARTSILA. В 2002 г. состоялось первое обсуждение данных проблем на высшем уровне между представителями MAN и WARTSILA, начатое для выработки общей программы развития двигателей большой размерности. В 2003 г. такая программа, рассчитанная на срок порядка 10 лет, с бюджетом 80 млн евро, была запущена. Она ставила перед собой следующие задачи:

- повышение КПД двигателей в целях уменьшения расхода топлива и выбросов CO<sub>2</sub>;
- снижение вредных выбросов газов и частиц;
- повышение надежности двигателей.

Весь проект был разбит на 3 этапа. Содержание этих этапов может быть кратко сформулировано следующим образом:

- проект HERCULES-A (H-A): ряд новых технологий, направленных, главным образом, на снижение выбросов
- проект HERCULES-B (H-B): отбор наиболее перспективных технологий по результатам первого этапа с одновременным учетом необходимости повышения КПД и соответственного снижения выбросов CO<sub>2</sub>;
- проект HERCULES-C (H-C): интеграция части выбранных успешных технологий, направленная на оптимизацию показателей выбросов, КПД, эксплуатационной надежности и долговечности судовых дизелей.

Общий план-график поэтапного выполнения программы HERCULES показан на рис. 1.

#### HERCULES-A И HERCULES-B

Этап I программы HERCULES был реализован в качестве объединенного проекта FP6 «I.P. HERCULES», совместно финансируемого Евро-союзом и правительством Швейцарии. В консорциум I.P. HERCULES (A) вошли 42 организации с общим бюджетом 33 млн евро.

Тематика проекта была разнообразной, включая в себя различные дисциплины, сгруппированные

в рабочие пакеты (группы работ). Был спроектирован и изготовлен по последнему слову техники ряд специальных компонентов испытательных стендов и измерительной аппаратуры [1, 2]. В табл. 1 показаны конечные цели проекта HERCULES-A и частные задачи, которые должны были быть решены к моменту окончания проекта (2007 г.) в рамках соответствующих рабочих пакетов.

Таблица 1

Важнейшие целевые показатели и достигнутые результаты

Целевой показатель проекта I.P. HERCULES (A)	Значение	Достигнуто (на 2007 г.)
Удельный расход топлива	-1 %	-1,4 %
Выбросы NO <sub>x</sub>	-20 % (относительно IMO Tier 1)	-50 %
Другие вредные выбросы	-5 %	-20 %, HC
		-40 %, PM
		-90%, SO <sub>x</sub>

HERCULES-B является вторым этапом проекта HERCULES. Проект HERCULES-B был рассчитан на 3 года, начиная с 2008 г.; в нем приняли участие 32 партнера, а его бюджет составил 26 млн евро. Данный проект унаследовал от предыдущего этапа — проекта HERCULES-A — цели и задачи, касающиеся повышения экономических и экологических показателей двигателей.

Вместе с тем, используя результаты проекта HERCULES-A и наработки, полученные в ходе его выполнения, на данном этапе оказалось возможным ограничить область поисков, сосредоточившись на тех областях, где можно было рассчитывать на серьезные прорывы в части снижения удельного расхода топлива (и, соответственно, выбросов CO<sub>2</sub>), а также достижения сверхнизких значений вредных выбросов газов и твердых частиц [2, 4].

Важнейшие целевые показатели и достигнутые результаты по проекту HERCULES-B приведены в табл. 2.

#### HERCULES-C

HERCULES-C — это третий этап программы, в ходе которого осуществляется эффективная интеграция различных технологий, разработанных на этапах I и II. Главная цель проекта HERCULES-C заключается в дальнейшем значительном снижении расходов топлива с одновременной оптимизацией процессов выработки энергии и энергопотребления. Это должно быть достигнуто за счет совершенствования рабочего процесса и технологии впрыска топлива, совершенствования управления выработкой и

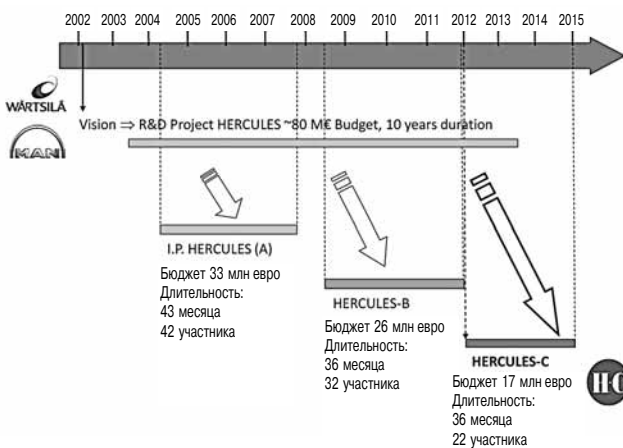


Рис. 1. План-график работ по программе HERCULES

Важнейшие целевые показатели и достигнутые результаты по проекту HERCULES-B

Рабочий пакет	Целевые показатели (по проекту Н-В)	Достигнуто (на 2011 г.)
Двигатели с предельными параметрами	<ul style="list-style-type: none"> <li>Двигатель 2-S, <math>p_{max}</math>: 220 бар. Средняя скорость поршня: 10 м/с</li> <li>Двигатель 4-S, <math>p_{max}</math>: 300 бар. Средняя скорость поршня: 12 м/с</li> </ul>	200 бар, 9 м/с при испытаниях Достигнуто (300 бар)
Сгорание	<ul style="list-style-type: none"> <li>Прозрачная крышка цилиндра для оптического контроля процесса</li> <li>2-тактный дизель с диаметром цилиндра 500 мм</li> <li>4-тактный дизель с диаметром цилиндра 320 мм</li> <li>Параметры горения: 200 бар, 2000 °С</li> <li>Измерено полномасштабное пространственное распределение параметров впрыска и сгорания; выполнена экспериментальная проверка результатов моделирования методами вычислительной гидродинамики</li> </ul>	Компоненты изготовлены Достигнуто
Турбонаддув	Многоступенчатый наддув опытного двигателя, давление наддува 8 бар	Достигнуто
Методы снижения вредных выбросов	<ul style="list-style-type: none"> <li>EGR (Газоочистка) для снижения при испытаниях выбросов <math>NO_x &gt; 50\%</math> относительно ИМО Tier 1</li> <li>Применение SCR на двигателях при работе на высокосернистых топливах</li> </ul>	Достигнуто
		Достигнуто
Оптимизация силовой установки в целом	Утилизационный котел высокого давления в целях достижения при испытаниях общего КПД установки 60 %	В процессе испытаний
Новые материалы. Трение и износ	Снижение трения в поршневых кольцах и в крейцкопфе на 25 %	Достигнуто
Электроника и системы управления	Установка на опытном двигателе отказоустойчивой интеллектуальной системы управления с самообучением	В процессе испытаний

распределением энергии в масштабах судна, а также за счет оптимизации функций двигателя, определяющих качество грузоперевозок.

Следующая конкретная цель HERCULES-C состоит в снижении вредных выбросов до практически нулевого уровня путем комбинации различных технологий, разработанных совместными усилиями на предыдущих этапах.

Для достижения этой цели планируется применение технологии производства экологически чистой продукции, и это пересекается с третьей целью проекта — поддержанием исходных показателей качества двигателей на протяжении всего срока службы. Поставлена задача разработки и использования современных материалов и антифрикционных технологий в целях повышения показателей надежности и безопасности, а также создания датчиков и контрольно-измерительных систем для улучшения управляемости и эксплуатационной готовности судовых силовых установок.

Проект HERCULES-C состоит из 5 тематических рабочих пакетов (WPG). На рис. 2 показано распределение тематики НИР по рабочим группам.

В табл. 3 показаны цели программы HERCULES-C и их корреляция с тематическими группами.

Ожидаемые результаты:

➤ Повышение степени адаптивности многотопливных двигателей для улучшения рабочих параметров при работе на всех видах топлива во всем поле рабочих режимов.

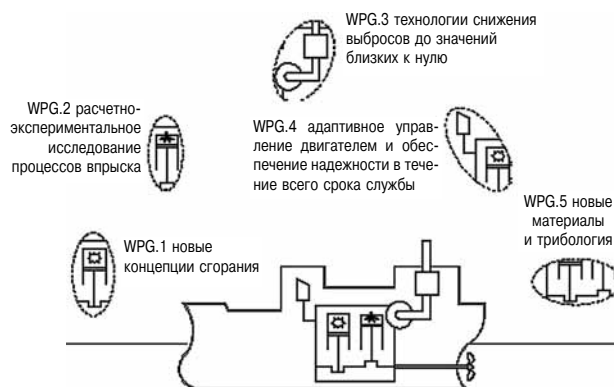


Рис. 2. Схема организации групп (рабочих пакетов) проекта HERCULES-C

➤ Исследование концепции перспективного газового двигателя, имеющей целью достижение предельно возможных показателей по расходу топлива и вредным выбросам.

➤ Создание гибких систем подачи топлива и воздуха для улучшения процесса сгорания при низких температурах, характерных для работы двигателя по циклу Миллера, в том числе на долевых нагрузках.

➤ Разработка перспективных концепций и схем организации горения топливовоздушной смеси.

