

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ (материалы конгресса CIMAC)

Одной из наиболее заметных тенденций современной энергетики является децентрализованная выработка электроэнергии, что вызвало растущий спрос на экономичные двигатели внутреннего сгорания для привода генераторов. Отвечая на требования времени, фирма «Ricardo», недавно отметившая свое 100-летие, совместно с двигателестроительной фирмой приступила к созданию абсолютно новой платформы для перспективных двигателей. Уже через 18 месяцев со дня начала разработки, на стенде производителя двигателей состоялся первый пуск нового дизеля.

Исходный вариант новой модели рассчитан на цилиндрическую мощность 530 кВт, система одноступенчатого турбонаддува обеспечивает максимальное давление сгорания до 250 бар. Двигатель рассчитан для работы на HFO/MDO, и уже идет разработка газового (на природном газе) и двухтопливного вариантов двигателей при максимальной унификации конструктивных компонентов. Широкое использование средств моделирования позволило проектантам оптимизировать конструкцию двигателя с точки зрения прочности и надежности с учетом возможностей локальных

поставщиков комплектующих. Простота и легкость сборки и техобслуживания, увеличение межремонтных интервалов — позволяют снизить удельные (на единицу мощности) капиталовложения до уровня, гарантирующего конкурентоспособность нового двигателя.

Снижение потерь на трение, оптимизация параметров системы газообмена и конструкции камеры сгорания, позволили обеспечить заданное значение расхода топлива. Результаты моделирования были подтверждены стендовыми испытаниями двигателя в широком диапазоне нагрузок. Снижение как первоначальной стоимости, так и эксплуатационных затрат позволяет уменьшить стоимость владения до уровня, обеспечивающего конкурентоспособность двигателя на мировом рынке в составе надежных автономных источников энергопитания.

В настоящем докладе показаны возможности применения технологий, эффективность которых обеспечена самыми современными средствами проектирования новых двигателей.

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником

ПРЕЗЕНТАЦИЯ НОВОГО СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДВИГАТЕЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО «С НУЛЯ»

*Ben Rogers, Martin Kratky, Jan Hrach
Ben McCully, James Mullineux, Simon Brewster,
Ricardo*

Введение

Создание совершенно нового, «с чистого листа», среднеоборотного двигателя с точки зрения финансирования, логистики и расчетно-конструкторских работ является для двигателестроительной фирмы довольно рискованным предприятием. Разработка такого рода значительно отличается от обычной работы по постепенному совершенствованию существующих конструкций, поскольку она предполагает развертывание ОК и НИР совсем другого масштаба, в ходе которых предстоит создание и связывание воедино тысяч совершенно новых компонентов. Именно поэтому авторы сочли целесообразным, как это принято в отрасли двигателестроения, представить на сессии CIMAC доклад, посвященный обзору конструктивных и технологических решений, использованных в новом двигателе.

Спрос на экономичные среднеоборотные двигатели отчасти стал следствием ускорения производства распределенной энергии, особенно в развивающихся странах, где рост потребности в электроэнергии значительно опережает возмож-

ности традиционных энергосистем на основе центральных электростанций большой мощности с соответствующей сетевой инфраструктурой. Вот почему создаваемый двигатель предназначается в первую очередь для экспорта в развивающиеся страны, а также отдаленные районы мира, например, островные государства, где энергетика основана на использовании генераторов с приводом от ДВС.

Особенности целевых рынков сбыта определили технические требования к изделию, которые более подробно рассмотрены ниже. На основе этих спецификаций были составлены программы создания двигателя, начиная от общей концепции и кончая стендовыми испытаниями.

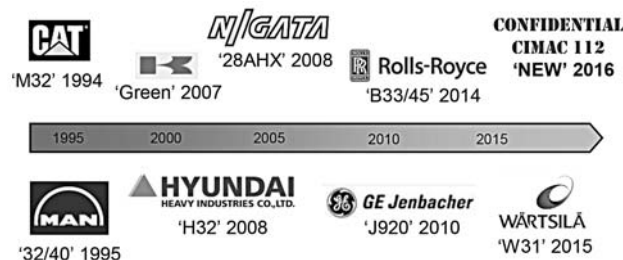


Рис. 1. Новый двигатель в контексте среднеоборотных двигателей с диаметром цилиндра порядка 300 мм, созданных за последние десять лет

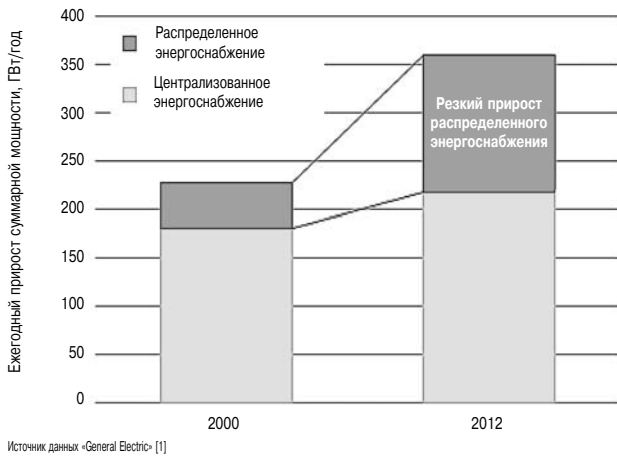


Рис. 2. Рост мировой потребности в распределенной энергии

Основные спецификации двигателя

Конфигурация цилиндров двигателя	18 V
Номинальная цилиндровая мощность	530 кВт при температуре окружающей среды 45°С
Номинальная частоты вращения	720/750 об/мин
Топливо	HFO (ISO F RMK700)
Нормативы вредных выбросов	Требования Всемирного банка

Еще одним важным соображением при определении основных технических характеристик двигателя является выбранная производителем стратегия коммерциализации продукта, т. е. расчеты затрат и рисков с учетом фактора времени, принимая во внимание вероятность выхода на рынок и коммерческого успеха в начальный период выпуска продукции. История знает немало случаев (например, автомобиль DeLorean DMC12), когда вложения в разработку и организацию производства оказались слишком велики, чтобы обеспечить доход от продаж на ранней стадии внедрения, что в конечном итоге вылилось в коммерческий провал предприятия. К успешным проектам можно отнести создание двигателей, продажи которых начинают приносить прибыль с самого начала, благодаря чему они надолго остаются в номенклатуре изделий изготовителя. Поэтому была поставлена задача — разработать конкурентоспособный двигатель, основанный на надежных, проверенных временем, технологиях, при разумных затратах средств и времени. При этом в целях обеспечения будущего коммерческого успеха в конструкцию двигателя заложены возможности модернизации для того, чтобы доходы, получаемые от продаж на ранней стадии, позволили вкладывать средства в повышение мощности двигателя, его КПД, и в расширение диапазона применяемых топлив (например,

двухступенчатый наддув, создание газового двигателя) на основе уже имеющихся компонентов и обновления технологического оснащения.

Производитель двигателя на момент написания настоящего доклада еще не закончил план-график работ по подготовке к выпуску новой модели двигателя, поэтому его имя здесь не названо. По этой же причине не названа марка двигателя и даже кодовое обозначение модели, чтобы производитель смог сам объявить об этом в пресс-релизе в нужный момент. Чтобы дать возможность познакомиться своевременно участников конгресса CIMAC с данной разработкой, производитель двигателя любезно согласился разрешить фирме «Ricardo» представлять его на этом конгрессе. Фирма участвовала в данном проекте на всех стадиях, начиная от разработки концепции и кончая стендовыми испытаниями, поэтому для нас является большой честью предоставлять новую разработку от имени заказчика.

Разработка новой модели среднеоборотного двигателя — общий обзор и основные положения

Ниже перечисляются основные положения, касающиеся реализации программы в целом, а также конкретные технические детали с упоминанием наиболее важных технологий, использованных при разработке двигателя.

