

РАЗВИТИЕ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

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

Среднеоборотные дизели представляют один из наиболее перспективных и быстро развивающихся секторов дизелестроения. Эти дизели находят широкое применение в качестве главных судовых и тепловозных двигателей, приводов судовых и стационарных дизель-генераторов. На их основе создано большое количество моделей газовых двигателей.

Лучшие образцы современных среднеоборотных дизелей по расходу топлива приближаются к наиболее экономичным малооборотным двигателям, а по показателям удельной мощности — к высокооборотным двигателям. В то же время двигатели этого класса обладают немалыми резервами для улучшения экологических показателей как за счет совершенствования рабочего процесса, так и «внешних систем» (т. е. систем рециркуляции ОГ, каталитической очистки и т. д.). Над развитием среднеоборотных дизелей работают ведущие двигателестроительные фирмы во всем мире. Результатам этих работ посвящены многие публикации.

Перед отечественным дизелестроением поставлена задача создания отечественных конструкций среднеоборотных дизелей, по своему техническому уровню соответствующих лучшим мировым образцам. Их создателям, вероятно, будет интересно ознакомиться с методами разработки таких двигателей за рубежом, и проблемами, которые приходится решать при этом конструкторам.

В этом номере журнала мы публикуем в сокращении тексты двух докладов на Конгрессе CIMAC-2007, посвященных созданию двух моделей среднеоборотных дизелей — MAN 32/44 CR (MAN Diesel) и HiMSEN H32/40 (Hyundai Heavy Industries). Как нам представляется, материалы Конгресса, проходившего в мае 2007 г., за прошедшее время не утратили актуальности. Редакция намерена в дальнейшем продолжить публикацию подобных материалов, посвященных, в частности, другим классам дизельных и газовых двигателей.

НОВЫЙ ДИЗЕЛЬ MAN 32/44 CR — ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ, КОМПАКТНЫЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

*Mr. Christian Vogel, Mr. Guenter Heider,
Mr. Stephan Haas, Mr. Alfred Marzinek
MAN Diesel SE, Германия*

Разработка нового двигателя 32/44CR была вызвана текущими и перспективными потребностями рынка судовых и стационарных дизелей. Эта машина сочетает в себе проверенные временем технические решения, использованные в модели 32/40, и последние достижения высоких технологий, а также модульную концепцию компоновки.

При этом, с учетом требований заказчиков, были использованы такие ключевые фирменные технологии, как система впрыска, новые блоки электроники и новый турбокомпрессор. Процесс проектирования и доводки включал интеграцию новых компонентов в конструкцию двигателя и их последовательную оптимизацию. Новый дизель, который создан как экономичный, экологически безопасный и компактный, означает выход на новый технический уровень и представляет собой шаг в будущее. Двигатель отличают надежность и прочность конструкции, модульный принцип построения и вариативность, позволяющая использовать его для самых различных применений.

Двигатель развивает цилиндровую мощность 560 кВт при среднем эффективном давлении 26,9 бар, что соответствует лучшим мировым показателям для машин этого класса.

Введение

В мире трудно найти такую страну, где бы не работали дизели MAN типа 32/40 в судовом или дизель-генераторном исполнении.

Со дня запуска данной модели в производство (1994 г.) на момент написания этого доклада выпущено более 1036 машин этой серии. Она стала настоящей «рабочей лошадкой» в диапазоне мощностей от 3000 до 10 000 кВт. На протяжении всех этих лет машина непрерывно совершенствовалась.

В 2004 г. была поставлена цель создать новый двигатель, который, сохраняя все достоинства проверенной временем модели, сочетал бы в себе новейшие достижения науки и техники. Предстояло использовать, с одной стороны, огромный практический опыт проектирования и эксплуатации серии 32, с другой — инновации, уже отработанные фирмой на опытных образцах. Результатом этой работы стало создание двигателя 32/44 CR, отличающегося большой цилиндровой мощностью, чрезвычайно высоким КПД и низкими значениями вредных выбросов, что делает его вполне конкурентоспособным с учетом сегодняшних и перспективных требований рынка.

Перед разработчиками были поставлены следующие основные цели:

- оптимизация конструкции с точки зрения совокупной стоимости владения (ТСО);
- высокая надежность двигателя и максимальные межремонтные интервалы;
- низкие значения выбросов;

- отсутствие дымления во всем диапазоне нагрузок;
- удобство эксплуатации и простота обслуживания;
- оптимальные технические показатели (приемистость, уровень шума);
- конструктивные усовершенствования, в том числе обновление дизайна трубопроводов и кабелей;
- неограниченные возможности использования тяжелого топлива.

Выполнение указанных задач в ограниченное время потребовало привлечения самых современных средств моделирования и автоматизации проектирования.

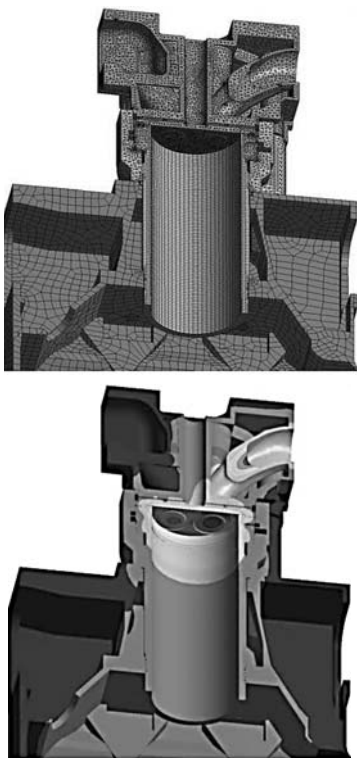


Рис. 1. Тепловой расчет цилиндрической группы (разбивка и результаты)

Разработка таких средств велась фирмой «MAN Diesel» в течение ряда лет на основе накопленного эксплуатационного опыта. Например, на рис. 1 показаны схема и результаты расчета тепловых напряжений и деформаций деталей цилиндрической группы. На верхнем рисунке показана сетка разбивки, а на нижнем — результаты расчета в графической форме. По завершении проектирования были проведены испытания и оптимизация конструкции компонентов на опытном образце двигателя. Цикл создания новой модели, как обычно, завершился длительными эксплуатационными испытаниями.

Конструкция

Основные технические характеристики двигателя 32/44CR приведены в таблице.

Для обеспечения цилиндрической мощности 560 кВт при сохранении низкого удельного расхода топлива и минимальных выбросов ход поршня был увеличен на 10 % — до 440 мм. Увеличение хода поршня было достигнуто без увеличения высоты картера.