➤ Для двухтактных двигателей: разработка методов автоматизированного проектирования судовых двигателей следующего поколения, основанных на самых современных методах оптимизации с помощью математических моделей, в на-

## Цели программы HERCULES-C

№ п/п	Цель	Значение	Срок	Пути достижения
1	Значительное снижение расхода топлива (и выбросов CO <sub>2</sub> )	Улучшение расхода топлива на 5 % по сравнению с лучшими современными образцами: например, 2-тактный 9-цилиндровый двигатель MAN B&W, S80 ME-C9, с электронной системой управления, сверхдлинноходовой, диаметр цилиндра 800 мм, расход топлива 168 г/кВт·ч, МЕР 20 бар; 4-тактный 12-цилиндровый двигатель WARTSILA, 12V46, диаметр цилиндра 460 мм, расход топлива 173 г/кВт·ч, МЕР 24 бар	2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Оптимизация производства энергии рабочий процесс (WPG1) процесс впрыска (WPG2) интеллектуальный двигатель (WPG4)</li> <li>■ Оптимизация энергопотребления управление энергоустановкой на новом уровне (WPG4)</li> </ul>
	Снижение CO <sub>2</sub>	На 3 % в рамках проекта Н-С	(2015)	
2	Снижение выбросов NO <sub>x</sub> практически до нулевого уровня	Снижение NO <sub>x</sub> на 95 % относительно ИМО Tier I [Норматив ИМО Tier 1 = (17–9,7) г/кВт·ч в зависимости от номинальной скорости двигателя]	2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Совершенствование: рабочего процесса (WPG1)</li> <li>■ Объединение оптимальных технологий созданных в рамках проектов HERCULES (А) и HERCULES-В в части: наддува (WPG3) очистки газов (WPG3) материалов и смазки (WPG5)</li> </ul>
		Снижение NO <sub>x</sub> на 80 % в рамках проекта Н-С	(2015)	
3	Сохранение исходных параметров в течение всего срока службы установки	Отклонение всех показателей качества от уровня «нового двигателя» в пределах 5 %	Весь срок службы (20 лет)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Совершенствование: датчиков, системы контроля (WPG4) адаптивного управления пар трения (WPG5) материалов (WPG5)</li> </ul>

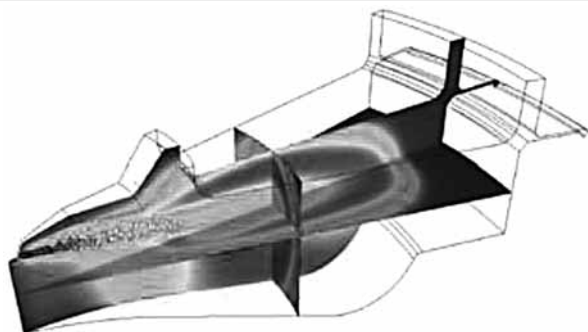


Рис. 3. Результат моделирования процесса сгорания в четырехтактном дизеле (MAN)

стоящее время используемых для расчетов рабочих процессов.

➤ Для четырехтактных двигателей: разработка инновационных методов организации рабочего процесса в целях ограничения вредных выбросов на уровне ИМО Tier 3, адаптация существующих в автомобилестроении технологий очистки ОГ (таких как SCR или фильтры частиц), с использованием методов планирования экспериментов.

➤ Оптимизация компонентов двигателя (например, элементов системы газообмена, форсунок, формы камеры сгорания в поршне, и т. п.) и рабочего процесса с использованием цифровых моделей.

➤ Верификация цифровых моделей методами оптического исследования. Усовершенствованные методы сравнения результатов трехмерного моделирования и двумерного оптического контроля процессов образования и горения факела распыла.

На рис. 3 в качестве примера показан один из первых результатов моделирования рабочего процесса в четырехтактном двигателе.

#### Общий обзор целевых задач для рабочих групп

Ниже приводится краткое содержание и ожидаемые результаты по каждой из рабочих групп.

##### WPG1: новые концепции рабочего процесса

Новаторские конструктивные решения и принципы организации процесса сгорания, направленные на то, чтобы выйти (как минимум) на уровень будущих нормативов, лимитирующих вредные выбросы двухтактных и четырехтактных судовых дизелей. Сюда, в частности, относятся методы переключения между видами топлива, «холодное» сгорание частично готовой рабочей смеси, процесс Миллера в чистом виде, сверхвысокая степень сжатия, рециркуляция отработавших газов (EGR) и адаптивный рабочий процесс.

##### WPG2: Теоретическое и экспериментальное исследование процесса впрыска

Разработка и применение методов моделирования и экспериментального исследования процесса впрыска топлива в судовых дизелях большой размерности. Лазерно-оптические методы исследования поля скоростей потока топлива внутри форсунки и в камере сгорания (в непосредственной близости от форсунки). Визуализация факела распыла при реальных рабочих условиях. Валидация (адекватность) соответствующих гидродинамических моделей.

Ожидаемые результаты:

- Дальнейшая валидация моделей, созданных для оценки влияния внутренней геометрии и параметров форсунки на образование и распространение топливного факела, а также на процессы сгорания и образования вредных выбросов.
- Систематическое исследование по результатам эксперимента характеристик распыла топлива и подробный анализ взаимодействия гидродинамических эффектов внутри форсунки, влияющих на качество распыла топлива и формирование топливовоздушной смеси.
- Ценная экспериментальная информация о кавитации в условиях, типичных для главных судовых дизелей большой размерности. Использование методов лазерной диагностики, таких как PDA и LIF. Использование прозрачных сопел различных форм и размеров.
- Гидродинамическая модель, с помощью которой можно прогнозировать кавитацию в распылителях и других элементах топливной и гидравлических систем. Использование передовых методов, таких как моделирование с помощью метода Эйлера для многофазных жидкостей в целях создания моделей взаимодействия потока внутри форсунки с факелом распыла.
- Использование передовых методов лазерной диагностики, таких как формирование изображений с помощью «баллистических» источников света, которые позволяют увидеть внутреннюю структуру струи топлива, истекающей из сопла форсунки судового двигателя (воспроизведенного в соответствующем масштабе).

На рис. 4 показаны сравнительные результаты визуального наблюдения и моделирования топливного факела.

**WPG3: Методы достижения показателей вредных выбросов, близких к нулю**

Интеграция передовых технологий контроля выбросов, турбонаддува и систем очистки ОГ,



Рис. 4. Сравнение результатов наблюдения (слева) и моделирования (справа) факела распыла (Wartsila)

включая DPF (фильтры частиц), SCR (селективное каталитическое восстановление), очистку в скруббере, применение WIF (водотопливных эмульсий) и EGR (рециркуляция отработавших газов). Применение последовательных и комбинированных систем автонастройки.

Ожидаемые результаты:

- Дальнейшее снижение вредных выбросов за счет совместного использования двухступенчатой системы наддува и новейших систем подачи топлива и воздуха с гибкой настройкой.
- Исследование пределов возможного снижения вредных выбросов за счет совместного применения всех перечисленных выше технологий.
- Применимость фильтров DPF автомобильного типа в среднеоборотных дизелях большой размерности. Минимизация энергопотребления в процессе регенерации и использование новейших методов непрерывной регенерации.
- Дальнейшее совершенствование методов снижения выбросов частиц.
- Целесообразность совместного применения водотопливных эмульсий и EGR для снижения выбросов NO<sub>x</sub>.
- Уменьшение размеров и оптимизация облопачивания рабочих колес в новых турбокомпрессорах в целях повышения их приемистости и соответствующего расширения рабочих областей компрессоров.
- Расчетно-экспериментальное исследование помпажа компрессора, позволяющее добиться

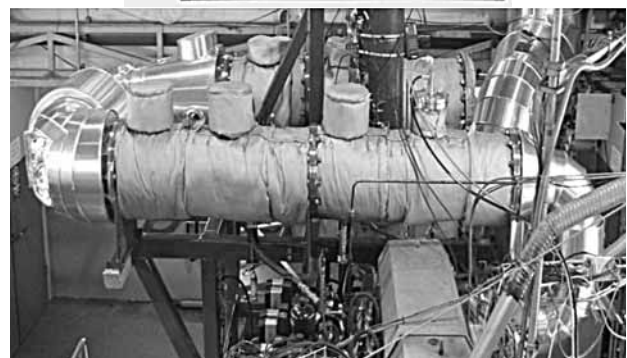


Рис. 5. Результат гидродинамического расчета системы SCR и общий вид ее опытного образца

более эффективного контроля помпажа для повышения приемистости и управляемости системы наддува.

На рис. 5 показаны визуальный результат гидродинамического расчета системы SCR и общий вид ее опытного образца.

#### **WPG4: Адаптивное управление и обеспечение надежности двигателя в течение срока его службы**

Разработка методов оптимизации судовых пропульсивных систем в процессе работы. Средства диагностики на основе математических моделей. Управление тепловым и двигательным режимами гибридных пропульсивных систем. Адаптивное управление, включающее алгоритмы управления отдельными цилиндрами многотопливных двигателей. Управление ресурсами судовых пропульсивных систем.

Ожидаемые результаты:

➤ Переход от управления отдельными подсистемами со статически регулируемыми параметрами к оптимальному управлению системой в целом, с автоматической адаптацией параметров контроллеров.

➤ Новые методы диагностики подсистем двигателя.

➤ Исследование методов технической диагностики, позволяющих планировать применение комплексных систем мониторинга технического состояния.

➤ Разработка, изготовление и испытания (со снятием характеристик) встроенного датчика износа.

➤ Разработка элементов самодиагностики, включая испытания соответствующих моделей и алгоритмов.

➤ Алгоритмы прогнозирования параметров состояния двигателя, включая функцию диагностики отказов.

#### **WPG5: Новые материалы и трибология**

Снижение потерь смазочного масла и соответствующих выбросов. Снижение потерь на трение в подшипниках, поршневых кольцах и парах поршень–втулка цилиндра за счет применения новых материалов. Оптимизация параметров главных подшипников. Снижение потерь тепла через днище поршня. Концепция рециркуляции смазочного масла с мониторингом состояния.

Ожидаемые результаты:

➤ Расчеты и компьютерное моделирование механизмов транспортировки смазочного масла с учетом результатов динамического моделирования поведения поршневых колец, а также геометрических параметров новой системы смазки.

➤ Определение характеристик системы смазки и их влияния на состав и количество вредных

выбросов с помощью новых методов измерения для проверки эффективности новой концепции смазки.

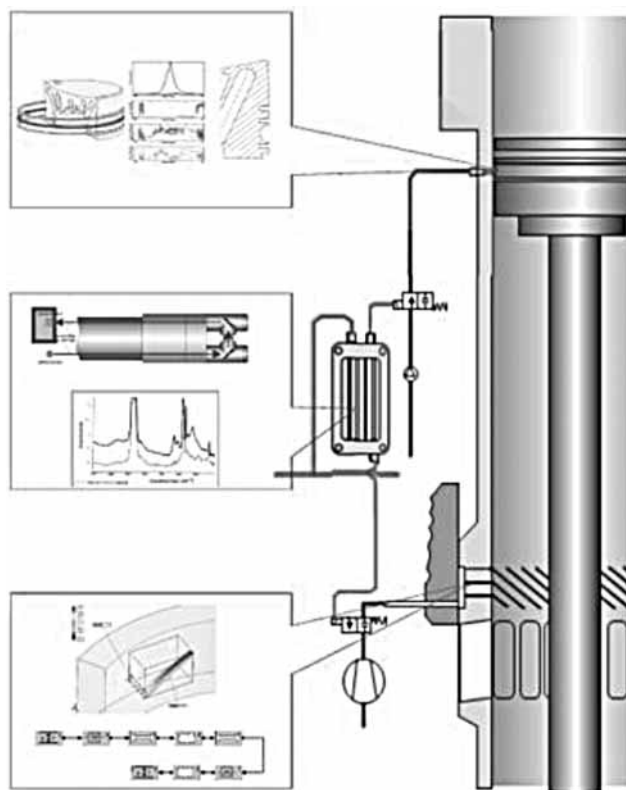
➤ Совместная работа комплекта поршневых колец и системы смазки двухтактного двигателя как единого комплекса — предпосылка для выработки концепции оптимальной системы смазки с улучшенными характеристиками в целях снижения выбросов частиц.