Требования к изделию и выбор технологий

Создаваемый двигатель предназначенся в первую очередь для экспорта в развивающиеся страны, а также в отдаленные районы мира, где применяется выработка распределенной энергии.

При составлении перечня технических требований к двигателю необходимо ориентироваться на следующие показатели:

- *топливная экономичность* (ключевой показатель конкурентоспособности изделия, составляющий главную часть общей стоимости владения для оператора электростанции);
- *капитальные затраты* (ключевой показатель конкурентоспособности, особенно в случае, когда электростанция работает не в режиме базовой нагрузки);
- *эксплуатационные расходы* за исключением стоимости топлива (минимальный расход масла на угар, большой ресурс и длительные межремонтные интервалы);
- *способность обеспечить работу на различных видах топлива* (HFO, MDO и/или природный газ — в зависимости от поставок топлива, доступного на месте установки);
- *вредные выбросы* (минимальные требования Всемирного банка);
- *надежность* (гарантированный пуск, отсутствие внеплановых остановок);

➤ *готовность* (минимальное время остановок для ремонта и техобслуживания, минимальная потеря мощности в условиях высокогорья или с увеличением температуры окружающего воздуха);

➤ *занимаемое пространство* (обычно в качестве характеристического размера используется ширина агрегата);

➤ *ремонтпригодность* (минимум времени на ремонт, осуществляемый специалистом на месте установки с подготовкой на обычном уровне, при наличии стандартного инструмента и приспособлений);

➤ *робастность* (предпочтение отдается более простым конструктивным решениям, сведена до минимума вероятность ошибок при эксплуатации и обслуживании двигателя).

Помимо факторов, влияющих на рыночное продвижение двигателя, его производитель учитывал также следующие моменты:

➤ правильный выбор начальной области применения уже достаточно зарекомендовавшей себя технологии, что облегчит постановку продукта на производство и обеспечит его безаварийную работу у первых заказчиков;

➤ продукт должен быть приспособлен к принятой у производителя технологии сборки и существующей инфраструктуре;

➤ конструкция должна учитывать номенклатуру продукции локальных поставщиков комплектующих и возможность ее расширения для применяемости в своих изделиях;

➤ минимальное количество деталей, применяемых с учетом удобства сборки/разборки изделия;

➤ дизайн изделия должен соответствовать бренду производителя и способствовать его продвижению;

➤ базовая конфигурация двигателя должна обеспечивать длительный и конкурентоспособный ресурс; газовая и двухтопливная версия двигателя создаются с максимальным количеством унифицированных компонентов; варианты 12V и 20V создаются за счет масштабируемой модульной конструкции; обеспечивается достаточная структурная прочность корпусных деталей, оставляющая возможность для форсировки двигателя по мощности с повышением его КПД.

Перечисленные выше требования легли в основу выбора технологии для создания первого серийного варианта двигателя. Некоторые ключевые моменты рассмотрены ниже.

Топливная аппаратура (FIE) — для впрыска топлива был выбран механический рядный ТНВД. Этот выбор обусловлен следующими причинами:

➤ на основании многолетнего эксплуатационного опыта данная технология зарекомен-

довала себя как самая надежная при работе с тяжелыми топливами;

➤ простота обслуживания топливной системы подобного типа, которая легко доступна с наружной стороны блоков цилиндров;

➤ система имеет отдельный привод, при этом топливный насос легко снимается для техобслуживания;

➤ особое внимание уделено герметичности топливной и масляной систем, в том числе предотвращению возможности их взаимного загрязнения;

➤ электронный регулятор частоты вращения, обеспечивающий стабилизацию частоты сети;

➤ минимальная суммарная стоимость владения для оператора;

➤ возможность управлять давлением и углами впрыска при работе на генератор с постоянной частотой.

Система наддува — одноступенчатая, обеспечивающая высокую степень повышения давления и высокий КПД турбокомпрессора. Данная технология была выбрана на основании следующих соображений:

➤ система обеспечивает значения степени повышения давления и КПД турбокомпрессора, которые гарантируют необходимый уровень мощности в период начальных поставок на выбранный целевой рынок, и соответствие нормативам Всемирного банка по вредным выбросам;

➤ имеется достаточное количество потенциальных поставщиков комплектующих для одноступенчатой системы наддува;

➤ обеспечено удобство доступа к узлам и системам двигателя для техобслуживания;

➤ простая конфигурация воздухопроводов и воздухоохладителей обеспечивает разумный компромисс между минимальным гидравлическим сопротивлением при достаточной структурной прочности компонентов.

Все элементы базовой конструкции двигателя — картер, коленвал, шатуны, поршни и втулки цилиндра — рассчитаны на максимальное давление сгорания 250 бар. При этом:

➤ обеспечивается возможность оптимизации расхода топлива при заданных целевых параметрах номинальной мощности и допустимом уровне вредных выбросов;

➤ обеспечивается надежность базовой конструкции, достаточная для безаварийной работы первых образцов, даже с учетом вероятных в начальный период ошибок обслуживающего персонала;

➤ использование математического моделирования на стадии проектирования позволило достичь максимального давления сгорания на уро-

вне 250 бар при конкурентоспособной массе двигателя;

➤ базовая конструкция двигателя предусматривает возможность модернизации в целях форсировки по мощности, повышения КПД и снижения вредных выбросов.

Особенности систем газообмена и привода клапанов: фиксированные углы открытия и закрытия клапанов, внутренние системы впуска воздуха и выпуска ОГ, внешние кулачковые валы. Выбор такой конфигурации был сделан по следующим причинам.

➤ Фиксированные углы открытия и закрытия клапанов оптимальны для работы двигателя при постоянной частоте вращения с высоким коэффициентом нагрузки, при реализации умеренного цикла Миллера (раннее закрытие впускного клапана), что позволяет достичь проектных значений номинальной мощности и уровня вредных выбросов.

➤ Внутренние системы впуска и выпуска не только обеспечивают легкий доступ к топливной системе, но и уменьшают габарит двигателя по ширине за счет использования пространства в развале блока.

➤ Испытания на газодинамическом стенде подтверждают высокую эффективность выбранной конфигурации портов, обеспечивая осесимметричное завихрение потока требуемой интенсивности.

➤ Наружное расположение кулачковых валов наиболее удобно для выбранной системы топливоподачи (рядный механический ТНВД) и позволяет в будущем перейти на регулируемые клапаны.

➤ Интеграция компонентов: принятое в начале решение об интеграции компонентов в сборочные узлы было в дальнейшем пересмотрено. Необходимость такой интеграции должна быть подтверждена в каждом конкретном случае.

➤ Объединение отдельных компонентов в узлы, имеет свои преимущества, так как в этом случае уменьшается число деталей и продолжительность сборки с наименьшей вероятностью ошибок.

➤ Возрастает сложность и трудоемкость конструкторских работ, а также необходимое количество инструментов и приспособлений. Именно по этой причине решение о необходимости интеграции должно быть обосновано в каждом конкретном случае.

➤ В целом уровень интеграции компонентов в данном проекте достаточно высок.

Организация работ по программе

Стратегический подход производителя двигателя заключается в том, чтобы вывести новый продукт на рынок как можно скорее. На полный цикл работ по созданию нового двигателя, на-



Рис. 3. От «чистого листа» до работающего двигателя за 18 месяцев

чиная от «чистого листа ватмана» до торжественной церемонии пуска первого образца двигателя (в конфигурации 18V) было отведено всего 18 месяцев.

Программа с самого начала разворачивалась очень быстро. Работой группы опытных проектировщиков «Ricardo» руководил главный инженер фирмы, одновременно производитель двигателя усилил свою группу разработчиков. В результате за короткий срок был выполнен большой объем расчетов, ОК и НИР, что позволило завершить первый эскизный проект за 4 месяца. На стадии эскизного проектирования в специально выделенном помещении «Ricardo» работала небольшая группа инженеров фирмы-производителя двигателя, возглавляемая руководителем проекта. Параллельно две группы инженеров фирмы-производителя двигателя осваивали программное обеспечение и методику моделирования, одна группа — у себя на фирме, другая — в помещении конструкторского бюро «Ricardo». В распоряжение специалистов фирмы-производителя двигателя были предоставлены все программы для расчетов и моделирования для того, чтобы они могли лучше понять идеи проекта и использовать полученные знания в будущем.