В качестве стандартного оборудования на дизеле применены: система аккумуляторного впрыска common rail и новый турбокомпрессор серии TCR, позволивший достичь запланированных показателей рабочего процесса при со-

Основные технические характеристики

| | | |
|---|---|------|
| Тактность | 4-тактный | |
| Число цилиндров: | | |
| рядный (L) | 6, 7, 8, 9, 10 | |
| V-образный | 12, 14, 16, 18, 20 | |
| Цилиндрическая мощность, кВт | 560 | |
| Диаметр цилиндра, мм | 320 | |
| Ход поршня, мм | 440 | |
| Объем цилиндра, дм ³ | 35,4 | |
| Отношение хода поршня к диаметру цилиндра | 1,375 | |
| Скорость, об/мин | 720 | 750 |
| Среднее эффективное давление (мер), бар | 26,4 | 25,3 |
| Средняя скорость поршня, м/с | 11,0 | |
| мер × mps, бар м/с | 278,5 | |
| Отношение мощности к площади поршня, МВт/м ² | 6,96 | |
| Максимальное давление в цилиндре, бар | 230 | |
| Расход топлива при нагрузке 85 %, г/кВт·ч | 175 | |
| Система турбокомпрессора | Одноступенчатая, с постоянным давлением | |
| Назначение | Дизель-генераторы, главные судовые и стационарные двигатели | |

хранении одноступенчатой схемы наддува. Поперечный разрез двигателя L32/44CR показан на рис. 2.

Картер, втулка цилиндра, головка цилиндра

Картер двигателя 32/44CR выполнен по классической схеме литого моноблока. Конструкция стянута сквозными шпильками, идущими от

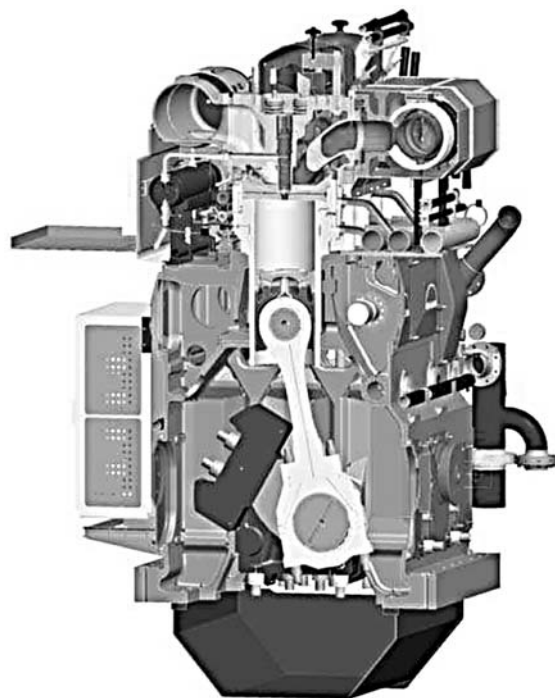


Рис. 2. Двигатель L32/44CR в разрезе

подвесных коренных подшипников к верхнему разьему картера и далее, от головки блока к промежуточному днищу рамы. Такая конструкция имеет очень большую жесткость. Втулка цилиндра охвачена кольцевой опорой, что обеспечивает разгрузку от дополнительных изгибных напряжений и, следовательно, увеличение срока службы и межремонтных интервалов. Увеличение давления в цилиндре потребовало изменений в головке блока и в конструкции клапанов. В частности, была изменена форма седла клапана, а направляющая штока стала длиннее.

Коленчатый и распределительный валы

Значительное увеличение мощности двигателя потребовало коренной переработки конструкции коленчатого вала. Ширина колена была несколько увеличена и оптимизирована по удельному весу. В новой конструкции значительно облегчен монтаж маховика и гасителя крутильных колебаний. Новая конструкция унифицированного переходника обеспечила работоспособность во всех возможных применениях с использованием меньшего количества вариантов гасителя. Узел коленвала в сборе показан на рис. 3.

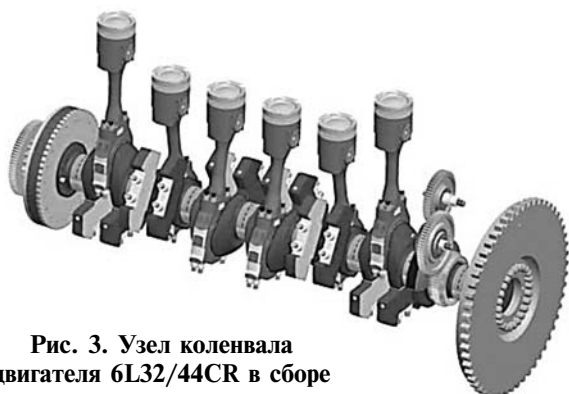


Рис. 3. Узел коленвала двигателя 6L32/44CR в сборе

На двигателе имеется два кулачковых вала: длинный — для привода клапанов газораспределения, и короткий — для привода ТНВД системы впрыска топлива. Укорочение вала привода ТНВД позволило не только уменьшить потери трения, но и снизить себестоимость его изготовления.

Поршни и шатуны

Стальной составной поршень выполнен по проверенной временем схеме с 4 болтами и двумя компрессионными кольцами. Новая конструкция поршня обеспечивает достаточный теплоотвод при возросшей мощности. Для этого, в частности, была увеличена поверхность камеры охлаждения. Была также изменена конструкция юбки поршня для снижения потерь трения. В связи с ростом давления сгорания был увеличен диаметр поршневого пальца и изменена форма втулки поршневого пальца. При этом массу поршня удалось сохранить на прежнем уровне за счет сокраще-

ния длины юбки. В результате динамического расчета была изменена и оптимизирована конструкция поршневого кольца. Возросшие нагрузки потребовали увеличения сечения шатуна и изменения конструкции его верхней головки. В нижней головке использованы четыре шатунные болта вместо двух. Это позволило добиться более равномерного распределения напряжений в стыке и уменьшить толщину подшипниковых вкладышей.