➤ Изменение конструкции опоры главных подшипников с использованием новейшей технологии оптимизации.

➤ Создание модели распределения температур в масляном слое как основы для последующего проектирования главных подшипников с учетом оптимизации параметров охлаждения и других рабочих параметров. Создание стенда для испытаний подшипников, предназначенного для анализа факторов, влияющих на концентрацию усталостных напряжений в главных подшипниках.

➤ Применение в четырехтактных двигателях большой размерности методов снижения трения и износа, принятых в автомобильной промышленности.

➤ Выработка по результатам испытаний новых требований к материалам основы подшипников, а также к материалам и качеству поверхности покрытия. Разработка новой антифрикционной конструкции юбки поршня.



**Рис. 8. Смазка поршневых колец и цилиндровой втулки**

➤ Изготовление основы днища поршня из жаропрочного материала, способного выдерживать воздействие высоких температур, либо применение промышленных технологий нанесения изолирующих покрытий для защиты днища поршня, выполненного из существующего материала.

На рис. 6 показаны методы (подпроекты), смазки поршневых колец и поверхности цилиндровой втулки.

#### Выводы

Проект HERCULES-C вступает в завершающую фазу. За это время достигнуты впечатляющие успехи в реализации программы.

Цель программы HERCULES в самом общем виде можно определить так: надежное и безопасное производство энергии, вырабатываемой судовыми силовыми установками. С самого начала работ над проектом HERCULES в 2002 г. акцент делался на повышение КПД, снижение вредных выбросов и повышение надежности судовых двигателей.

В ходе реализации проекта HERCULES-A (2004–2007) был заложен фундамент будущих исследований. При этом главная цель состояла в сравнительном изучении целого ряда способов снижения вредных выбросов с точки зрения их потенциальной эффективности, и в данном отношении были достигнуты значительные успехи. В рамках проекта HERCULES-B (2008–2011) были продолжены поиски путей снижения выбросов, включая все наиболее современные технологии, однако первоочередное внимание было уделено повышению КПД, результатом чего стало снижение расхода топлива и выбросов CO<sub>2</sub>. Проект HERCULES-C (2012–2015) посвящен эффективной интеграции технологий, разработанных на этапах I и II и направленных на дальнейшее значительное сокращение расхода топлива, достижение близкого к нулю уровня вредных выбросов и сохранение основных рабочих параметров двигателей на протяжении всего срока их службы. При этом ставится задача обеспечить экономичную и эффективную эксплуатацию судовых двигателей в течение всего жизненного цикла, с учетом рационального использования природных ресурсов и уважении к окружающей среде.

Главное отличие программы HERCULES состоит в том, что она не имеет прецедентов. Еще не было случая, когда для осуществления долгосрочной программы была бы собрана столь же мощная группа, объединяющая ведущих мировых производителей судовых двигателей и исследовательские коллективы со своими экспериментальными ресурсами, имеющими общее видение основных направлений создания надежных и эффективных судовых двигателей со сверхнизкими вредными выбросами.

#### Литература

1. *Kyrtatos N., Kleimola M., and Marquard R.* «The HERCULES Project: A major R&D effort for marine engines of high efficiency and low emissions», 25th CIMAC Congress, Vienna, 2007.
2. <http://www.ip-hercules.com>
3. *Kyrtatos N., Hellberg L., and Poensgen C.* «HERCULES-B: The continuation of a major R&D effort towards the next - generation marine diesel engines», 26th CIMAC Congress, Bergen, 2010.
4. <http://www.hercules-b.com>
5. <http://www.hercules-c.com>

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДВУХТОПЛИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТЕКУЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

*Hinrich Mohr, AVL List GmbH, Австрия  
Torsten Baufeld, AVL List GmbH, Австрия*

Мы являемся свидетелями настоящего возрождения двухтопливных двигателей (газодизелей), на этот раз — в секторе большой размерности. В течение долгого времени сфера применения данной технологии ограничивалась стационарными генераторами, но и там ее доля в последнее десятилетие стремительно сокращалась вследствие серьезных успехов, достигнутых в области газовых двигателей с искровым зажиганием; это касается как улучшения показателей качества, так и расширения мощностного диапазона, который теперь охватывает крупные среднеоборотные двигатели. С другой стороны, интерес к двухтопливным двигателям большой размерности, помимо владельцев традиционных стационарных установок, начали проявлять операторы некоторых транспортных средств. Речь идет, главным образом, о главных двигателях таких судов, как газозавозы и круизные лайнеры, а также о вспомогательных двигателях, например, контейнеровозов. Сюда же можно добавить и тепловозные двигатели для магистральных локомотивов. Главная причина возросшего интереса к двухтопливным двигателям (ДД) заключается в топливе, более дешевом по сравнению с тяжелым топливом (НФО) и дизельным топливом (ДТ), а также в возможности снизить выбросы NO<sub>x</sub> в ожидании вступления в силу новых экологических нормативов. Природный газ — это высококалорийное малосернистое топливо, которое в скором времени может стать одним из основных видов топлива для транспортных установок. Наличие в ДД вторичного (жидкого) топлива нередко создает проблемы в стационарных установках, однако для многих транспортных средств это является скорее преимуществом, повышая эксплуатационную надежность системы. Применение ДД на судах облегчает выполнение требований ИМО по ограничению вредных выбросов как в зонах контролируемых выбросов (ЕСА), так и за их пределами, путем простого переключения между жидким топливом и газом. С другой стороны, эксплуатация

ДД в судовых условиях связана с дополнительными проблемами, которые требуют решения, в том числе такими как работа при переменной скорости, быстрые набросы нагрузки, нестабильность состава газа, а также обеспечение надежной работы в тяжелых условиях. Наличие двух принципиально различных режимов работы (на газе и на жидком топливе) порождает необходимость компромиссных конструктивных решений (например, при выборе степени сжатия, формы камеры сгорания, углов открытия и закрытия клапанов и т. д.). Это может приводить к снижению КПД и удельной мощности. Упомянутым аспектам создания ДД было посвящено экспериментальное исследование, проведенное фирмой AVL на опытном одноцилиндровом отсеке среднеоборотного двигателя. В ходе этой работы варьировался целый ряд различных характеристик и исследовались границы рабочих параметров двигателя. Основываясь на полученных результатах, проведена оценка состояния технологий двухтопливных двигателей на сегодняшний день. Сформулированы задачи для дальнейшей работы фирмы AVL над данной технологией и определены промежуточные этапы.

#### Введение

Вот уже несколько лет как газовые двигатели большой размерности стали устанавливаться на транспортных средствах, перестав быть атрибутом исключительно стационарных установок. На сегодняшний день это относится, главным образом, к судовым энергетическим установкам. Однако в последнее время все больший интерес к таким двигателям начинают проявлять еще и операторы железнодорожного транспорта.

Можно ожидать, что в дальнейшем двигатели данного типа малой и средней размерности заинтересуют также операторов речного флота и внедорожной техники. Во всяком случае, внимание к двухтопливным двигателям не ослабевает, благодаря их уникальной способности работать на двух видах топлива — жидком и газообразном. Для оператора это означает возможность выбирать тот или иной вид топлива в зависимости от его доступности и цены. К тому же переход на дизельное топливо всегда остается запасным вариантом в случае возникновения каких-либо проблем при работе на газе.

Фирма AVL работает над проблемами ДД в течение нескольких лет. Помимо работ, выполняемых по заказам промышленности, фирма ведет собственные исследования в области рабочих процессов ДД и оценки перспектив их применения.

Далее рассматриваются причины столь значительного интереса к ДД, а также проблемы, связанные с их созданием. Приводятся примеры прак-

тического применения этих двигателей и оцениваются перспективы их дальнейшего развития.

Доклад посвящен четырехтактным средне- и высокооборотным ДД.

#### Почему это важно

Большой интерес, проявляемый к ДД в настоящее время, обусловлен, главным образом, следующими причинами:

➤ В течение нескольких лет цены на все виды жидкого топлива быстро и неуклонно повышались, тогда как рост цен на газ был сравнительно невелик. Благодаря открытию новых газовых месторождений природный газ сегодня значительно дешевле, чем тяжелое топливо (HFO), особенно в западном полушарии (рис. 1, 2).

➤ Новые нормативы ИМО предписывают, начиная с 2015 г., использовать внутри зон контролируемых выбросов (ЕСА) топлива с массовым содержанием серы не более 0,1 %. Как правило, содержание серы в природном газе близко к нулю, что позволяет выполнить указанное требование ИМО.

➤ Этот аспект представляет также интерес в свете директивы ЕС, касающейся портовых зон, и аналогичного документа ЕРА, формулирующего требования к экологии портовых зон и внутренних водных путей США. Оба указанных документа,

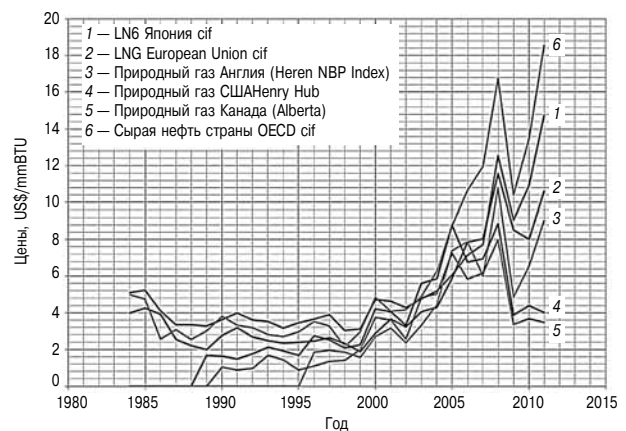


Рис. 1. Динамика изменения цен на газ и нефть [1]



Рис. 2. Порядок мировых цен на LNG по состоянию на январь 2013 г. [2]



уже вступившие в силу, требуют, чтобы массовое содержание серы не превышало 0,1 %. В этой связи судовладельцев могут заинтересовать вспомогательные ДД для установки на крупных морских судах, например, контейнеровозах.