На стадии рабочего проектирования команда «Ricardo» была сокращена, поскольку на этом этапе весь проект был передан в ведение фирмы-производителя двигателя, а роль «Ricardo» была сведена к проверке результатов работы и выдаче заключения. Специалисты фирмы-производителя двигателя продолжали работать в помещении конструкторского бюро «Ricardo» с

тем, чтобы иметь возможность постоянного общения с проектантами «Ricardo».

На всех стадиях работы к специалистам фирмы-производителя непрерывно поступала вся информация по проекту, включая данные трехмерных объектов, передаваемые через платформу управления жизненным циклом изделия PLM (Product Lifecycle Management). Это позволило получать одновременно информацию из сборочного цеха и от поставщиков комплектующих, чтобы была уверенность в том, что каждый компонент изготовлен и собран наиболее экономичным способом, не замедляя общего процесса разработки.

Большая часть 18-месячной работы заключалась в том, что команда фирмы-производителя и их поставщики превращали законченную конструкторскую документацию в готовые изделия.

Здесь проявилось еще одно преимущество совместной работы проектантов в одном помещении при такой организации внешних поставок, когда компоненты с длительным циклом изготовления поступают в работу еще до завершения рабочего проекта.

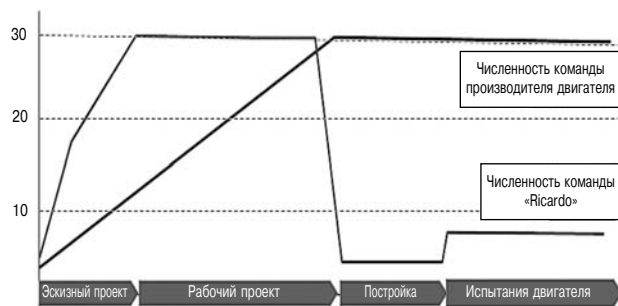


Рис. 4. Организация программы, позволяющая быстро приступить к работе, одновременно увеличив количество и участников со стороны фирмы-производителя и повысить их квалификацию, чтобы передать им ведение проекта и все ноу-хау



Рис. 5. Расчет, выполненный на ранней стадии проектирования, снижает риск потери времени и средств на вынужденные изменения конструкции и переделку компонентов

На последующей стадии проекта (рабочее проектирование) помещения конструкторского бюро были расширены, чтобы вместить выросшее количество разработчиков. Такая организация рабочего пространства позволила еще больше сократить сроки разработки, поскольку большинство возникающих вопросов решалось немедленно в рабочем порядке, а оперативное личное общение специалистов друг с другом резко улучшило и ускорило их взаимопонимание.

Остальная часть программы — постройка и испытания двигателя — поддерживалась инженерами «Ricardo» за счет визитов на сборочные и испытательные стенды, а также в конструкторское бюро.

Еще одной особенностью проекта является интенсивное использование вычислительной техники и моделирования до начала этапа эскизного проектирования, что позволило подтвердить проектные концепции расчетами и тем самым предотвратить значительные потери времени на вынужденные изменения конструкции и переделку компонентов на последующих этапах работы. Было выпущено 16 отдельных отчетов с результатами расчетов, переданных на терминал завершения эскизного проекта, и еще 24 отчета и соответствующих программных продуктов, переданных на терминал завершения рабочего проекта.

Общее описание конструкции двигателя

Говорят, что лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать. Поэтому читателям предложена подборка изображений более чем 900 компонентов, включая окончательные виды продукта.

На рис. 6 представлен общий вид двигателя. Передний торец дизеля доступен для обслуживания, трубные соединения собраны в кластер на наружных поверхностях, нет никаких элементов, которые затрудняли бы доступ.

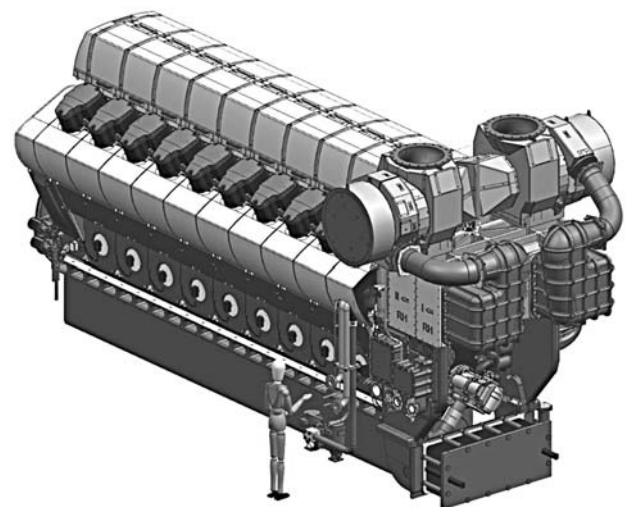


Рис. 6. Общий вид двигателя

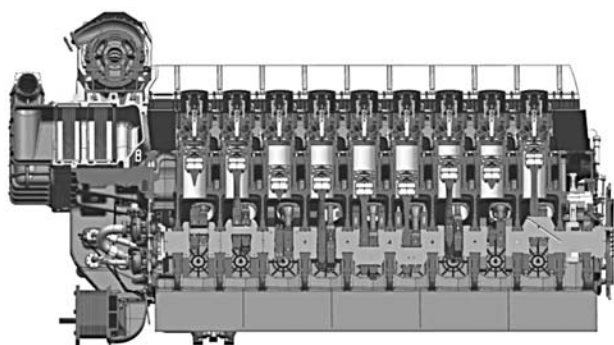


Рис. 7. Продольный разрез двигателя

На продольном разрезе двигателя (рис. 7) видны газозвушной тракт, оптимизированный с помощью CFD и включающий в себя охладитель наддувочного воздуха, встроенный демпфер крутильных колебаний и привод вспомогательных устройств на носке двигателя, усиленный кронштейн для установки турбокомпрессоров со встроенными водяными и масляными холодильниками, и привод кулачкового вала со стороны генератора.

На поперечном разрезе (рис. 8) показаны основные компоненты двигателя. В картер встроены каналы подачи и отвода охлаждающей воды, а также главный масляный коллектор. Воздухораспределительная коробка выполнена в виде отдельной отливки. К головкам цилиндров ведут воздушные каналы, параметры которых

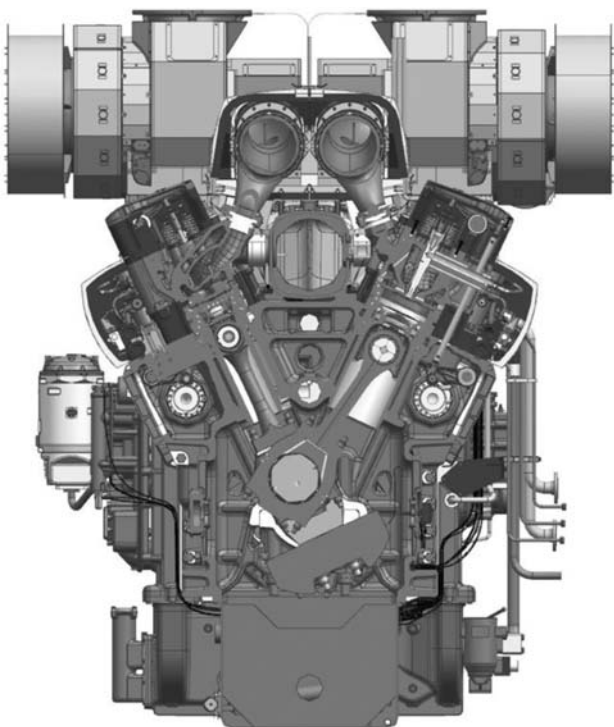


Рис. 8. Поперечный разрез V-образного двигателя с углом развала блока цилиндров 60 градусов



Рис. 9. Цилиндровый узел модульного типа

оптимизированы по результатам математического моделирования.