Система подачи топлива common rail

Двигатель 32/44CR стал первым среднеоборотным дизелем, в котором система аккумуляторного впрыска common rail устанавливается в качестве стандартного оборудования. Система common rail фирмы MAN позволяет использовать тяжелое топливо с вязкостью до 700 сСт (при 50 °С). Все компоненты системы, обеспечивающие дозирование топлива, созданы с учетом условий работы на тяжелом топливе, и, в частности, способны выдерживать воздействие высоких температур. Кроме того, компоненты системы соответствуют жестким требованиям по износостойкости, связанным с наличием в мазуте абразивных частиц и коррозионно-активных веществ. Система впрыска, построенная по модульному принципу, состоит из ряда резервуаров (аккумуляторов) высокого давления. Эти аккумуляторы очень компактны, эффективно гасят пульсации давления в системе и хорошо вписываются в свободное пространство в габаритах двигателя. Система также стала более удобной в обслуживании благодаря упрощению технологии сборки и большей доступности запчастей. Система MAN common rail показана на рис. 4.

При разработке системы MAN Diesel common rail первоочередное внимание уделялось вопросам безопасности, надежности и отсутствию ограничений на качество применяемых тяжелых топлив. Безопасность, в свою очередь, обеспечивается за счет ряда функциональных и (или) конструктивных решений, включая резервирование. Эти решения сводятся, в основном, к следующему.

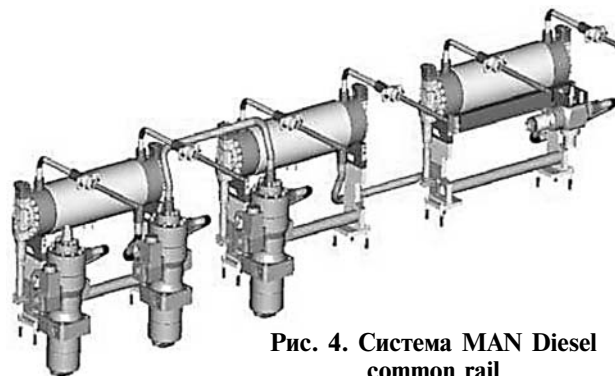


Рис. 4. Система MAN Diesel common rail

➤ Высокое давление в клапане подачи существует только в момент впрыска; тем самым исключается риск неконтролируемого впрыска из-за утечек в клапанах управления.

➤ Все трубопроводы, емкости и магистрали высокого давления имеют двойные стенки. Тем самым исключается риск выброса топлива под высоким давлением наружу из-за утечек или повреждений стенок.

➤ В каждом цилиндре имеются клапаны ограничения топливоподачи для предотвращения неконтролируемого впрыска.

➤ В каждом цилиндре имеются обратные клапаны, что исключает возможность обратного выброса топлива из системы отвода (низкого давления) в цилиндр.

➤ Благодаря наличию трех топливных насосов высокого давления (ТНВД) система сохраняет работоспособность (в аварийном режиме) даже в случае отказа одного из ТНВД.

➤ Благодаря наличию предохранительного клапана двигатель будет продолжать работать (в аварийном режиме) даже в случае отказа системы регулирования давления.

➤ Наличие двух датчиков давления топлива в магистрали и двух датчиков скорости/ВМТ обеспечивает продолжение работы в случае отказа одного из датчиков каждой группы.

Совершенствование рабочего процесса и турбонаддува

На предпроектной стадии были выполнены обширные термодинамические расчеты, учитывающие множество факторов, на основании которых выбирались основные конструктивные параметры двигателя. Эти расчеты, в сочетании с конструкторской проработкой двигателя и турбокомпрессора, велись методом последовательных приближений, в результате чего удалось получить хорошо оптимизированную перспективную конструкцию. На основании расчетов и требований заказчиков были разработаны варианты конфигурации двигателя и его основных систем.

С точки зрения термодинамики основная сложность заключалась в одновременном достижении высокой цилиндрической мощности, низкого расхода топлива и минимума вредных выбросов. При этом были учтены расчетные ограничения по отдельным параметрам, например, по температуре газов перед турбиной.

В сравнении с базовым двигателем 32/40 у нового двигателя выше отношение хода поршня к диаметру цилиндра, максимальное давление в цилиндре и больший КПД турбокомпрессора. Все это в сочетании с применением аккумуляторного впрыска топлива позволило обеспечить:

➤ значительное повышение степени сжатия без ущерба для показателей вредных выбросов на частичных нагрузках;

➤ уменьшение угла перекрытия клапанов;

➤ более раннее закрытие впускного клапана.

С учетом того, что первые два из перечисленных выше мероприятий направлены на снижение расхода топлива, проектировщики сочли возможным частично реализовать в новом двигателе цикл Миллера для достижения приемлемого компромисса между топливной экономичностью и требованиями экологии.

О том, чтобы пожертвовать характеристиками приемистости, не могло быть и речи, поэтому были выполнены детальные расчеты переходных процессов при изменении нагрузки. Помимо расчета термодинамического цикла, результаты которого представлены в параметрическом виде, общий расчет учитывал такие факторы, как влияние всех объемов газозвдушного тракта, потери тепла, а также характеристики турбины и компрессора.

Для экспериментальной проверки расчетных параметров был создан отсек 1L32/44CR, на котором были проведены испытания в первую очередь — выбранных значений степени сжатия, а также углов открытия и закрытия клапанов, оптимизации геометрии камеры сгорания в сочетании с выбором параметров сопла форсунки. За основу был принят процесс сгорания базового двигателя 32/40, отличающийся достаточно хорошими показателями. В результате оказалось возможным сохранить исходную геометрию камеры сгорания, несколько изменив конструкцию рапылителя с учетом новой системы впрыска и увеличенного хода поршня.

Пример исследования влияния геометрии сопла форсунки на параметры рабочего процесса показан на рис. 5.

При проведении исследований ставилась задача найти разумный компромисс между расходом топлива, уровнем вредных выбросов и тепловой нагрузкой на детали. Поскольку двигатель должен работать в том числе и на тяжелом топливе, приходится считаться с возможностью высокотемпературной эрозии, поэтому особое внимание было уделено температурному состоянию выпускного клапана. Как видно из графика, за счет уменьшения углов распыла оказалось возможным сохранить температуру клапана на приемлемом уровне. При этом баланс выбросы—экономичность остался на прежнем уровне, дымность на 10 % нагрузки снизилась, но расход топлива при максимальном давлении в цилиндре увеличился, правда, незначительно, что может считаться приемлемым компромиссом.