➤ Кроме того, у газовых двигателей выбросы  $\text{NO}_x$  значительно меньше, чем у дизелей. Это означает, что ДД при работе на газе мог бы обеспечить выполнение требований ИМО Tier 3 для ЕСА, вступающих в силу с 2016 г.\*

➤ ДД уже работают на газовозах, эффективно используя испарение природного газа из грузовых танков. Учитывая ожидаемый рост потребности в танкерных перевозках сжиженного природного газа (LNG), эта сфера применения ДД также будет расширяться.

➤ Экономия может быть получена не только за счет более низкой стоимости топлива, но и за счет снижения эксплуатационных расходов, поскольку сгорающий газ, в отличие от НФО, обычно не оставляет после себя твердых отложений. Это позволит увеличить срок службы некоторых компонентов камер сгорания.

Итак, основными причинами использования ДД на флоте являются уменьшение выбросов и возможное снижение расходов. Что же касается тепловозов, то здесь соображения экономии выходят на первое место, поскольку разница в ценах жидкого (дизельного) топлива и природного газа даже больше, чем на судах, где в качестве жидкого топлива используется НФО. Поэтому железнодорожники весьма заинтересованы в замене дизельного топлива природным газом.

#### Проблемы

Существует ряд проблем, которые необходимо будет решить, чтобы добиться внедрения двухтопливных двигателей на транспорте.

Хотя, как уже говорилось выше, природный газ по сравнению со сжиженным газом во многих случаях обладает рядом преимуществ, соответствующая инфраструктура в настоящее время развита достаточно слабо. Чтобы в достаточной мере расширить использование сжиженного газа, потребуются сооружение ряда терминалов в различных районах мира, вблизи основных морских путей и ЕСА. Кроме того, понадобится целый флот малотоннажных танкеров и барж для снабжения и заправки судов. Сети газоснабжения сухопутного транспорта от крупных терминалов LNG могут создаваться по инициативе операторов речного транспорта, железных и шоссейных дорог. Можно ожидать, что, когда использование ДД на транспорте приобретет достаточно широкие масштабы, этот вопрос решится достаточно быстро.

\* Планируемая дата введения в силу ИМО Tier 3 перенесена на 01.01.2021.

Следующая проблема — организация газохранилищ для транспортных ДД. Ожидается, что в абсолютном большинстве случаев предпочтение будет отдаваться именно LNG, поскольку хранение сжатого природного газа (CNG) сопряжено со значительными сложностями, учитывая необходимые объемы, а также требования безопасности, предъявляемые морскими классификационными обществами. В том, что касается хранения, следует учитывать также некоторые особенности LNG, отличающие его от стандартных видов жидкого топлива, таких как MDO или HFO.

➤ LNG требует хранения при температуре  $-163\text{ }^\circ\text{C}$ . Для этого необходимо будет обеспечить соответствующую теплоизоляцию и охлаждение топливных баков.

➤ Низшая теплотворная способность (LHV) и удельный вес LNG составляют порядка 60 % от соответствующих параметров дизельного топлива.

➤ Это обстоятельство, а также наличие теплоизоляции и холодильного оборудования приводят к тому, что для хранения LNG требуется в 3–4 раза больше места, чем для хранения MDO или HFO.

➤ LNG перед поступлением в двигатель требует подогрева для обеспечения температурного уровня, необходимого для работы двигателя.

➤ При наличии длительных перерывов в работе двигателя необходимо учитывать испарение сжиженного газа, особенно в танках большого объема, типичных для судовых установок.

➤ Работа газового двигателя в составе транспортного средства во многих отношениях отличается от его работы в составе стационарного мотор-генератора. Во всех случаях придется учитывать возможность работы в полностью автономном режиме, чаще — при постоянной скорости, но иногда и при переменной скорости. Вопросом первостепенной важности во всех случаях остается обеспечение хорошей динамики (приемистости) двигателя.

При изменении уровня газа в танке состав его может меняться, что наиболее заметно проявляется в танках большого размера. Чем меньше газа в танке, тем большей оказывается относительная доля высших углеводородов (этана и пропана) в составе газа. При этом возрастает склонность топлива к детонации.

Двигатель должен устойчиво и надежно работать на газе при любых обстоятельствах. Для этого система управления двигателем (ECS) должна всегда поддерживать рабочий режим на достаточном удалении от границ зон детонации и пропуска всплеск. Опыт показывает, что повышение среднего эффективного давления (BMEP) ведет к сужению зоны допустимых рабочих ре-

жимов. В случае возникновения достаточно серьезных сбоев при работе на газе всегда остается возможность переключиться на жидкое топливо в качестве запасного варианта. Для морских судов такая возможность является обязательной согласно требованиям классификационных обществ.

Оптимальная степень сжатия для дизелей находится в диапазоне от 15 до 17. Для газовых двигателей она не превышает 12–13 ввиду опасности детонации, характерной для цикла Отто. Поэтому для ДД должна быть обеспечена возможность подстройки степени сжатия к условиям работы на газе. Форма камеры сгорания определяется спецификой процессов впрыска и сгорания в дизеле. Отсюда следует необходимость поиска компромисса между обоими топливными режимами, хотя КПД при этом будет, естественно, хуже, чем у чисто дизельного или чисто газового двигателя.

Видимо, подобным компромиссом и объясняются относительно низкие значения ВМЕР в современных ДД. Большинство современных ДД имеет ВМЕР не более 20 бар, хотя в дизелях он обычно составляет от 26 до 28 бар, а в чисто газовых двигателях — от 22 до 24 бар.

Природный газ часто характеризуют как чистое топливо. Выбросы  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$  у газовых двигателей значительно ниже, чем у двигателей, работающих на дизельном топливе или мазуте (рис. 3). Поскольку газ, как правило, не содержит серы, ОГ газового двигателя практически свободны также и от  $\text{SO}_x$ . Кроме того, сгорание газа почти не оставляет после себя твердых частиц.

С другой стороны, для газового двигателя характерны выбросы несгоревших углеводородов, состоящих, в основном, из метана ( $\text{CH}_4$ ). Причины их возникновения:

- прорыв части топливного газа с линии всасывания на выход в период перекрытия клапанов;
- наличие мертвых объемов (например, выемки в днище поршня);
- эффект гашения факела вблизи стенок камеры сгорания.

Метан обладает парниковым эффектом в двадцать раз более сильным, чем  $\text{CO}_2$ , поэтому такие выбросы должны быть сведены к абсолютному минимуму. Иначе газовые двигатели по создаваемому ими парниковому эффекту могут превзойти дизельные.

Снижение выбросов метана достигается следующими мерами:

- оптимизация подачи газа и углов открытия (закрытия) клапанов;
- уменьшение мертвых объемов;
- увеличение турбулентности и температур вблизи стенок камеры сгорания.

Все эти рекомендации могут показаться до-

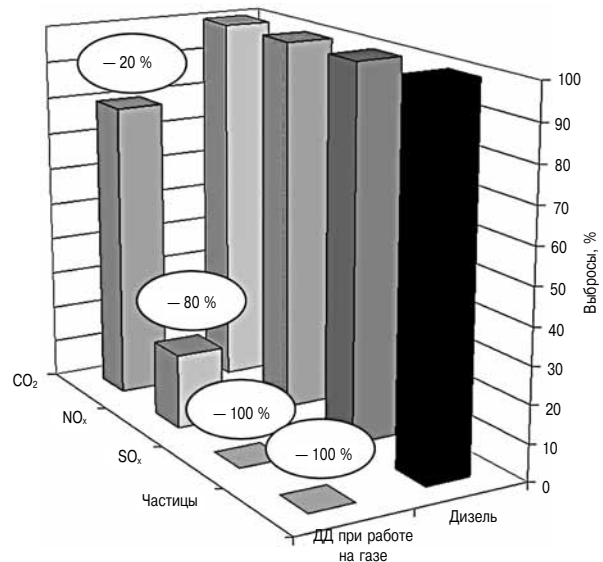


Рис. 3. Сравнение выбросов при работе ДД на дизельном топливе и на газе

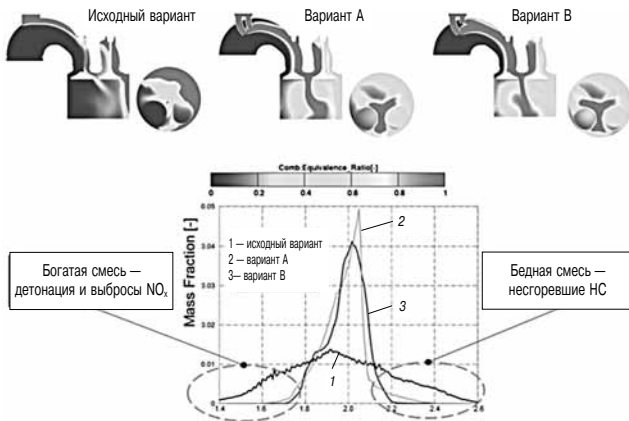
статочно очевидными, однако, чтобы найти практичные и надежные решения, нужно провести огромный объем работы по проектированию, моделированию и испытаниям.

На рис. 4 и 5 показано несколько взятых для примеров результатов 3D-моделирования аэродинамических процессов, проведенного AVL для оптимизации параметров подачи газа и углов газораспределения.