Цилиндровый узел модульного типа (рис. 9) может разбираться и собираться по частям или извлекаться целиком в виде модуля. Для монтажа и разборки разработаны специальные приспособления. Полости охлаждения цилиндра надежно уплотняются кольцами, расположенными на легкой литой втулке, что существенно облегчает сборку и разборку узла. При этом исключены подводящие трубки, что снижает вероятность возникновения утечек.

Поршень конструкции Ricardo (рис. 10) будет производиться одним из местных поставщиков. Поршень рассчитан на максимальное давление в камере сгорания до 250 бар. Прочность поршня и эффективность его охлаждения проверены различными методами математического моделирования.

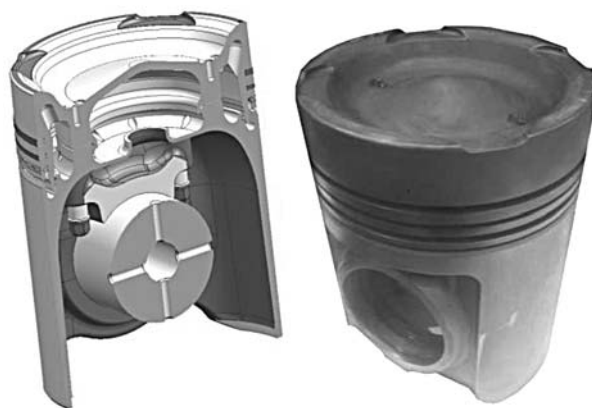


Рис. 10. Поршень конструкции «Ricardo»

Расчеты прочности и износостойчивости

Выполнение данного проекта основано на тщательных расчетах и методах моделирования, которых разработаны на самом современном уровне и фактически являются промышленными стандартами, поэтому мы здесь не будем на них останавливаться, а обратимся к тем расчетным методикам, которые представляются нам наиболее интересными, и, возможно, менее известны.

Расчет шатуна на фреттинг

Составной (трехкомпонентный) шатун может быть ослаблен в результате фреттинга в местах контакта с поршневым пальцем (верхняя головка) и с шатунной шейкой коленвала (нижняя головка). Фреттинг является результатом действия касательных напряжений, вызывающих истирание поверхности, и — что характерно для шатунов — усталостного износа, ведущего к возникновению трещин. На фирме «Ricardo» расчеты фреттинга выполняются методом конечных элементов (МКЭ) для 36 вариантов нагрузки в точках на протяжении 720 град ПКВ, при этом сумма результатов расчета представляет собой расчетный параметр фреттинга. Специалисты «Ricardo» выполнили такой расчет для двух реальных шатунов старой конструкции, один из которых подвергся воздействию фреттинга во время испытаний, как было установлено при его разработке, а второй — измененной конструкции — как оказалось, не имел следов фреттинга. На основании результатов этого расчета была разработана инструкция по определению безопасного уровня параметра фреттинга, в дальнейшем использовалось при расчете шатуна нового двигателя.

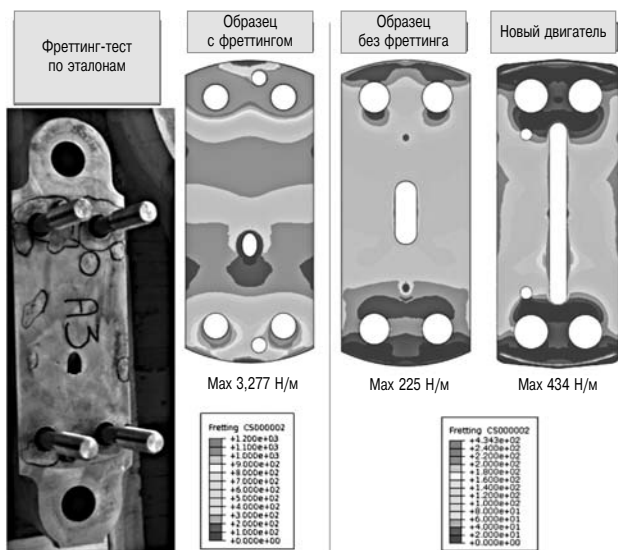


Рис. 11. Определение параметров фреттинга относительно реальных эталонных образцов шатуна: одного — с фреттингом нижней головки, и другого — без следов фреттинга

Как показано на рис. 11, шатун нового двигателя по параметру фреттинга на порядок превосходит старый шатун, причем с большим запасом. Пиковые значения по шкале — 1200 на левой картинке, и лишь 434 — на обеих правых.

Модальный частотный анализ картера и оценка его жесткости

В финальной части этапа рабочего проектирования выполняется комплексный частотный анализ, который должен подтвердить расчетный уровень вибраций и соответствующих напряжений, однако чтобы обеспечить необходимую точность, такой расчет требует большого времени, и может производиться только тогда, когда контуры проекта уже вырисовались достаточно отчетливо. Однако возможен и другой подход, описанный ниже. Он привлекателен тем, что расчет не требует много времени и может быть выполнен в самом начале этапа эскизного проектирования, тем не менее, он дает ценную информацию, позволяющую улучшить конструкцию картера еще до полного окончания эскизного проекта. В длинных V-образных двигателях вибрации компонентов, установленных на двигателе, например, турбокомпрессоров, могут достигать опасного уровня. После завершения рабочего проекта данная проблема может стать трудно разрешимой, поскольку для этого нужно было бы заказывать необходимый измерительный инструмент заблаговременно.

Метод оценки, применяемый на стадии рабочего проектирования, заключается в сравнении картера нового двигателя с аналогичными деталями подобных двигателей, результаты которого, в силу конфиденциальности подобной инфор-

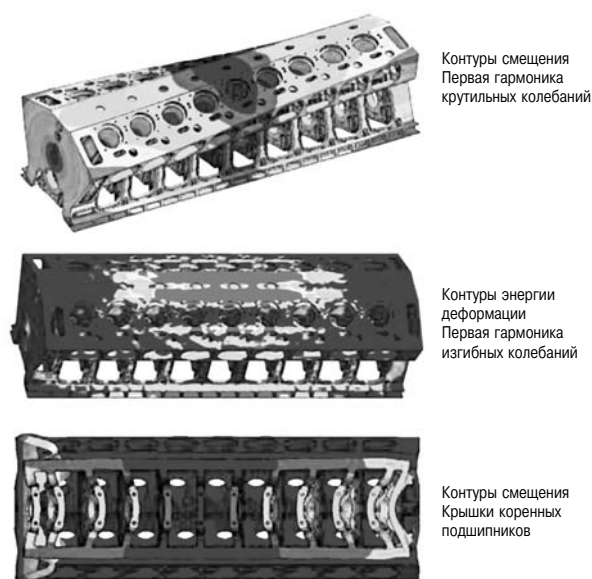


Рис. 12. Эталонный расчет картера по массам, модальной частоте и жесткости

мации, производителю нового двигателя неизвестны. При реализации упрощенного метода рассчитываются массы и первые гармоники изгибных, крутильных напряжений и напряжений в крышке коренного подшипника. Рассчитываются также значения общей жесткости, жесткости каждого колена вала и модальной частоты. Результаты сравниваются с результатами для эталонных двигателей (benchmark engines), при этом проектант сразу получает информацию о значениях соотношения жесткости и массы для каждой формы колебаний. В числе получаемых результатов — значение энергии упругой деформации, информация о которой позволит проектанту добавить массу в местах, где это необходимо, и уменьшить массу в тех элементах конструкции, влияние которых на структурную прочность незначительно. Расчет занимает немного времени, поэтому он может многократно повторяться на протяжении всего цикла проектирования картера до тех пор, пока конструкция не сформируется окончательно, после чего будет проведен стандартный расчет напряженного состояния, о котором упоминалось раньше.