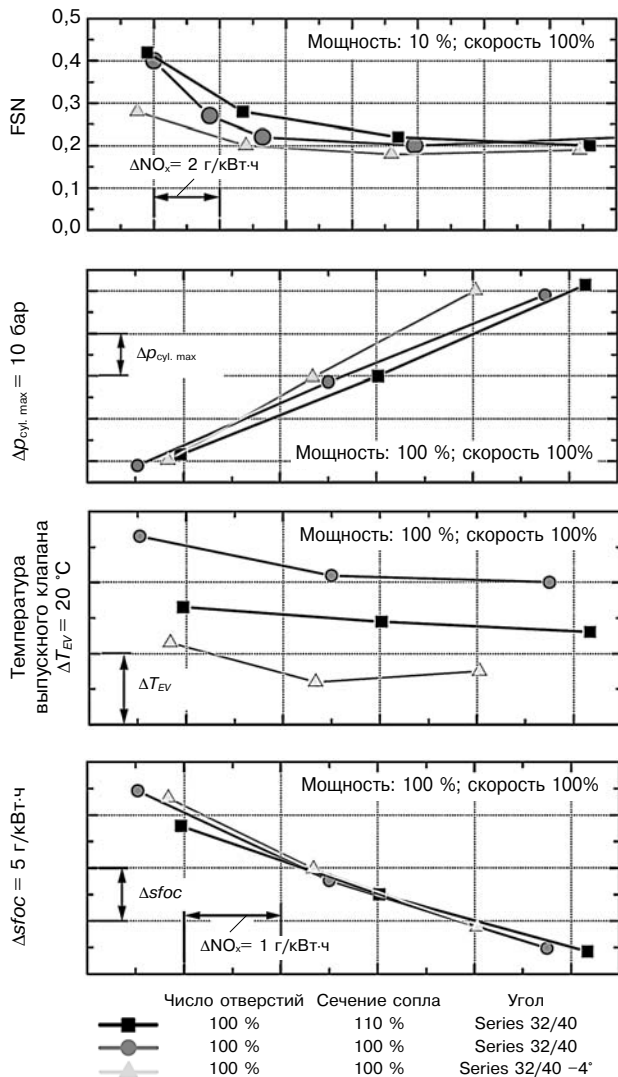


Рис. 5. Влияние геометрии сопла на параметры процессов в одноцилиндровом отсеке двигателя 32/44CR (T_{air} , T_{exh} , $p_{rail} = const$)

Турбонаддув

Одной из главных целей разработки модели 32/44CR была оптимизация турбонаддува. В этом двигателе использована одна из последних новинок «MAN Diesel» — турбокомпрессор TCR (Turbo Charger Radial). Отличия от турбокомпрессоров предыдущей серии NR заключаются в следующем: с помощью методов вычислительной гидродинамики выполнена оптимизация турбинного и компрессорного колес, изменена конфигурация направляющего аппарата, диффузора и корпуса, существенно повышены степени повышения давления и КПД турбокомпрессора.

В новом глушителе снижены потери трения, а также, учитывая перспективные экологические нормативы, значительно уменьшен уровень шума на всасывании.

Новым в конструкции компрессора является применение внутренней рециркуляции (IRC),

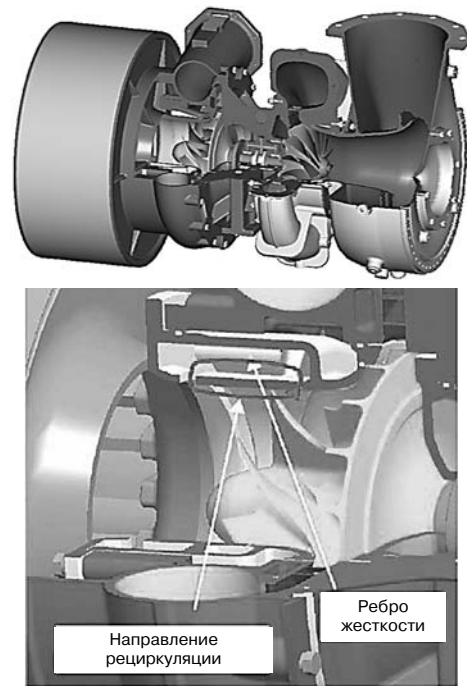


Рис. 6. Новый турбокомпрессор TCR с устройством для внутренней рециркуляции (IRC)

благодаря которой расширяется зона устойчивой работы компрессора и создается возможность выбора оптимальных совместных режимов работы двигателя и компрессора. За счет рециркуляции удалось повысить КПД компрессора на больших нагрузках. Это, в свою очередь, позволило снизить расход топлива, а также механические и тепловые напряжения в компрессорном колесе, по сравнению с обычным (без IRC) компрессором (рис. 6).

Для повышения приемистости двигателя турбокомпрессор TCR может быть выполнен с ускорителем (опционально).

Газообмен

Увеличение скорости поршня при неизменном проходном сечении клапанов приводит к росту потерь трения в газовом тракте. Оптимизация, проведенная по результатам стендовых испытаний, позволила увеличить коэффициенты расхода клапанов и тем самым повысить их эффективные проходные сечения, хотя форму клапанов и седел пришлось изменить из-за существенного повышения давления в цилиндре (рис. 7).

В новом двигателе сохранен изобарный турбонаддув с узким выпускным коллектором, уже использованным на двигателе 32/40 и обеспечившим отличные характеристики приемистости без сколько-нибудь заметного увеличения расхода топлива.

Охладитель наддувочного воздуха выполнен с большим запасом по объемам, что было одним из условий оптимизации рабочего процесса, турбонаддува и газообмена.

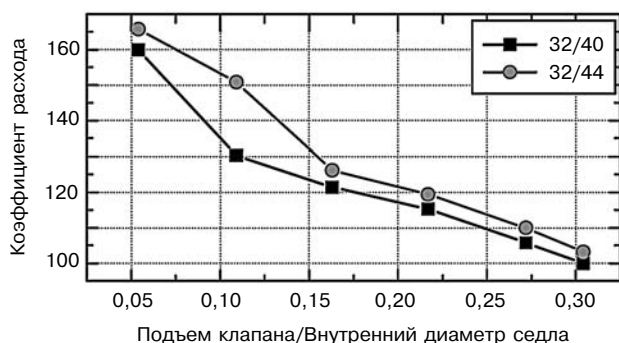


Рис. 7. Сравнение коэффициентов расхода на впуске двигателей 32/40 и 32/44CR (после оптимизации)

С помощью моделирования были исследованы процессы газообмена для всех вариантов впускных и выпускных каналов в целях оптимизации распределения воздуха по цилиндрам и соответствующих термодинамических параметров, таких, как, например, температуры газов на выходе из каждого цилиндра.