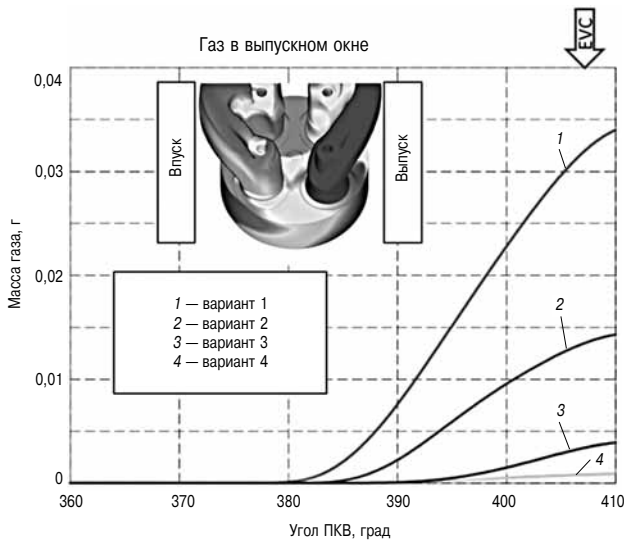
Нетрудно видеть, что в исходном варианте характер распределения топлива на середине хода поршня является неудовлетворительным, результатом чего — высокая вероятность детонации, значительные выбросы  $\text{NO}_x$  и несгоревших НС. Изменение варианта подачи газа привело к явному улучшению распределения топлива.

На рис. 5 видно, насколько сильно изменение углов подачи газа повлияло на величину выброса несгоревшего газа на выпуске.

Для зажигания в ДД используется впрыск в камеру сгорания небольшого количества дизельного топлива (так называемого пилотного топлива). Пилотное топливо самовоспламеняется из-за высокой температуры сжатия и зажигает газоздушную смесь, сгорание которой происходит по циклу Отто. Для того чтобы выполнялись требования нормативов по выбросам  $\text{NO}_x$  (например, TA Luft, IMO Tier 3, US EPA Tier 4), необходимо, чтобы при полной нагрузке энергия пилотного топлива составляла порядка 1 % от всей энергии топлива, подаваемого в двигатель. Для обеспечения стабильной и надежной подачи столь малого количества топлива нужно, помимо основной системы подачи дизельного топлива, иметь отдельное устройство топливоподачи. Задача оптимального встраивания дополнительной форсунки в головку цилиндра



**Рис. 4. Распределение коэффициента избытка воздуха при различных вариантах подачи газа**



**Рис. 5. Влияние углов подачи газа на выбросы газа в линию выпуска**

является сама по себе достаточно сложной. Такое решение не только связано со значительным объемом конструкторских и расчетных работ, но и влечет за собой дополнительные затраты.

Для тех областей применения, где нормативы выбросов  $\text{NO}_x$  не столь жесткие, представляет интерес возможность замены максимально возможного количества жидкого топлива сжатым или сжиженным природным газом. В подобных случаях целесообразно сохранить стандартную систему впрыска дизельного топлива, а количество впрыскиваемого дизельного топлива варьировать в зависимости от требуемой пропорции замещения газа. Однако опыт эксплуатации ДД с обычной топливной аппаратурой показывает, что возникающие при этом соотношения между дизельным топливом и газом чреваты серьезными нарушениями рабочего процесса, поэтому такой вариант не рекомендуется [4]. Влияние данного эффекта в значительной степени зависит от типа двигателя. Вот почему, во избежание потери устойчивости работы двигателя и возникновения детонации,

система управления (ECS) должна включать в себя рабочие профили и запретные зоны.

Еще одна задача, которую предстоит решить, — это создание эффективной системы защиты, требования к которой значительно выше, чем для дизеля (в особенности судового). Это потребует не только большого объема НИР и ОКР, но и дополнительных затрат. Вот лишь часть проблем, которые предстоит при этом решить:

- минимизация объема воспламеняемых смесей, в особенности в газоздушном тракте;
- установка предохранительных клапанов на сторонах всасывания и выпуска, в картере и в корпусе кулачкового вала;
- обнаружение утечек газа из линии подачи и вокруг двигателя;
- резервирование за счет размещения нескольких двигателей в отдельных машинных помещениях, или альтернативные решения, как, например, дополнительный привод гребного вала от электродвигателей, питаемых вспомогательными генераторами (принцип «добраться до причала»)

Классификационные общества постепенно расширяют действующие правила применения газовых двигателей на судах по мере накопления практического опыта.

**Опыт**

В последнее время фирма AVL инициировала, а также провела собственные исследования специфики рабочих процессов ДД с тем, чтобы определить границы рабочих режимов с учетом накопленного на сегодняшний день опыта. Некоторые результаты этих исследований уже опубликованы [5].

Большой объем подобных исследований был выполнен на опытном одноцилиндровом отсеке среднеоборотного двигателя AVL (рис. 6), который мог работать как дизель, чисто газовый двигатель или газодизель. Технические характеристики каждой конфигурации приведены в таблице. Полное техническое описание установки приведено в [6].

Недавно фирмой было проведено исследование работы ДД на газе при высоких значениях ВМЕР. Оно включало систематическую оценку влияния таких факторов, как:

- степень сжатия;
- цикл Миллера;
- характеристики форсунки пилотного топлива и рабочие параметры, например
  - уровень ВМЕР;
  - скорость двигателя;
  - количество пилотного топлива и фазирование его впрыска;
- коэффициент избытка воздуха;
- степень EGR;
- качество газа.



Рис. 6. Среднеоборотный отсек AVL типа SCE

**Технические характеристики  
среднеоборотного отсека AVL типа SCE**

Тип двигателя	FM250
Применение	Тепловозный/судовой
Размерность, мм×мм	250 × 320
Объем цилиндра, л	15,7
Топливо	Природный газ метановое число = 90
Номинальная скорость, об/мин	1000
Средняя скорость поршня, м/с	10,7
Цилиндровая мощность, кВт	макс. 393
Номинальное среднее эффективное давление, бар	макс. 30
Макс. давление сгорания (термодинам. предел), бар	макс. 220 (головка цилиндра)
Система впрыска пилотного топлива	Система Bosch типа Common Rail
Способ подачи газа	Центральное смесеобразование
Норма выбросов NO <sub>x</sub>	ИМО Tier 3 < 2 г/кВт·ч

При работе на газе допустимая величина выбросов была установлена на уровне менее 2 г/кВт·ч, ориентируясь на нормативы ИМО Tier 3 в качестве целевого показателя.

При проведении испытаний необходимо было учесть некоторые ограничения, отличающие опытную установку от реального многоцилиндрового двигателя. На двигателе SCE имеется только форсунка пилотного топлива, что исключало возможность работы в дизельном режиме, а также возможность переключения режимов. Газ подавался через смеситель, а не через впускной газовый клапан, обычно используемый для этой цели. Это гарантировало более равномерное смесеобразование. Постоянная подача газа обусловила необходимость минимизации угла перекрытия клапанов, во избежание чрезмерного выброса газа в выпускной тракт и связанных с этим насосных потерь.

Ниже показаны некоторые наиболее характерные результаты, полученные при испытаниях.

Максимально возможное значение среднего эффективного давления ВМЕР для данной конфигурации двигателя составило порядка 27 бар. Это демонстрирует потенциальные возможности повышения параметров газодизеля в будущем. Как и ожидалось, максимальные значения КПД были получены при высоком уровне ВМЕР, при условии раннего начала впрыска пилотного топлива. Хотя уровень выбросов NO<sub>x</sub> составил менее 2 г/кВт·ч, было достигнуто значение КПД свыше 45 % (рис. 7), при этом сгорание было вполне устойчивым (разброс индикаторного эффективного давления ИМЕР составил менее 3 %). Доля впрыскиваемого пилотного топлива варьировалась в пределах от 0,5 до 8 %, чтобы проверить ее влияние на КПД двигателя и максимальное давление сгорания.

Интересно, что наибольший эффективный КПД был получен при низких значениях этого показателя — в пределах 1 % (по подводимой энергии). При увеличении доли пилотного топлива наблюдалось падение КПД (рис. 8).

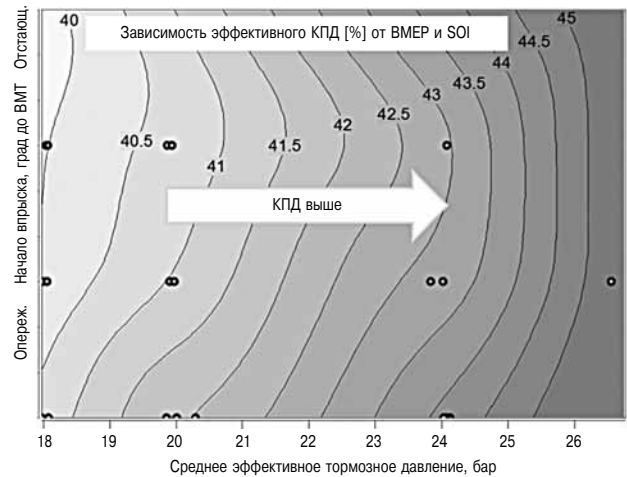


Рис. 7. Зависимость эффективного КПД от ВМЕР и угла начала впрыска пилотного топлива

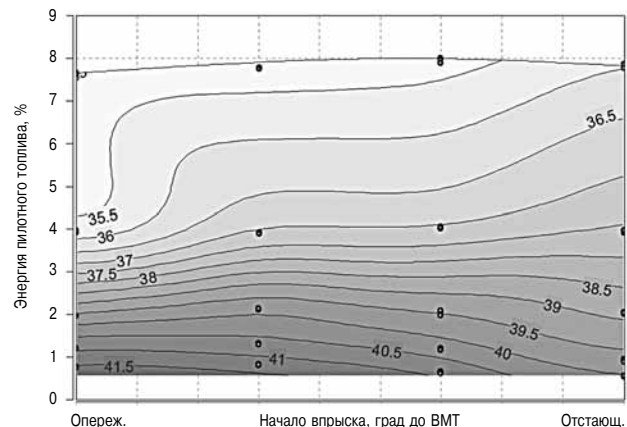
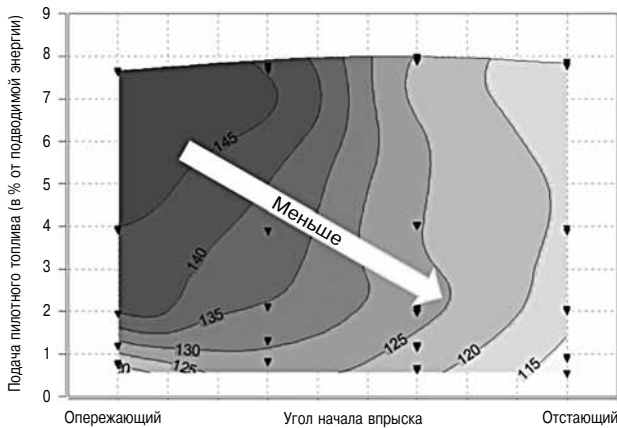
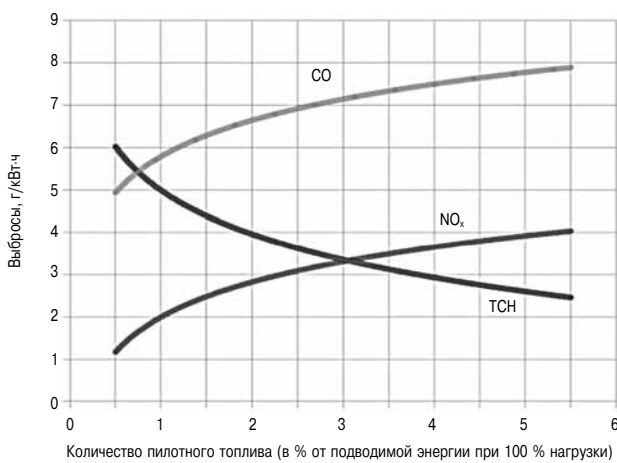