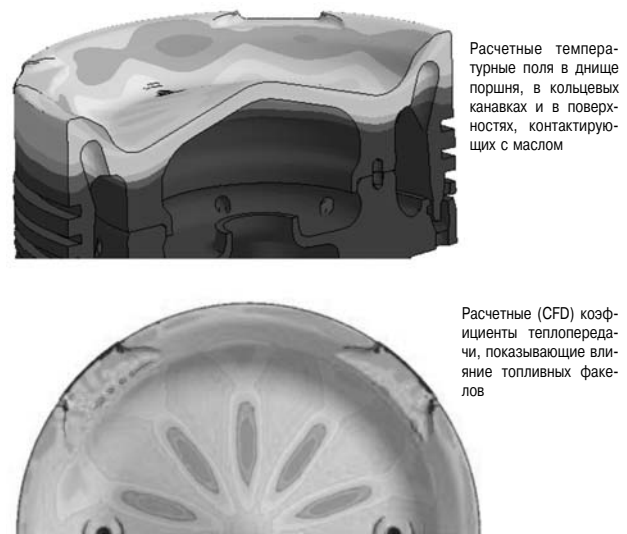
Расчет тепловых и температурных напряжений в поршне. Динамический расчет поршня

В целях всесторонней проверки прочности поршня был выполнен большой объем разного рода расчетов. Для теплового моделирования методами CFD использовалась усредненная за цикл тепловая нагрузка, возникающая на днище поршня при сгорании топлива. Моделирование выполнялось параллельно с проектированием камеры сгорания. Результаты расчетов необходимы для корректного моделирования температурных полей в днище поршня, а также для оценки чувствительности к отдельным параметрам топливной системы, например, угла конуса впрыска форсунки. Оценивались отклонения значений температур от заданных в критических точках, например, в канавке верхнего поршневого кольца, на обратной стороне поршня и на поверхностях, контактирующих с маслом.

Точность тепловых расчетов также крайне важна для расчетов прочности, так как напряжения в верхней части поршня возникают, главным образом, вследствие колебания температур. Рассчитывались факторы высокоцикловой усталости и разрушительного действия малоцикловой усталости, а также плотность болтовых соединений. На болтовое соединение действуют силы инерции, но более опасным является действие сил теплового расширения. Поэтому во избежание серьезных отказов тщательно проверяется возможность раскрытия стыков

и проскальзывания в болтовых соединениях, с использованием того же параметра фреттинга, как при расчете шатуна. Производился расчет деформаций, при этом оценивалась функциональность критичных элементов конструкции, например, кольцевых канавок. Они не должны деформироваться настолько, чтобы кольца оказались зажатыми.

Для оптимизации жесткости юбки поршня, профиля, овальности и размеров поясков между кольцевыми канавками использовался МКЭ, а также специальные программы для моделирования динамики поршня [2]. По условиям реализации проекта пришлось создавать полномасштабный 18-цилиндровый двигатель, не имея одноцилиндрового стенда для отработки конструкции поршня, поэтому возникла необходимость высокоточного моделирования, которое обеспечивало бы достаточную достоверность результатов. В расчете учтены боковые смещения поршня, кинетическая энергия (влияющая на кавитацию втулки поршня), условия образования масляной пленки в режиме гидродинамического трения. Далее было выполнено параметрическое исследование юбки поршня, в результате которого удалось повысить



Расчетные температурные поля в днище поршня, в кольцевых канавках и в поверхностях, контактирующих с маслом

Расчетные (CFD) коэффициенты теплопередачи, показывающие влияние топливных факелов

Рис. 13. Температурный анализ поршня

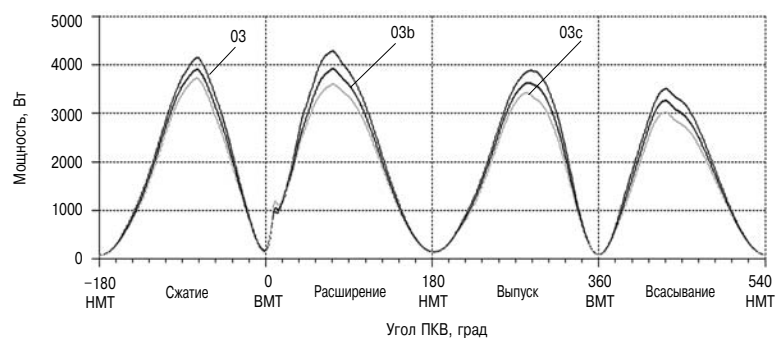


Рис. 14. Потери на трение в юбке поршня

ее прочность, снизив при этом трение на 20 % (рис. 13 и 14). Столь заметное снижение трения позволило производителю двигателя значительно увеличить механический КПД целевого 18-цилиндрового двигателя.

Параметрическое исследование потерь трения в юбке поршня позволило найти оптимальный из ряда испытанных профилей юбки, что в результате дало 20-процентное снижение трения по сравнению с базовой спецификацией.

Моделирование с целью оптимизации показателей рабочего процесса

Главная задача этого направления состоит в минимизации удельного расхода топлива (SFOC), не жертвуя при этом показателями прочности и надежности. Для оптимизации целого ряда конструктивных параметров и настроек была использована одномерная (1D) модель. В некоторых, особенно сложных случаях, модель была настроена на автоматическую подстройку момента начала впрыска и регулировок турбины. Для многопараметрической оптимизации, когда наличие сложных взаимодействий делало неэффективным варьирование единственного параметра, была также использована технология планирования эксперимента (DoE — Design of experiment). Чтобы убедиться в робастности каждого из целевых показателей, моделировались последовательно все возможные рабочие режимы: 720 и 750 об/мин; стандартные (ИСО) и тропические внешние условия; мощность 80, 100 и 110 % от номинальной, а также работа на топливах HFO и MDO.

Поскольку проектирование шло «с чистого листа», порядок вспышек в двигателе 18V не был фиксированным. Сначала с помощью динамического анализа системы коленвала [3] было

выбрано несколько вариантов порядка вспышек, обеспечивающих приемлемые прочностные и вибрационные характеристики. Затем с помощью 1D моделирования были найдены варианты, оптимальные с точки зрения расхода топлива и равномерности загрузки цилиндров.

Всего с начала эскизного проектирования и до полного завершения рабочего проектирования было выполнено 367 прогонов 1D моделей, в ходе которых было исследовано множество параметров. Параллельное моделирование было важнейшим условием оптимизации компонентов и систем двигателя с целью достижения минимального расхода топлива.

Помимо 1D моделирования выполнено 3D моделирование процесса сгорания, выпускного тракта, воздушного ресивера и системы воздухоохладителя. 3D моделирование воздушного и газового трактов велось параллельно с 1D моделированием, что позволило корректно определить граничные условия и рассчитать влияние параметров на SFOC. Последнее особенно важно для учета пульсаций и других 3D эффектов, характерных для газовых коллекторов большого объема.

Главной целью 3D моделирования выпускного коллектора была оценка эффективности диффузоров между выпускными портами цилиндров и коллектором, а также определение общего перепада давления на турбине и в ее впускном патрубке. Исследование пяти вариантов диффузоров, отличающихся степенью расширения и входным радиусом, позволило найти оптимальный вариант.