Система управления

Система управления и защиты двигателя 32/44CR — это совершенно новая разработка. Система осуществляет децентрализованный сбор сигналов датчиков. В ней использована экономичная монтажная схема, а управление ведется с пульта, оборудованного двумя сенсорными TFT-экранами — основным и резервным. Все контроллеры являются оригинальной фирменной разработкой MAN.

Система, названная SaCoSone (рис. 8), выполнена по модульному принципу, и может быть использована не только на двигателях с аккумуляторным впрыском, но и на обычных дизельных и газовых двигателях. Система SaCoSone полностью смонтирована на двигателе.

Система состоит из трех различных модулей, соединенных между собой резервируемой системной шиной. Первый модуль выполняет функции управления и защиты. Второй модуль (однотипный) выполняет функции аварийно-предупредительной сигнализации. Третий модуль регулирует скорость двигателя путем воздействия на клапаны управления впрыском системы CR, а также поддерживает постоянство давления топлива в данной системе.

В настоящее время используется только один главный впрыск, но блок электроники обеспечивает возможность произвести до 8 впрысков за рабочий цикл. Система может обрабатывать до 1000 параметров, что позволяет идеально подстроить все характеристики к текущим рабочим условиям. В случае использования судовой силовой установки с одним двигателем из соображений надежности используются два из трех модулей. При этом каждый из модулей управляет



Рис. 8. Пульт управления SaCoSone

ет половиной цилиндров двигателя. При отказе одного из модулей прерывается работа половины цилиндров, причём лишь на короткое время. Через несколько вспышек второй модуль берет на себя управление всем двигателем. При этом третий модуль обеспечивает функции НМІ интерфейса (человек—машина), а также связь с судовой системой аварийно-предупредительной сигнализации. Кроме того, он управляет средствами передачи данных и вспомогательными устройствами. Система включает различные интерфейсы, в том числе последовательный канал, Ethernet или CAN, а также интерфейс подключения к Интернету для поддержки новых онлайн-сервисов, предлагаемых MAN Diesel.

В этой разработке использован богатый опыт фирмы, накопленный в ходе эксплуатации системы в сотнях различных установок. Концепция резервирования цепей управления электромагнитными клапанами уже нашла применение в двигателях 32/40CR, проходящих эксплуатационные испытания. При этом используются возможности удаленного доступа для организации оперативной обратной связи. Аппаратная часть рассчитана на самые тяжелые условия эксплуатации, и выполнена на базе стандартных элементов, массово используемых в автомобильной промышленности.

Система SaCoSone базируется на новой концепции управления, которая будет применена на всех двигателях MAN Diesel. Таким образом, двигатель 32/44CR является оптимальным с точки зрения перспектив будущего использования.

Результаты заводских и эксплуатационных испытаний

Испытания опытного образца дизеля 6L32/44CR начались в Аугсбурге в августе 2005 г. Двигатель, прошедший испытания, показан на рис. 9.

За время испытаний наработка составила 900 моточасов, в том числе 200 часов — на тяжелом топливе. В ходе испытаний измерялись рабочие параметры, значения температуры и напряжений в деталях двигателя. Затем были проведены испытания на надежность, когда двигатель непрерывно работал в экстремальных условиях при перегрузке в течение, как минимум, 100 часов. После этого были проведены типовые испытания главных судовых двигателей, а затем — интен-

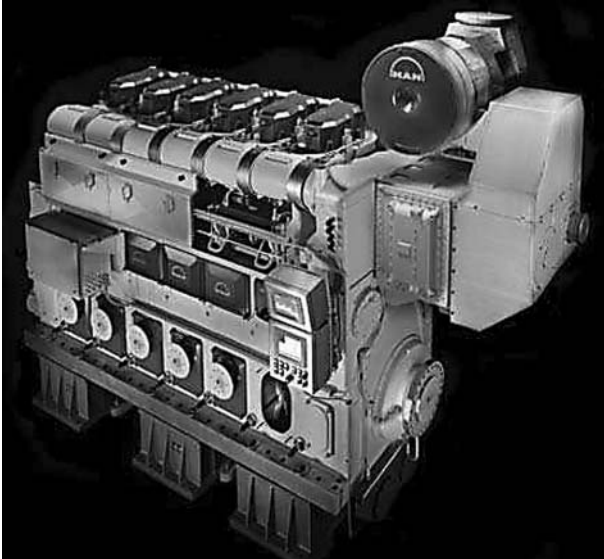


Рис. 9. Двигатель 6L32/44CR

сивные эксплуатационные испытания. Такие испытания предполагают возможность значительной суммарной наработки в течение относительно короткого промежутка времени, что позволяет оценить надежность конструкции.

Результаты испытаний опытного образца подтвердили достижение поставленных целей, а именно — снижение расхода топлива, а также уменьшение выбросов оксидов азота и сажи. Использование системы common rail позволило обеспечить высокую степень адаптивности двигателя и возможность его подстройки под требования конкретного применения. Так, например, для снижения эксплуатационных расходов вспомогательный двигатель, работающий преимущественно в диапазоне нагрузок от 30 до 70 %, может быть настроен на оптимизацию расхода топлива именно в этом диапазоне, тогда как главный судовой двигатель целесообразно оптимизировать по расходу топлива для диапазона нагрузок от 85 до 100 %. Преобладающий диапа-

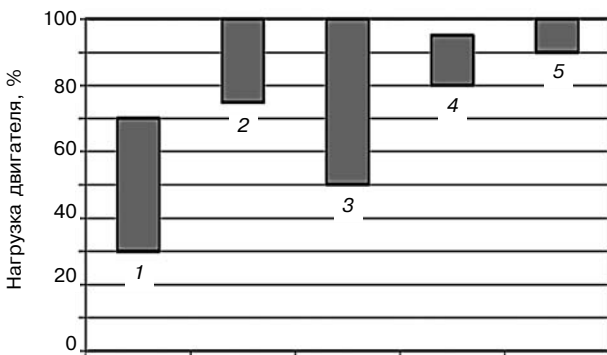


Рис. 10. Рабочий диапазон двигателей различных применений:

1 — вспомогательный; 2 — главный (пассажирское судно); 3 — главный (паром); 4 — главный (грузовой балкер); 5 — стационарный

зон нагрузок для четырехтактного среднеоборотного дизеля, используемого в качестве главного судового и вспомогательного двигателя показан на рис. 10, из которого видно, что адаптация настроек двигателя к режимам конкретного применения открывает широкие возможности для их оптимизации. Разумеется, во всех случаях должно быть обеспечено выполнение экологических требований как международных, так и национальных.