Рис. 8. Зависимость эффективного КПД от количества пилотного топлива и ВМЕР (при лимите NO<sub>x</sub> 2 г/кВт·ч)



**Рис. 9.** Зависимость максимального давления сгорания от угла начала впрыска и количества пилотного топлива при  $ВМЕР = const$  и  $NO_x = 2 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$



**Рис. 10.** Зависимость выбросов от количества пилотного топлива при  $ВМЕР = const$  и  $\alpha = const$

Повышение доли пилотного топлива вызывало также рост выбросов  $NO_x$ . Поэтому пришлось повышать общий коэффициент избытка воздуха с тем, чтобы выбросы  $NO_x$  не превысили  $2 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ . Это привело к замедлению сгорания, сопровождаемому не только снижением выбросов  $NO_x$ , но и одновременным ростом выбросов  $HC$ , а также падением КПД.

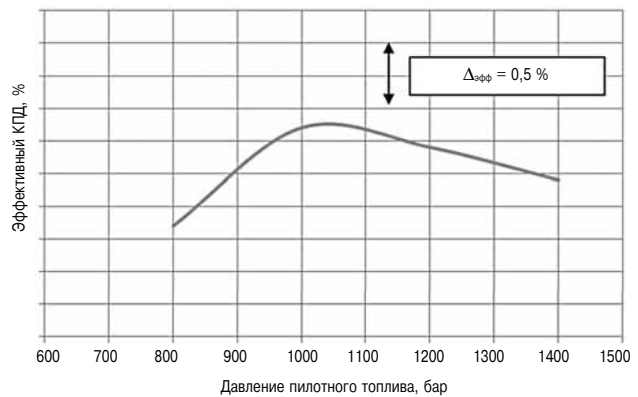
Повышение коэффициента избытка воздуха, происходившее одновременно с увеличением доли пилотного топлива (для сохранения выбросов  $NO_x$  в допустимых пределах), вело к увеличению максимального давления сгорания. При позднем начале впрыска (SOI) процесс сгорания заметно сдвигался вправо от ВМТ, что предотвращало рост максимального давления сгорания (рис. 9).

Влияние количества пилотного топлива на выбросы в последние годы служило предметом оживленных дискуссий, в первую очередь в том, что касается выбросов  $NO_x$ , зависимость которых от количества пилотного топлива предполагалась линейной.

Кривые изменения выбросов  $NO_x$ ,  $CO$  и  $ТНС$  в зависимости от количества пилотного топлива показаны на рис. 10. В целях настоящего исследования значения  $ВМЕР$  и давления наддува поддерживались постоянными, а количество пилотного топлива изменялось. Особенно сильный рост выбросов отмечался при малых количествах пилотного топлива — он был заметно выше, чем при больших объемах пилотного топлива. С ростом мощности источника зажигания длительность процесса сгорания уменьшается, пока относительное количество пилотного топлива не достигнет уровня порядка  $2 \%$ . Дальнейшее увеличение подачи пилотного топлива не приводит к изменению скорости горения. Из-за увеличения продолжительности впрыска топливо, попадающее в цилиндр на поздней стадии впрыска, не улучшает горения газа. Небольшое снижение коэффициента избытка воздуха приводит к уменьшению выбросов  $ТНС$ , зато повышаются выбросы  $CO$  из-за неполного сгорания.

Давление впрыска влияет на КПД двигателя весьма заметно (рис. 11). В эксперименте давление впрыска менялось в диапазоне от  $800$  до  $1400$  бар. Лучший результат для стендового двигателя был достигнут при уровне давления впрыска чуть выше  $1000$  бар. Правильный выбор давления впрыска может обеспечить рост КПД на величину до  $1 \%$ , что говорит о важности данного параметра.

На рис. 12 показаны кривые изменения некоторых параметров при работе двигателя по винтовой характеристике. Чем ниже скорость двигателя, тем позже должен начинаться впрыск, чтобы разброс значений  $ИМЕР$  не превысил  $2 \%$ . Кроме того, по мере снижения скорости количество пилотного топлива пришлось увеличивать для обеспечения гарантированного зажигания газа, хотя значение выбросов  $NO_x$  сохранялось постоянным на уровне  $2 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ . При снижении скорости и нагрузки двигателя его КПД заметно падает.



**Рис. 11.** Зависимость эффективно КПД от давления пилотного топлива при подаче пилотного топлива  $1 \%$

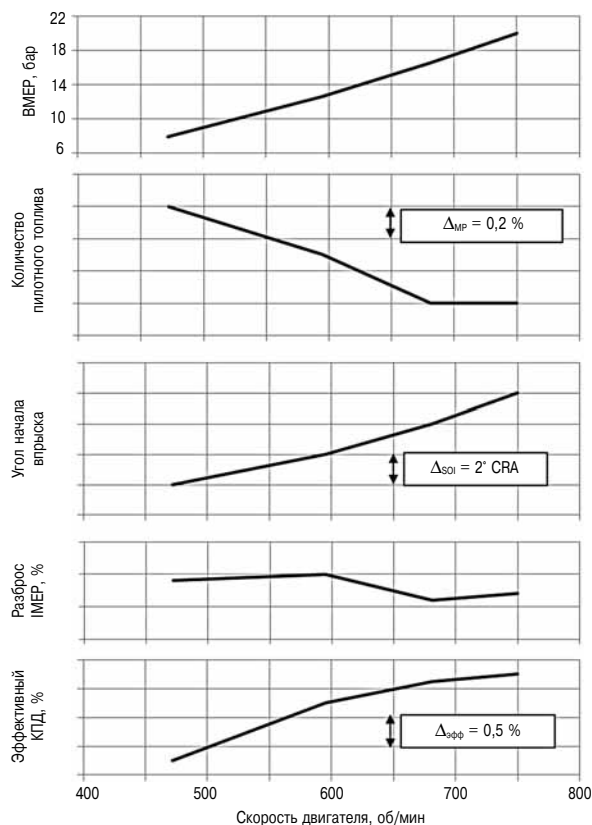


Рис. 12. Зависимость рабочих параметров от скорости

На рис. 13 показаны результаты эксперимента с изменением степени рециркуляции отработавших газов до 20 %.

Угол начала впрыска пилотного топлива поддерживался постоянным, а уровень выбросов  $NO_x$  опять-таки сохранялся в пределах 2 г/кВт·ч.

При повышении степени EGR коэффициент избытка воздуха может быть снижен. Это оказывает сильное влияние на КПД двигателя, особенно при высоких значениях степени EGR. При повышении степени EGR снижаются выбросы CO и THC благодаря уменьшению коэффициента избытка воздуха (при сохранении постоянства выбросов  $NO_x$ ). Период задержки зажигания и длительность горения при этом почти не меняются. Замедление сгорания, вызванное EGR, снижает чувствительность двигателя к детонации при работе на газе. Следовательно, EGR может рассматриваться в качестве одного из средств повышения значений BMEP и степени сжатия, что способствует повышению КПД двигателя в дизельном режиме. При работе на газе возможности повышения КПД за счет увеличения BMEP и степени сжатия следует сопоставить с одновременным снижением КПД за счет замедления сгорания.

#### Перспективы

Перспективы ДД на будущее выглядят довольно многообещающе. К существующим газозам и судам снабжения прибрежной зоны (OSV) с ДД добавился большой паром, предназначенный

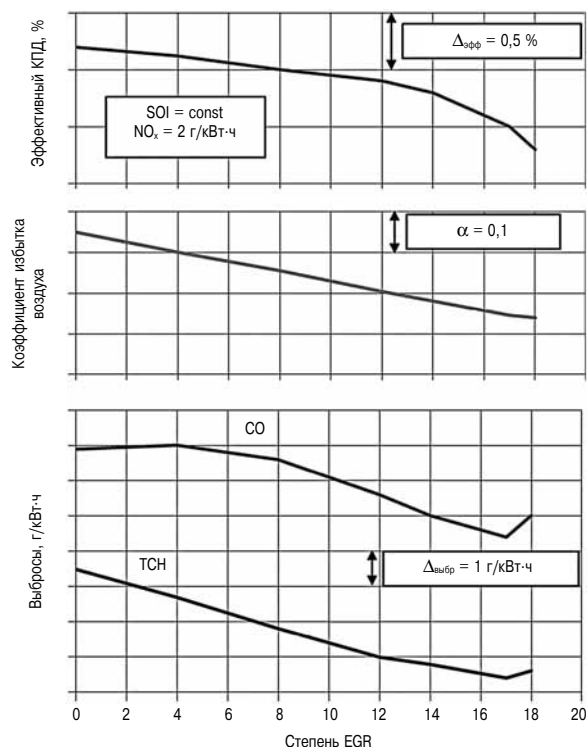


Рис. 13. Влияние степени EGR на параметры двигателя

для работы в Балтийском море, который недавно был передан заказчику [7]. Кроме того, заказаны два контейнеровоза с ДД в качестве главных судовых двигателей [8]. И наконец, можно ожидать, что в течение нескольких лет ДД найдут себе применение в указанных видах транспорта в качестве:

- главных двигателей речных и каботажных судов;
- вспомогательных двигателей больших сухогрузов;
- двигателей магистральных тепловозов;
- главных двигателей больших сухогрузов.