Моделировалось также течение потока воздуха в системе воздушный ресивер—воздухоохладитель, включая детализацию поля скоростей в диффузоре компрессора. Кроме минимизации гидравлических потерь и неравномерности расхода воздуха по цилиндрам, был рассчитан коэффициент неравномерности расхода через воздухоохладитель. Этот

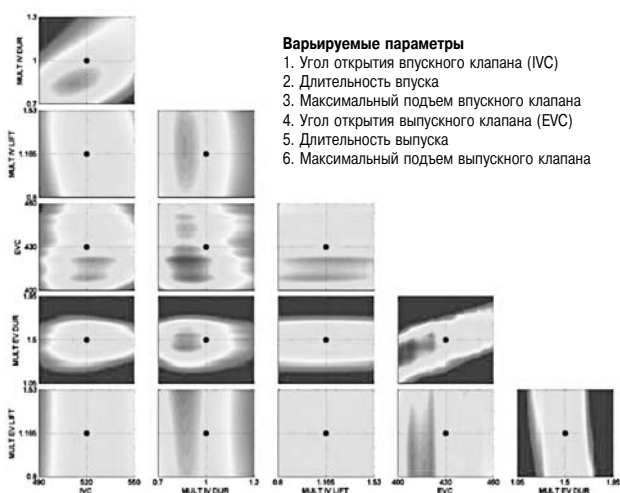


Рис. 15. Пример оптимизации профилей впускного и выпускного клапанов по методике DoE с помощью 1D модели

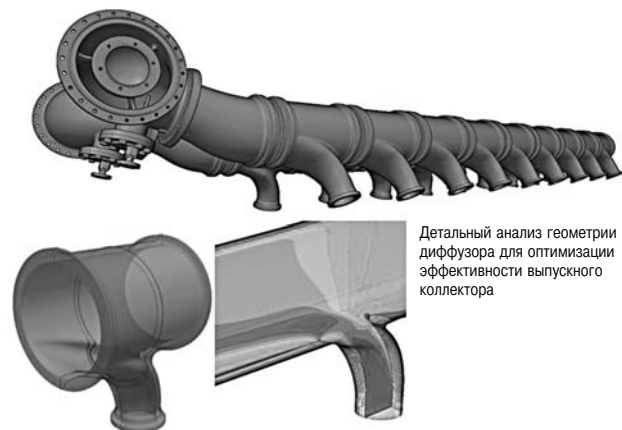


Рис. 16. 3D модель выпускного коллектора

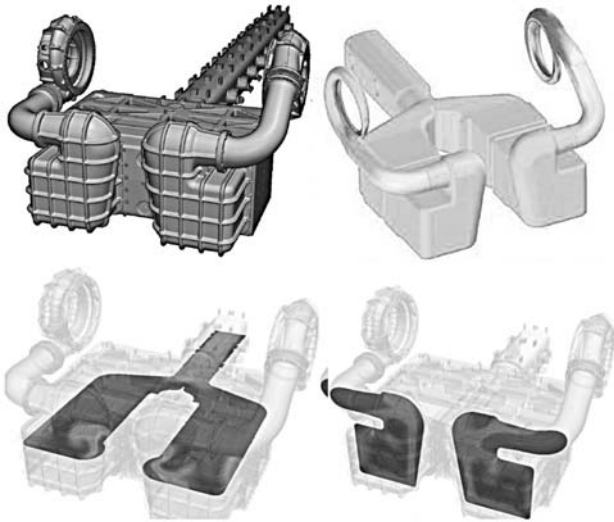


Рис. 17. Оптимизация расхода воздуха через воздухоохладитель и его эффективности

показатель характеризует эффективность использования объема воздухоохладителя, т. е. отношение его реальной эффективности к теоретической. Высокая эффективность воздухоохладителя является ключевым условием обеспечения нормальной работы агрегата в жарком климате.

Результаты испытаний

Как бы тщательно не проектировался новый двигатель, пусть с применением самых современных методов расчета и моделирования, окончательная оценка изделия может быть получена



Рис. 18. Двигатель на испытательном стенде перед одним из первых пусков

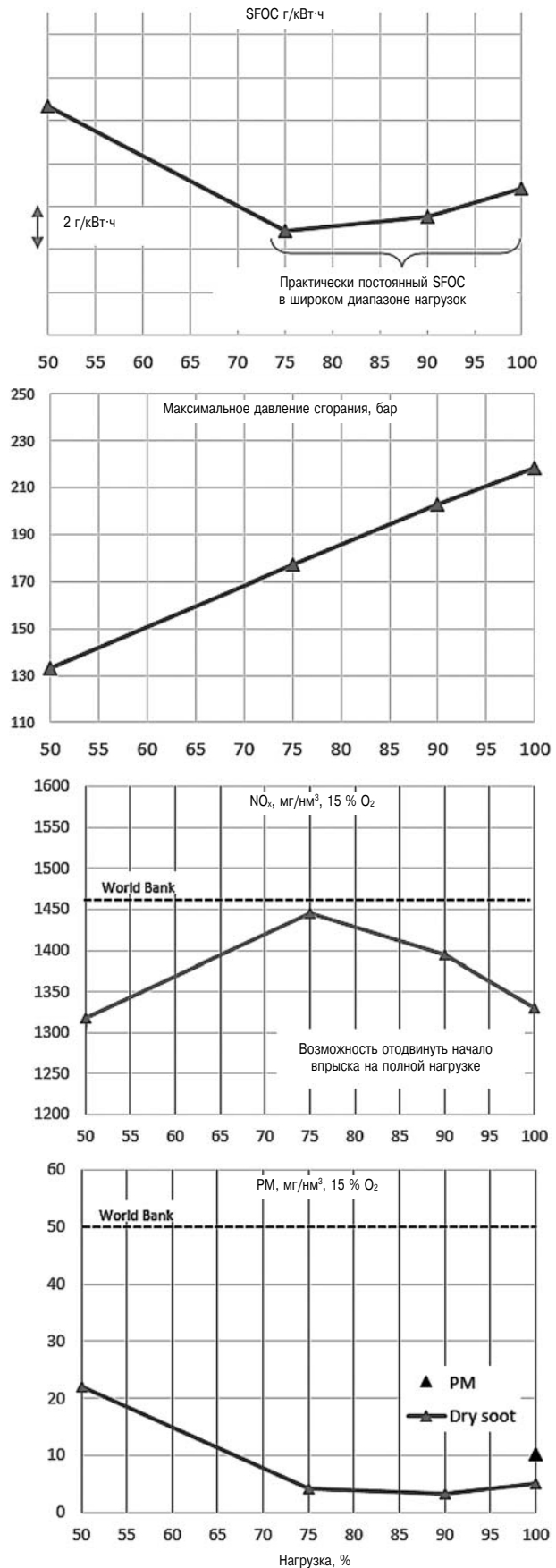


Рис. 19. Базовые параметры двигателя, соответствующие или превосходящие целевые показатели

только в результате натурных испытаний. Проектанты в своей работе ориентируются на достижение заданных показателей, однако истина выясняется лишь на испытательном стенде.

При первом пуске проверялись заданные функции и работа механических систем, затем, в течение примерно одной недели, нагрузка на двигатель постепенно повышалась до 100 %. Для регистрации и вычисления всех важнейших параметров двигателя, которые сравнивались с соответствующими целевыми показателями, было задействовано большое количество измерительной и записывающей аппаратуры. Регулярные проверки выполнялись при участии инженера «Ricardo», который всегда был готов оказать помощь в решении любых мелких проблем, неизбежно возникающих на этом этапе. В целом первая проверка прошла успешно и никаких серьезных проблем выявлено не было.

После проверки механических функций приступили к проверке показателей качества. Для того чтобы убедиться в стабильности работы двигателя, были выполнены и неоднократно повторены измерения основных рабочих параметров. При доводке проверялись варианты отдельных узлов, например, распылителей форсунок и регулировки фаз впрыска для определения их соответствия целевым показателям и реакции двигателя на изменения. Тщательный анализ трендов позволил найти оптимальное сочетание настроек, которые использовались при испытаниях, с целью достижения оптимизированных показателей. На этой стадии были определены резервы снижения SFOC, для использования которых понадобятся некоторые изменения в конструкции топливной аппаратуры. Тем не менее, заданные целевые показатели были достигнуты при использовании уже имеющейся конфигурации двигателя и систем, включая настройки турбокомпрессора, которые оказались близкими к оптимальным. Показатели двигателя, созданного с нуля характеризуют профессиональную подготовку разработчиков и являются свидетельством высокого качества комплексного моделирования.