Заключение

Создание нового двигателя 32/44CR стало результатом долгосрочной программы, направленной на совершенствование серийной базовой модели в сочетании с новаторскими решениями, обеспечивающими возможность использования этого дизеля в самых различных применениях при выполнении как текущих, так и перспективных экологических требований. Эта цель была достигнута за счет того, что новый двигатель создавался на основе проверенной временем модели 32/40, дополненной самыми передовыми технологиями. Помимо высокой цилиндровой мощности и повышенного значения КПД, новая машина, благодаря использованию технологии аккумуляторного впрыска, предоставляет гораздо более широкие возможности для оптимизации и адаптации к требованиям конкретного применения. Это обстоятельство, наряду с другими усовершенствованиями рабочего процесса, обеспечивает возможность выполнения требований ИМО Tier 2.

Двигатель 32/44CR представляет собой хороший пример успешного использования трех ключевых технологий, разработанных MAN, а именно:

- система наддува с турбокомпрессором (TCR);
- система электронного впрыска (CR);
- электронная система управления (SaCoSone).

Системная интеграция указанных компонентов сделала возможным создание чрезвычайно мощного и компактного двигателя в семействе среднеоборотных дизелей и сочетающего экономичность с низкими значениями вредных выбросов.

СОЗДАНИЕ СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ HiMSEN H32/40

*Mr. Jong Suk Kim, Mr. J. T. Kim, Mr. O. S. Kwon
Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Korea*

С момента начала выпуска в 2001 г. первого дизеля HiMSEN типа H21/32 компания «Hyundai Heavy Industries» (HHI) разработала модели H25/33, H17/28, H17/24 и H32/40, составившие семейство дизелей HiMSEN. Всего за этот относительно короткий период было выпущено более 1000 машин, работающих в качестве главных судовых двигателей, а также приводов стационар-

ных и судовых дизель-генераторов. Это стало возможным благодаря широкому диапазону мощности предлагаемых двигателей, а также высокой оценке продукции ННІ со стороны потребителей. Немаловажную роль в этом сыграла концепция фирмы по созданию новых машин, получивших общее название PRACTICAL engine («практичный двигатель»).

Быстрое реагирование на сообщения потребителей с мест эксплуатации, даже когда речь шла о мельчайших пожеланиях или неполадках, позволили собрать обширную информацию о предпочтениях заказчиков, на основании которой создавались новые и совершенствовались существующие модели двигателей. У дизеля Н17/24, как и у Н17/28, диаметр цилиндра равен 170 мм, но ход поршня меньше — 240 мм.

Его цилиндровая мощность составляет 110 и 130 кВт при 1000 и 1200 об/мин соответственно, а число цилиндров в разных исполнениях — от 5 до 8. Этот двигатель предназначен, главным образом, для стационарных установок и может работать на тяжелом дизельном топливе с вязкостью до 180 сСт. Существует также газовая версия этого двигателя. Последняя модель ряда Н32/40 находится в процессе доводки. Это — самый большой из рассматриваемого семейства дизелей, отличающийся высокой экономичностью и хорошими экологическими показателями. Его цилиндровая мощность составляет 500 кВт при 720 или 750 об/мин. Эти дизели в рядном и V-образном исполнении при числе цилиндров от 6 до 20 перекрывают диапазон мощностей от 3000 до 10 000 кВт. В процессе разработки находятся также уникальная система аккумуляторного впрыска типа common rail и интеллектуальная система управления. Их внедрение, которое ожидается в ближайшем будущем, позволит выполнить перспективные требования нормативов по вредным выбросам, которые постоянно ужесточаются. В настоящем докладе описаны конструкция двигателя, его функции, и представлены результаты испытаний опытного образца двигателя Н32/40 в 8-цилиндровом варианте.

Введение

Производство четырехтактных дизелей фирма «Hyundai Heavy Industries Co. Ltd.» (ННІ) начала в 1990 г. Первые построенные двигатели были лицензионными, затем компания приступила к разработке собственных конструкций, что открыло новые возможности совершенствования продукции и расширения ее ассортимента.

В 2001 г. были поставлены на производство две базовые модели — Н25/33 (совместная разработка с «Rolls Royce Engine Bergen»), и Н21/32 (самостоятельная разработка ННІ). Впоследствии первоначальная конструкция Н25/33 тоже под-

верглась изменениям с учетом новых идей, ранее реализованных при создании модели Н21/32.

Был также разработан двигатель меньшей размерности — HiMSEN Н17/28, предназначенный для судовых и стационарных дизель-генераторов, мощностью от 520 до 1000 кВт при 900–1000 об/мин, с числом цилиндров от 5 до 8. На рис. 1 показаны: выпуск среднеоборотных дизелей ННІ по группам применения и количество заказов.



Рис. 1. Объемы производства и заказов

Первый опытно-промышленный образец двигателя 5Н17/24 был построен в 2005 г. и поставлен на доводочные испытания. В настоящее время на базе дизеля 5Н17/24 разработан газовый двигатель с открытой камерой и искровым зажиганием. При его создании использовались новейшие технологии австрийской фирмы AVL.

При создании пятицилиндрового газового двигателя Н17/24G ставилась задача получения следующих показателей: цилиндровая мощность — 110 кВт при 1200 об/мин, выброс частиц — не более 50 ppm при содержании кислорода в ОГ 13 % и КПД не менее 42 % (рис. 2). Этот двигатель предназначенся, в первую очередь, для контейнерных электростанций и установок когенерации.

В дальнейшем планируется создание высокоэффективного V-образного газового двигателя на той же основе.

С тех пор как двигатели HiMSEN Н21/32 и Н25/33 в 2001 г. появились на рынке, объем их

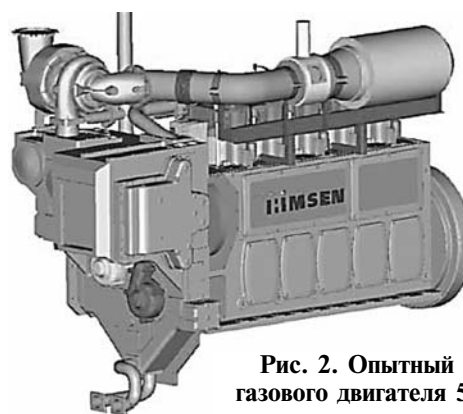


Рис. 2. Опытный образец газового двигателя 5Н17/24G

производства значительно возрос, во многом благодаря тому, что на заказчиков произвела впечатление предложенная HiMSEN концепция «практичного дизеля», включающая элементы Hi-Tech и Hi-Touch (взаимодействия человека с машиной).