В первых трех случаях больше всего подходят 4-тактные среднеоборотные ДД. В последнем случае будут, скорее всего, использоваться 2-тактные малооборотные ДД.

По оценке AVL, для решения обозначенных выше проблем предстоит большой объем исследовательских работ, направленных, в частности, на расширение сферы применения ДД на и разработку требований к этим двигателям.

Дать энергичный начальный толчок подобному циклу исследований может база данных, созданная по результатам испытаний опытного двигателя AVL DF.

Сформулируем основные задачи, которые на сегодняшний день представляются первоочередными. Различные приоритеты — снижение расходов на топливо, с одной стороны, и выполнение все более жестких требований к выбросам  $NO_x$  — приводят к разным концепциям ДД.

Одной из важнейших целей дальнейшего развития ДД является преодоление или, по крайней мере, минимизация противоречия между требованиями дизельного и газового режимов. Это позволило бы значительно улучшить как экономические, так и экологические показатели двигателей.

Следующая задача — постепенное повышение среднего эффективного давления при работе на газе до 28 бар. Для этого нужно искать способы, позволяющие снизить риск возникновения детонации, такие как, например, регулирование углов газораспределения в широком диапазоне и изменение формы камеры сгорания, в сочетании с двухступенчатым наддувом, рециркуляцией отработавших газов и альтернативными методами организации зажигания. Данные шаги представляются наиболее очевидными, причем их реализацию следует увязать с мероприятиями по резкому уменьшению потерь метана при продувке.

Не менее важен систематический и детальный анализ КПД двигателя и механических потерь. В некоторых случаях для этого может потребоваться построение новых математических моделей, а также интеграция этих моделей, наряду с результатами лабораторных и эксплуатационных испытаний в реальном времени. Такое моделирование поможет выявить пределы возможностей дальнейшего совершенствования двигателей, найти новые конструктивные решения и пути использования альтернативных материалов.

Заслуживает внимания также изучение влияния отношения хода поршня к диаметру цилиндра на КПД двигателя. Эта тема имеет непосредственное отношение к проблеме предельно допустимой скорости поршня, которая для машин данного класса составляет в настоящее время порядка 12 м/с. Увеличение отношения хода поршня к диаметру цилиндра в сочетании со снижением скорости двигателя может привести к улучшению его КПД, хотя и ценой удорожания конструкции. Это удорожание, однако, должно окупиться за счет достигнутой экономии топлива.

#### Выводы

Одним из факторов, вызвавших повышенный интерес к ДД, стало предстоящее вступление в силу новых нормативов ИМО, которые предусматривают снижение выбросов NO<sub>x</sub> от судовых двигателей в зонах контролируемых выбросов (ЕСА) на 80 % по сравнению с ИМО Tier 1. Эти двигатели при работе на газе обеспечивают выполнение соответствующих нормативов без очистки отработавших газов. Они могут представить интерес и применительно к стационарным установкам, для которых экологические нормативы также вскоре должны быть ужесточены. Нужно, кроме того, учесть сохранение цены природ-

ного газа на относительно низком уровне по сравнению со стандартными видами жидкого топлива, на которые в последние годы наблюдался резкий рост цен. Поэтому переход на газ экономически выгоден операторам морского и железнодорожного транспорта. Общая тенденция — расширение области применения ДД, традиционно использовавшихся лишь в стационарных установках, на транспортные средства. Значительный потенциал ДД и большой интерес, проявляемый к ним во всем мире, обусловили нынешнее интенсивное развитие этих двигателей, которое в будущем обещает еще ускориться.

Существует ряд аспектов, отличающих характер работы ДД на газе в стационарных и транспортных установках. Помимо необходимости создания мировой системы газоснабжения, а также роста требований к удельной мощности и КПД двигателей, есть еще ряд проблем, требующих решения, в том числе надежная работа при переменной скорости, минимизация противоречий между требованиями газового и дизельного режимов, унос метана при продувке и требования безопасности.

В AVL давно поняли необходимость и важность разработок данного типа двигателей. Участвуя в различных проектах создания ДД, фирма в то же время ведет собственные исследования, позволившие накопить значительный опыт и теоретический багаж в данной области. Несколько примеров таких работ приведены в настоящей публикации.

Перспективы ДД представляются весьма многообещающими, особенно если удастся решить упомянутые выше проблемы. Некоторые из указанных проблем могут быть решены уже сегодня. Уже в ближайшие годы производители, разработчики и операторы смогут в полной мере оценить и использовать результаты ведущейся в настоящее время интенсивной работы над созданием и совершенствованием двухтопливных двигателей.

#### Литература

1. BP Statistical Review of World Energy, June 2012.
2. Federal Energy Regulatory Commission, [www.ferc.gov/oversight](http://www.ferc.gov/oversight).
3. Legal Regulations Shipping, MAN Diesel & Turbo 2013.
4. [www.mandieselturbogreentechnology.com](http://www.mandieselturbogreentechnology.com).
5. Grosshans, G. «Development of a 1200 kW/cyl low pressure Dual-Fuel Engine for LNG-Carriers», CIMAC Congress, 1998, Copenhagen.
6. Baufeld, T., Lustgarten, G., Murakami, S. and Stoeve, C. «Combustion Concepts for Future Gas Engines», 13th Symposium of the Working Process of the Internal Combustion Engine, 2011, Graz.
7. Kling, W. H. and Greylinger, W. «The new AVL Medium Speed Single Cylinder Engine» ASME, 2003, Salzburg.
8. «Viking Grace delivered» Ship & Offshore Newsletter, 14th Jan. 2013.
9. «First order for low-speed, dual-fuel engine» Ship & Offshore Newsletter, 7th Dec. 2012.

УДК 621.431.74

**Сорокин В.А. Производство современных среднеоборотных судовых дизелей // Двигателестроение. — 2013. — № 3. — С. 3–8.**

**Ключевые слова:** среднеоборотные судовые дизели, технический уровень, сравнительный анализ, конструирование, совершенствование производства.

Приведены результаты сравнительного анализа технического уровня современных среднеоборотных судовых дизелей, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами. Разработаны предложения по модернизации, созданию новых конкурентоспособных судовых дизелей российского производства.

Табл. 5. Библ. 3 назв.

УДК 621.436

**Камалтдинов В.Г., Драгунов Г.Д., Марков В.А. Прогнозирование показателей рабочего цикла НССИ двигателя с наддувом при различных нагрузках и частотах вращения коленчатого вала // Двигателестроение. — 2013. — № 3. — С. 9–15.**

**Ключевые слова:** НССИ двигатель, рабочий цикл, диметилэфир, природный газ, скорость сгорания, индикаторные показатели.

На основе новой модели горения топлива разработана методика расчета рабочего цикла НССИ двигателя с получением текущих значений тепловыделения, теплоотдачи, изменения массы, объема и состава рабочего тела в цилиндре ДВС. Выполнены расчеты индикаторных показателей рабочего цикла НССИ двигателя с наддувом при различных нагрузках и частотах вращения коленчатого вала. Табл. 1. Ил. 5. Библ. 14 назв.

УДК 621.431

**Обозов А.А., Таричко В.И. Совершенствование технического диагностирования автомобильных двигателей на основе применения методов статистической теории распознавания образов // Двигателестроение. — 2013. — № 3. — С. 16–22.**

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, алгоритм технического диагностирования, имитация неисправностей.

Представлены методические основы построения алгоритмов диагностики неисправностей двигателей автотракторного типа с применением методов статистической теории распознавания образов. Рассмотрен частный случай распознавания нарушения герметичности камеры сгорания на примере автомобильного карбюраторного двигателя ГАЗ-52 (6С48,2/11) для режима стартерной прокрутки. Табл. 3. Ил. 5. Библ. 13 назв.

УДК 621.74.047

**Марукович Е.И., Бевза В.Ф., Груша В.П., Богданов Б.И., Красный В.А. Литье полых цилиндрических заготовок из чугуна методом пристеночной кристаллизации // Двигателестроение. — 2013. — № 3. — С. 23–27.**

**Ключевые слова:** заготовки гильз цилиндров, чугунное литье, кристаллизатор, плотность теплового потока, скорость затвердевания, структура чугуна.

Разработан новый метод литья полых цилиндрических заготовок гильз цилиндров без применения стержня. Проведен анализ формирования отливок из чугуна с пластинчатым графитом при высокой интенсивности теплоотвода. Показано, что новый метод литья обеспечивает получение заготовок с заданным фазовым составом и

повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Табл. 1. Ил. 3. Библ. 9 назв.

УДК 621.436

**Терегулов Т.И., Черноусов А.А. Программный пакет ALLBEA: расчетный анализ и синтез характеристик газообмена дизеля с турбонаддувом // Двигателестроение. — 2013. — № 3. — С. 28–32.**

**Ключевые слова:** двигатели внутреннего сгорания, рабочие процессы, математические модели, численное моделирование, пакеты прикладных программ, информационное обеспечение.

Обсуждается организация расчетов на ЭВМ процессов в ДВС как многоэтапных проектов в контексте расчетно-экспериментальной методологии. Отмечается важность автоматизации расчетных работ различными программными средствами. На примере расчетного анализа и оптимизации процессов газообмена дизеля 12СН15/18 показаны преимущества использования моделей из пакета программ ALLBEA. Ил. 3. Библ. 6 назв.

УДК 621.433.2

**Ефремов Б.Д., Рок Д.М. Система управления двигателем при питании сжиженным газом // Двигателестроение. — 2013. — № 3. — С. 33–35.**

**Ключевые слова:** схема управления двигателем, питание сжиженным нефтяным газом, корректировка программы, дозирование топлива.

Рассмотрена система управления двигателем при работе на сжиженном нефтяном газе при сохранении штатной системы управления. Предусмотрена возможность введения корректировки программы управления дозировкой топлива. Ил. 4.

УДК 621.43

**Андрусенко О.Е., Матвеев Ю.И. Необычный автограф Рудольфа Дизеля (социальное мировоззрение изобретателя) // Двигателестроение. — 2013. — № 3. — С. 36–38.**

**Ключевые слова:** Рудольф Дизель, малоизвестная книга, социальное мировоззрение изобретателя, переписка с А.М. Горьким.