В настоящее время продолжается доводка двигателя, цель которой — подтвердить его ресурс и обосновать проектную периодичность технического обслуживания. Возможно также обновление других проектных технических показателей.

Заключение

За короткое время специалистами фирмы «Ricardo» совместно с двигателестроительной фирмой был разработан «с чистого листа» совершенно новый среднеоборотный двигатель.

В основу конструкции были положены технологии, в наибольшей степени соответствующие требованиям надежной эксплуатации генераторного агрегата в развивающихся странах и в отдаленных районах мира.

Команда проектантов работала совместно с поставщиками комплектующих изделий с целью создать наиболее практичную и технологичную конструкцию, а также в кратчайшие сроки построить рабочий образец V-образного 18-цилиндрового дизеля.

При этом интенсивно использовались современные методы расчета и моделирования. Подобная стратегия дала возможность максимально сократить общую продолжительность проектирования.

В ходе испытаний и доводки двигателя не было выявлено сколько-нибудь серьезных конструктивных проблем. Все целевые показатели были достигнуты или превзойдены без каких-либо изменений в конструкции двигателя.

Литература

1. *Owens B.* «The Rise of Distributed Power» General Electric, 2014.
2. Ricardo software codes specialising in engine development <http://www.ricardo.com/en-GB/What-we-do/Software/Products/>
3. *Spirov V.* «Design of Large Engine Crankshafts for Improved Fuel Economy» Ricardo, CIMAC Cascades, London, 2014.

УДК 621.43

Кавтарадзе Р.З. Развитие теории рабочих процессов ДВС в МГТУ им. Н. Э. Баумана: от метода Гриневецкого до современных 3D-моделей // Двигателестроение. — 2020. — № 1. — С. 3–9.

Ключевые слова: МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Поршневые двигатели», создание и развитие теории рабочего процесса, многозональные и 3-D модели рабочего процесса, кинетика образования вредных веществ, локальный радиационно-конвективный теплообмен.

Выполнен анализ и сформулированы основные направления решения актуальных задач исследования и совершенствования внутрицилиндровых процессов, реализованных усилиями кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Обоснована необходимость создания и развития новой теории рабочего процесса поршневых двигателей с использованием многозональных и 3-D моделей рабочего процесса для решения задач кинетики образования вредных веществ и локального радиационно-конвективного теплообмена при горении топлива в цилиндре. Ил. 6. Библ. 64 назв.

УДК 621.436

Мягков Л.Л., Сивачев С.М., Гусев М.П. Экспериментальное определение коэффициентов в моделях пластичности и ползучести поршневого сплава // Двигателестроение. — 2020. — № 1. — С. 10–15.

Ключевые слова: дизельный двигатель, силуминовый сплав, поршень, неупругое деформирование, пластичность, ползучесть, метод конечных элементов.

Представлены результаты испытаний на одноосное растяжение и ползучесть пропорциональных цилиндрических образцов, полученных из заготовок поршней V-образных дизельных двигателей ЯМЗ-658, изготовленных из силуминового сплава АК12ММгН. Изложена методика и приведены результаты численного моделирования, с использованием метода конечных элементов, процесса неупругого деформирования образцов в условиях эксперимента. Дана сравнительная оценка расчетных и экспериментальных данных. Ил. 8. Библ. 13 назв.

УДК 621.436.12

Савастенко Э.А., Савастенко А.А., Марков В.А. Эффективность реализации многократного впрыскивания топлива в дизельном двигателе // Двигателестроение. — 2020. — № 1. — С. 16–25.

Ключевые слова: дизельный двигатель, топливная система common rail, пилотная цикловая подача, многократное впрыскивание, отработавшие газы, снижение вредных выбросов и уровня шума.

Показано, что эффективным средством улучшения топливной экономичности, снижения выбросов вредных веществ и дымности отработавших газов дизелей, является управляемый многократный процесс впрыскивания топлива. Проведены результаты расчетных и экспериментальных исследования по оптимизации параметров управляемого процесса многократного впрыскивания топлива в камеру сгорания дизеля с целью одновременного снижения расхода топлива, выбросов вредных веществ с отработавшими газами и уровня шума дизельного двигателя. Табл. 1. Ил. 15. Библ. 21 назв.

УДК 621.436

Маслов А.П., Левцов М.В. Анализ действующих сил в КШМ W-образного двигателя с прицепными шатунами // Двигателестроение. — 2020. — № 1. — С. 26–29.

Ключевые слова: W-образный двигатель, главные и прицепные шатуны, кинематика КШМ, порядок работы цилиндров.

Выполнен анализ эффективности различных способов организации порядка работы цилиндров W-образного двигателя в одном из двух возможных вариантов: во всех четырех цилиндрах, организован такт «рабочий ход»; если в одном или двух цилиндрах организован такт «рабочий ход», то в остальных заканчивается такт «выпуск» или начинается такт «впуск». Ил. 5. Библ. 7 назв.

УДК 621.436

Гумеров И.Ф., Валеев Д.Х., Куликов А.С., Гарипов Р.Д., и др. Развитие конструкции и технологии производства нового поколения дизельных двигателей КАМАЗ Р6 // Двигателестроение. — 2020. — № 1. — С. 30–39.

Ключевые слова: двигатели КАМАЗ Р6, выбросы вредных веществ, соответствие требованиям Евро-5, совершенствование рабочего процесса, система SCR, технологическая подготовка производства.

Обоснована актуальность развития конструкции дизельных двигателей коммерческого назначения, приведены требования к высоконагруженным деталям. Отмечается, что выполнение современных требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами в совокупности с высоким эффективным КПД — важные факторы их конкурентоспособности. Приведены особенности конструкции и результаты испытаний рядных дизелей нового семейства Р6, для модельного ряда тяжелых магистральных автомобилей КАМАЗ поколения К5. Табл. 4. Ил. 11. Библ. 10 назв.

УДК 621.311

Потапов В.И., Галиуллин Р.Р. Дизель-генераторная установка с электронно-управляемым пропуском подачи топлива // Двигателестроение. — 2020. — № 1. — С. 40–42.

Ключевые слова: дизель-генераторная установка, управляемый пропуск подачи топлива, снижение расхода топлива, скоростные характеристики ТНВД, многофакторный эксперимент, моторные испытания.

Предложен способ снижения расхода топлива дизеля в составе дизель-генераторной установки за счет управляемого пропуска подачи топлива в режимах работы с малой нагрузкой. Разработана электронно-управляемая система топливоподачи с регулируемым пропуском подачи топлива по заданному алгоритму. Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований. Ил. 4. Библ. 10 назв.

УДК 621.43

Обозов А.А., Новиков М.А., Гришанов П.А. Анализ состава отработавших газов дизеля KM-170FA // Двигателестроение. — 2020. — № 1. — С. 43–46.

Ключевые слова: дизельный двигатель, поле режимов работы, состав отработавших газов, уравнения регрессии.

Представлены результаты анализа состава отработавших газов (ОГ) промышленного дизельного двигателя, выполненного на основе данных, полученных при проведении лабораторных (стендовых) испытаний. Испытания проведены в поле возможных режимов работы двигателя с целью оптимального размещения эксплуатационной характеристики приводного агрегата. Рассмотрены вопросы аппроксимации универсальных характеристик концентраций вредных компонентов ОГ для их графического представления в трехмерной системе координат. Табл. 1. Ил. 6. Библ. 6 назв.

УДК 621.43.057

Ощепков П.П., Смирнов С.В., Заев И.А. Исследование процесса самовоспламенения биодизельного топлива // Двигателестроение. — 2020. — № 1. — С. 47–51.

Ключевые слова: дизельный двигатель, пальмовое масло, биотопливо, биодизельное топливо, время задержки воспламенения, добавки перекиси водорода.