Первый опытно-промышленный образец двигателя 8Н17/28, входящий в состав дизель-генераторной установки вместе с системами пуска и подготовки тяжелого топлива, проходит ресурсные испытания.

Кроме того, для расширения диапазона мощностей (рис. 3), было принято решение о разработке модели Н17/24, которая сохраняя основные конструктивные особенности двигателя Н17/28, отличается от нее укороченным ходом поршня (240 мм вместо 280). Этот двигатель имеет от 5 до 8 цилиндров в разных модификациях, и развивает мощность 130 кВт в цилиндре при 1200 об/мин. Он может работать на топливе с вязкостью 180 сСт при 50 °С.

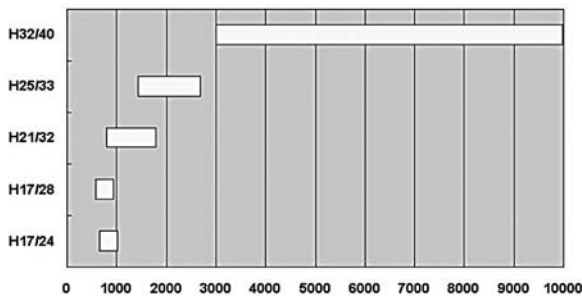


Рис. 3. Мощностной диапазон двигателей HiMSEN

В целях дальнейшего расширения диапазона мощностей семейства HiMSEN был разработан более крупный двигатель размерностью 32/40 мощностью от 3000 до 10 000 кВт. Его цилиндровая мощность составляет 500 кВт при 720 и 750 об/мин, число цилиндров — от 6 до 12. В качестве опции дизель может быть оборудован топливной системой common rail. Первый опытный образец 8-цилиндрового двигателя мощностью 4000 кВт прошел квалификационные испытания на соответствие требованиям основных классификационных обществ в декабре 2006 г. В 2007 г. начался его серийный выпуск. Второй опытный образец 8-цилиндрового двигателя Н32/40 в конце 2007 г. был поставлен на ресурсные испытания.

Разработка двигателя Н32/40

Как сказано выше, компания ННІ уже запустила в серию двигатели Н17/24, Н17/28, Н21/32 и Н25/33 с достаточно большим объемом выпуска. Это стало возможным, в первую очередь, благодаря тому, что заказчики по достоинству оценили такие их качества, как большая удельная мощность, простота конструкции, хорошие тех-

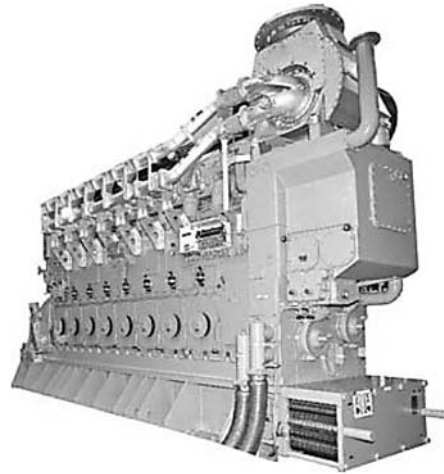


Рис. 4. Общий вид первого образца 8-цилиндрового двигателя Н32/40

нико-экономические показатели и высокая надежность при минимальных требованиях к обслуживанию.

Следующая, пятая по счету модель размерностью 32/40 создавалась для дальнейшего расширения покрываемого диапазона мощностей.

С самого начала была поставлена задача обеспечения высоких технико-экономических показателей и удобства обслуживания основных компонентов двигателя за счет целого ряда уникальных технических решений. Для этого была сформирована рабочая группа в составе опытных конструкторов, технологов, а также специалистов по контролю качества и комплектации.

С учетом того, что для таких крупных машин одним из наиболее критичных показателей является надежность, был тщательно изучен опыт эксплуатации двигателей подобной размерности. Другим важнейшим фактором является удобство эксплуатации и ремонтпригодность. Одним из средств решения этой задачи стало применение фирменной концепции HiMSEN Feed Module (модульная конструкция). Одновременно велась разработка рядного и V-образного вариантов двигателя. На рис. 4 показан общий вид первого опытного образца 8-цилиндрового двигателя Н32/40.

Конструкция

При создании модели Н32/40 были применены все наиболее удачные конструкторские наработки фирмы ННІ. Поперечные сечения рядного и V-образного двигателей показаны на рис. 5. В этих двигателях применены многие конструкторские решения, ранее использованные при создании двигателей Н21/32 и Н25/33, и, в частности, оптимальное сочетание Hi-Tech и Hi-Touch технологий.

При проектировании системы турбонаддува конструкция выпускного коллектора была оп-

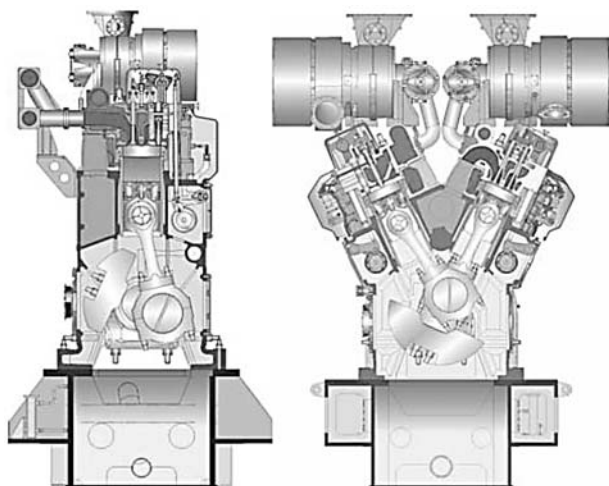


Рис. 5. Поперечные сечения двигателей H32/40

тимизирована с учетом числа цилиндров. В частности, для двигателей с числом цилиндров 6 и 9 была применена 3-импульсная система, для двигателей с числом цилиндров 7 и 8 — система Ni-pulse, для двигателей с числом цилиндров более 12 — модульный преобразователь импульсов. Система Ni-pulse — оригинальная разработка фирмы ННІ, обеспечивающая повышение показателей топливной экономичности и снижение вредных выбросов.

Надежность блока впрыска, который по своим функциям аналогичен топливному трубопроводу высокого давления, подтверждена опытом эксплуатации двигателей H21/32 и H25/33. На двигателе H32/40 применен такой же блок впрыска, расположенный между топливным насосом высокого давления и головкой блока, что повышает его надежность (при давлении впрыска более 1800 бар) и упрощает подвод топлива.