Статья знакомит читателей с социальным мировоззрением Р. Дизеля, основные принципы которого изложены в малоизвестной книге изобретателя, подаренной русскому писателю А.М. Горькому. Ил. 2. Библ. 2 назв.

УДК 621.436

**Мельник Г.В. Развитие двигателестроения за рубежом (по материалам конгресса СИМАС 2013) // Двигателестроение. — 2013. — № 3. — С. 39–53.**

**Ключевые слова:** научный проект HERCULES, автоматизация проектирования, двигатель с предельными показателями, пределы снижения выбросов, стабильность рабочих параметров, технологии снижения выбросов, сжиженный природный газ, двигатели двойного топлива. Приводятся предварительные итоги комплексного научного проекта HERCULES, выполняемого фирмами MAN и Wartsila при финансовой поддержке Евросоюза. Цель проекта — оценка возможных пределов снижения вредных выбросов транспортных и судовых дизелей за счет применения различных технологий, при сохранении достигнутых показателей экономичности. Выполнен анализ проблем применения газодизельного рабочего цикла, рассмотрены направления и способы их решения. Табл. 4. Ил. 21. Библ. 14 назв.



UDC 621.431.74

**Sorokin V.A. Modern Medium Speed Marine Diesel Engines** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2013. — № 3. — P. 3–8.

**Keywords:** medium speed marine diesel engines, technical level, comparative analysis, design, improvement in technologies.

The article provides comparative analysis of modern medium speed marine diesel engines from leading international manufacturers. The analysis is added with recommendations on ways of development of new competitive domestic-made marine diesel engines and modernization of existing models. 5 tables, 3 ref.

UDC 621.436

**Kamaltidinov V.G., Dragunov G.D. and Markov V.A. Supercharged HCCI Engine: Prediction of Combustion Parameters at Varying Load and Speed** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2013. — № 3. — P. 9–15.

**Keywords:** HCCI engine, working cycle, dimethyl ether, natural gas, combustion velocity, indicating parameters.

A new combustion model was offered. The model was used as a basis to develop a new method of analysis of HCCI engine combustion process, which would yield current values of heat release rate, heat transfer, and changes in working medium mass, volume and composition. Indicated parameters of combustion process in supercharged HCCI were calculated for varying load and speed values.

1 table, 5 ill., 14 ref.

UDC 621.431

**Obozov A.A. and Tarichko V.I. Stochastic Image Recognition Theory as a Means to Improve Technical Diagnosis of Car Engines** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2013. — № 3. — P. 16–22.

**Keywords:** internal combustion engine, technical diagnosis algorithm, fault simulation.

The article discusses methods of elaboration of technical diagnosis algorithms for car and tractor engines based on stochastic image recognition theory. The approach in question is exemplified in detection of combustion chamber leakage in type 6CH8,2/11 engine (powering GAZ-52 lorry) during starter cranking.

3 tables, 5 ill., 13 ref.

UDC 621.74.047

**Marukovich E.I., Bevza V.F., Grusha V.P., Bogdanov B.I. and Krasny V.A. Moulding of Hollow Cast Iron Bars with Wall Crystallization Method** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2013. — № 3. — P. 23–27.

**Keywords:** cylinder sleeve blanks, iron casting, crystallizer, heat flow density, rate of solidification, cast iron structure.

A new method is offered for coreless moulding of hollow cast iron bars. The article includes the analysis of formation of flakish graphite cast iron moulding, making use of high heat removal rate. The new method results in mouldings with given composition and improved mechanical & service properties. 3 ill., 1 table, 9 ref.

UDC 621.436

**Teregulov T.I. and Chernousov A.A. ALLBEA Program Package: Analysis and Synthesis of Gas Exchange Characteristics in Turbocharged Engine** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2013. — № 3. — P. 28–32.

**Keywords:** internal combustion engines, combustion, mathematical models, numerical simulation, applied software, dataware.

The article discusses simulation of engine combustion process as multi-stage projects. It emphasizes the importance of using various software as means to automate calculation. Advantages of ALLBEA programs are demonstrated by the example of analysis and optimization of gas exchange processes in engine type 12CHN15/18.

3 ill., 6 ref.

UDC 621.433.2

**Efremov B.D. and Rock D.M. Control System for Engine Firing Liquefied Gas** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2013. — № 3. — P. 33–35.

**Keywords:** engine control system, LPG, program correction, fuel metering.

The authors discuss performance of conventional control system of engine operating on liquefied petrol gas. The control system provides for programmable fuel metering correction.

4 ill.

UDC 621.43

**Andrusenko O.E. and Matveyev Yu.I. Rudolf Diesel's Unusual Autograph (Inventor's Social Weltanschauung)** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2013. — № 3. — P. 36–38.

**Keywords:** Rudolf Diesel, little-known book, inventor's social outlook, correspondence with A.M.Gorky.

The article familiarizes readers with Rudolf Diesel's social ideology, formulated in a little-known book of the inventor, presented to Russian author A.M.Gorky.

2 ill., 2 ref.

UDC 621.436

**Melnik G.V. Engine Building Worldwide (Based On Papers Presented at CIMAC 2013)** // *Dvigatelistroyeniye*. — 2013. — № 3. — P. 39–53.

**Keywords:** HERCULES scientific project, computer-aided design, ultimate engine, emission reduction limits, operating values' stability, emission reduction technologies, liquefied natural gas, dual fuel engines.

The paper in question presents preliminary results of HERCULES integrated project, carried out by major engine makers MAN and Wartsila partly funded by European Union.

The project in general is targeted at evaluation of practical limits of emission reduction in transport and marine diesel engines by integration of various successful technologies, without compromising efficiency. Challenges arising from dual fuel operation are considered, and solutions of problems involved are analyzed.

3 tables, 2 ill., 2 ref.

## Вниманию авторов

Редакция обращает внимание авторов на тематическую направленность принимаемых к рассмотрению рукописей и необходимость выполнения требований по их оформлению.

Журнал «Двигателестроение» является ежеквартальным научно-техническим изданием, посвященным проблемам развития, проектирования, изготовления и эксплуатации поршневых двигателей.

Тематика публикаций определила следующие основные рубрики журнала:

- расчеты, конструирование, исследования двигателей;
- системы и агрегаты двигателей;
- конструкционные материалы;
- топливо и смазочные материалы, присадки;
- ресурсосбережение;
- эксплуатация и ремонт двигателей;
- автоматизация и диагностирование;
- проблемы экологии;
- гипотезы и дискуссии;
- история развития конструкций (проектов), предприятий и науки о двигателях;
- обзорная и справочная информация.

Текст рукописи должен быть представлен в двух экземплярах на бумаге формата А4, гарнитура Times New Roman 12, через полтора интервала, с обязательным приложением электронной версии на CD (в формате Microsoft Word 2000/2003), полностью соответствующей оригиналу на бумаге. Формулы в электронной версии должны быть набраны с использованием редактора формул Microsoft Equation 3.0. За достоверность набора формул несет ответственность автор. При использовании в наборе специальных шрифтов последние прилагаются в электронном виде. Электронные копии иллюстраций представляются отдельными файлами в форматах: TIF, JPG (не менее 300 dpi, черно-белые полутоновые изображения).

Представляя рукопись статьи в редакцию, автор должен сообщить о ее предыдущих публикациях.

Рукопись статьи должна иметь рекомендацию к публикации в журнале (направление) от организации, где выполнялась работа, а также акт экспертной комиссии с указанием того, что рукопись не содержит сведений, запрещенных к публикации в открытой печати.

Заглавие статьи должно быть кратким (не более 120 знаков), точно отражающим ее содержание.

Для оперативного решения вопросов, связанных с подготовкой рукописи к публикации, а также для размещения электронной версии журнала в НЭБ должны быть представлены сведения об авторах:

- фамилия, имя, отчество (полностью);
- ученая степень и звание;
- полное наименование места работы;
- полный почтовый адрес;
- действующие контактные телефоны, e-mail).

Для представления авторов читателям желательно присылать цветные или черно-белые фотографии авторов размером не менее чем 3×4 см. Допускаются электронные копии в форматах TIF или JPG.

Обязательными приложениями к рукописи являются: реферат, в котором четко и сжато изложены основные цели и результаты работы объемом от 700 до 1200 знаков; код УДК; ключевые слова.

Заглавие статьи, название организаций, ФИО авторов, ключевые слова и реферат необходимо присылать на русском и английском языках.

Объем статьи не должен превышать 25 тыс. знаков, включая таблицы и список литературы. Иллюстрации в виде графиков, диаграмм, схем и фотографий оформляются в виде приложений к тексту рукописи. Все приложения к тексту рукописи представляются на отдельных листах, а в электронной копии — в виде отдельных файлов. Формулы, иллюстрации и таблицы должны быть пронумерованы в порядке упоминания и снабжены поясняющими (подрисовочными) подписями. Все обозначения на иллюстрациях должны быть объяснены (расшифрованы) в тексте или в подрисовочных подписях и соответствовать обозначениям в тексте.

Даже если все иллюстрации заверстаны автором в текст электронной копии рукописи, то их представление в виде отдельных файлов и распечаток на отдельном листе обязательно.

В статьях желательно приводить только те математические формулы, которые необходимы для понимания существа вопроса, исключая их подробные выводы.

Все обозначения, встречающиеся в формулах, должны быть объяснены.

При написании формул необходимо использовать общепринятые обозначения физических величин по Международной системе единиц (ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин). Ссылки на цитируемые источники необходимо оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 05–2008.

Если представленные в редакцию рукописи не удовлетворяют перечисленным требованиям, то они могут быть доработаны по согласованию с автором сотрудниками редакции. Услуги редакции по доработке рукописей статей платные.

Рукописи статей, поступившие в редакцию, рецензируются специалистами. Если у рецензента имеются обоснованные критические замечания, статья возвращается автору на доработку.

Редакция оставляет за собой право внесения в текст редакторских изменений, не искажающих смысла авторского текста. При поступлении в редакцию обоснованных критических замечаний, касающихся размещенного в журнале материала, редакция оставляет за собой право на их публикацию в порядке дискуссии.

Авторское право на конкретную статью принадлежит авторам. Ответственность за содержание статьи несет также автор. При перепечатке статьи или ее части ссылка на журнал обязательна.

Публикация в журнале учитывается ВАК в качестве печатного научного труда.

Рукописи, направленные в редакцию, авторам не возвращаются.

*Редакция журнала*