Приводится методика и результаты кинетического моделирования процесса самовоспламенения биодизельного топлива в воздухе с 20 %-ной добавкой пальмового масла и перекиси водорода. Установлены предельные значения добавки перекиси водорода в биодизельное топливо для сокращения периода задержки воспламенения. Показана возможность влияния добавок перекиси водорода на реакционную способность биодизельного топлива с целью управления периодом задержки воспламенения. Ил. 3. Библ. 17 назв.

УДК 621.43

Современные технологии проектирования двигателей (материалы конгресса SIMAC) // Двигателестроение. — 2020. — № 1. — С. 52–62.

Ключевые слова: децентрализованная выработка электроэнергии, дизель-генераторные установки, среднеоборотные дизели, фирма «Ricardo», средства математического моделирования и компьютерного проектирования.

Приводятся результаты совместной работы фирмы «Ricardo» и двигателестроительной фирмы по созданию абсолютной новой платформы для перспективных среднеоборотных дизелей, рассчитанных для работы на HFO/MDO, с цилиндровой мощностью 530 кВт и максимальным давлением в цилиндре до 250 бар. Широкое использование средств моделирования позволило проектантам всего через 18 месяцев со дня начала разработки осуществить первый пуск нового дизеля на стенде производителя. Показаны возможности современных эффективных технологий проектирования и создания новых двигателей.

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником. Ил. 19. Библ. 3 назв.

UDC 621.43

Kavtaradze R.Z. Development of combustion theory in Bauman Technical University: from Grinevetsky method to modern 3D-models // Dvigatelistroyeniye. — 2020. — № 1. — P. 3–9.

Keywords: Moscow State Bauman Technical University, Reciprocating Engine Department, fundamental theory of reciprocating engines, multi-zone and 3D-models of combustion process, kinetics of noxious emissions formation, local radiation/convective heat exchange.

The article lists and ranges foreground directions of investigations into in-cylinder processes carried out by Reciprocating Engine Department of Moscow State Bauman Technical University. It demonstrates urgency of formulating new theory of engine combustion process, making use of multi-zone and 3D models of combustion process, which are instrumental in research into kinetics of noxious emissions formation, local radiation/convective heat exchange in engine cylinder. 6 ill., 64 ref.

UDC 621.436

Myagkov L.L., Sivachev S.M. and Gusev M.P. Experimental determination of coefficients in the models of plasticity and creep behaviour of piston alloys // Dvigatelistroyeniye. — 2020. — № 1. — P. 10–15.

Keywords: diesel engine, silumin alloy, piston, inelastic deformation, plasticity, creep, finite element method.

Inelastic deformation of critical zones of engine piston was investigated using mathematical models for simulation of piston material behaviour caused by low-cycle thermomechanical fatigue. Cylindrical proportional test-pieces cut from blanks of pistons of V-engine type ЯМ3-658, made from silumin alloy AK12MMrH, have been tested for uniaxial tension and creep. Presented are methodology and results of numerical simulation of inelastic deformation of specimens based on finite element method. The analysis results have been verified with test data. 8 ill., 13 ref.

UDC 621.436.12

Savastenko E.A., Savastenko A.A. and Markov V.A. Practical efficiency of multi-injection technology in diesel engine // Dvigatelistroyeniye. — 2020. — № 1. — P. 16–25.

Keywords: diesel engine, common rail injection system, pilot fuel injection rate, multi-injection, mixing, heat release, exhaust gas, reduction of emission and noise levels.

Controllable multiple fuel injection is known as effective technology that contributes into fuel economy and environmental performance. The article presents the results of analyses and experiments for optimizing parameters of controllable multiple fuel injection as a means to simultaneously reduce fuel consumption, noxious emission and noise level. 1 table, 15 ill., 21 ref.

UDC 621.436

Maslov A.P. and Levstov M.V. Kinematic and dynamic analysis of W-engine featuring slave connecting rods // Dvigatelistroyeniye. — 2020. — № 1. — P. 26–29.

Keywords: W-engine, master and slave connecting rods, crank gear kinematics, firing order.

Distinctive feature of W-engine with two slave connecting rods is that torque originates from forces exerted to the same crank pin from two master connecting rods and two slave ones. Therefore, efficiency of various firing order patterns may be evaluated for two options: a) power stroke takes place in all four cylinders, and b) power stroke takes place in one or two cylinders, while simultaneously in other cylinders either «exhaust stroke» finishes, or «intake» stroke starts. 5 ill., 7 ref.

UDC 621.436

Gumerov I.F., Valeev D.H., Kulikov A.S., Garipov R.D. et al. New generation of diesel engine type KAMAZ P6: development of construction and processing methods // Dvigatelistroyeniye. — 2020. — № 1. — P. 33–39.

Keywords: diesel engines type KAMAZ P6, testing for fatigue resistance, noxious emissions, Euro-5 compliance, improve-

ment of combustion performance, SCR system, modernization of test methods, process engineering.

High-powered modern diesel engine cannot be competitive unless combines low emission level (complying with respective regulations in force) with high fuel efficiency. The article discusses design features and test results of new engine family P6 to power K5 KAMAZ truck family. Also, details are given concerning modernization of test equipment and serial production methods for in-line engines. 4 tables, 11 ill., 10 ref.

UDC 621.311

Potapov V.I. and Galiullin R.R. Diesel gen set with controllable misfire function // Dvigatelistroyeniye. — 2020. — № 1. — P. 40–42.

Keywords: Diesel gen set, controllable misfire, improving fuel economy, fuel injection pump characteristics, motor stand tests.

The authors offer and describe a technology of fuel efficiency improvement by use of controllable misfire function at low load. Presented is a fuel injection system featuring controllable misfire following a preset algorithm. Also presented are the results of analyses and relevant experiments. 4 ill., 10 ref.

UDC 621.43

Obozov A.A., Novikov M.A. and Grishanov P.A. Analysis of engine type KM-170FA exhaust gas // Dvigatelistroyeniye. — 2020. — № 1. — P. 43–46.

Keywords: diesel engine, operation boundary conditions, exhaust gas composition, regression equations.

The paper presents the results of exhaust gas composition of general purpose diesel engine. The engine test procedure covered all probable speed/load points, taking account of driven machinery characteristics. The test results are approximated so as to be easily visualized in 3D coordinate system. 1 table, 6 ill., 6 ref.

UDC 621.43.057

Oschepkov P.P., Smirnov S.V. and Zaev I.A. Investigation into self-ignition of biodiesel // Dvigatelistroyeniye. — 2020. — № 1. — P. 47–51.

Keywords: diesel engine, palm-oil, biofuel, biodiesel, ignition delay period, hydrogen peroxide addition.

The article discusses methodology and results of kinetic simulation of self-ignition (in air) of biodiesel added with 20 % of palm oil and hydrogen peroxide. The authors determined maximum percentage of hydrogen peroxide addition to biodiesel, with a view to reduce ignition delay period. Hydrogen peroxide addition is demonstrated as an efficient means to control ignition delay period. 3 ill., 17 ref.

UDC 621.43

Modern engine design technologies (based on CIMAC papers) // Dvigatelistroyeniye. — 2020. — № 1. — P. 52–62.

Keywords: distributed power, gen set, medium speed engine, Ricardo, mathematical simulation and computer-aided design.

World demand for decentralized power is driving a market need for cost effective powerplant engines. Ricardo, now a more than century-old company, has cooperated with an engine manufacturer to design a completely new medium speed engine platform to address this market. The engine has a market entry power rating of 530 kW/cyl, initially employing single stage turbocharging, and is designed to operate at up to 250 bar peak firing pressure. The initial production engine will run on HFO/MDO with further Natural Gas and Dual Fuel variants. It was extensive use of analysis and simulation tools and an aggressive program approach that it took just 18 months to go from 'clean sheet' kick-off through to the starting ceremony. The work demonstrates the potential of modern design technologies in the development of new engines.

The CIMAC papers are translated into Russian by G.Melnik, PhD. 19 ill., 3 ref.