Оптимизация шатуна (рис. 6) была направлена на снижение его веса и уменьшение деформации верхнего и нижнего подшипников, что является

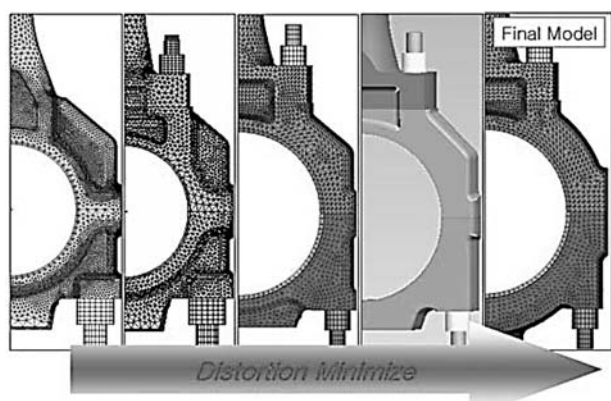


Рис. 6. Варианты конструкции шатунного подшипника коленвала (стрелка показывает направление увеличения жесткости по мере совершенствования конструкции, справа — окончательный вариант)

одним из важнейших факторов повышения ресурса подшипника. С помощью нелинейного МКЭ рассчитана диаграмма деформации верхнего и нижнего подшипников.

Конструкция блока и крышки коренного подшипника была оптимизирована с точки зрения повышения их прочности и вибростойкости. Были проведены расчеты прочности двигателя в целом с учетом взаимодействия его компонентов и свойств конструкционных материалов.

На рис. 7 показано распределение коэффициента запаса по усталостной прочности блока цилиндра и крышки коренного подшипника.

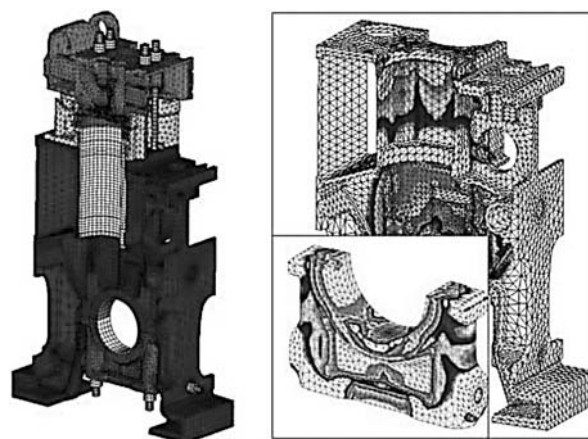


Рис. 7. Разбивка на конечные элементы и распределение коэффициента запаса по усталостной прочности блока цилиндра и крышки коренного подшипника

С помощью методов вычислительной гидродинамики был оптимизирован гидравлический тракт системы охлаждения, включая головку блока, рубашку охлаждения, втулки цилиндра и клапаны. При этом была изменена геометрия водяного тракта для предотвращения образования застойных зон в отдельных местах.

Геометрия вставок, образующих канал охлаждения втулки цилиндра, была выбрана из условия поддержания заданной температуры верхней части втулки (рис. 8). Вставки, обеспечивающие эффективное охлаждение верхней части цилиндрической втулки, состоят из двух кольцевых деталей, которые насажены на втулку с помощью прессовой посадки, что является наиболее экономичным решением.

Поверочный расчет вставки выполнялся с учетом действующих на нее механических и тепловых нагрузок, с помощью МКЭ и методов вычислительной гидродинамики (рис. 9).

Коленвал является одним из важнейших компонентов двигателя, и при его расчете должны быть заложены коэффициенты запаса прочности, достаточные для обеспечения необходимой надежности. Что касается вибрации, то проек-

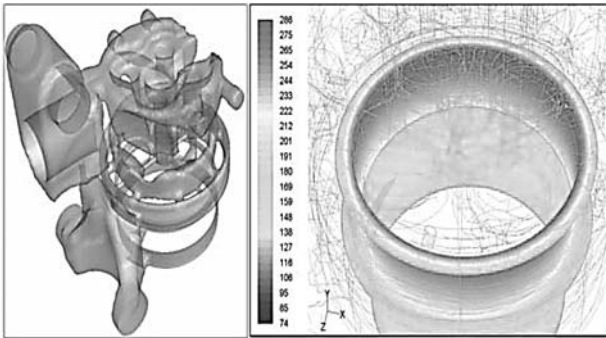


Рис. 8. Геометрия каналов охлаждающей жидкости и распределение температур в верхней части втулки цилиндра

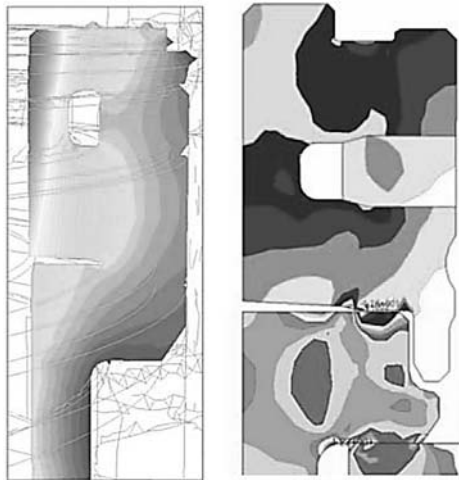


Рис. 9. Распределение температур и напряжений во вставке втулки цилиндра

танты, тщательно все взвесив, пришли к выводу, что в рядных двигателях этой серии можно обойтись без гасителя крутильных колебаний.

При этом пришлось оптимизировать конструкцию пальца кривошипа, колена и коренной шейки вала, что обеспечило к тому же ряд дополнительных преимуществ.

А именно, увеличение диаметра пальца кривошипа и коренной шейки вала позволило придать им достаточную жесткость и разработать технологию экономичного производства качественных подшипников для применения как на рядных, так и на V-образных моделях. Кроме того, конструкция блока со стороны свободного конца вала без гасителя крутильных колебаний получилась более компактной.

Как показывают результаты расчетов крутильных колебаний, напряжения в коленвале соответствуют требованиям M53 IACS (Международной ассоциации классификационных обществ). Для проверки результатов расчетов были проведены измерения крутильных колебаний свободного конца вала во всем диапазоне скорости двигателя, определяя таким образом критические значения скорости. Результаты расчетов

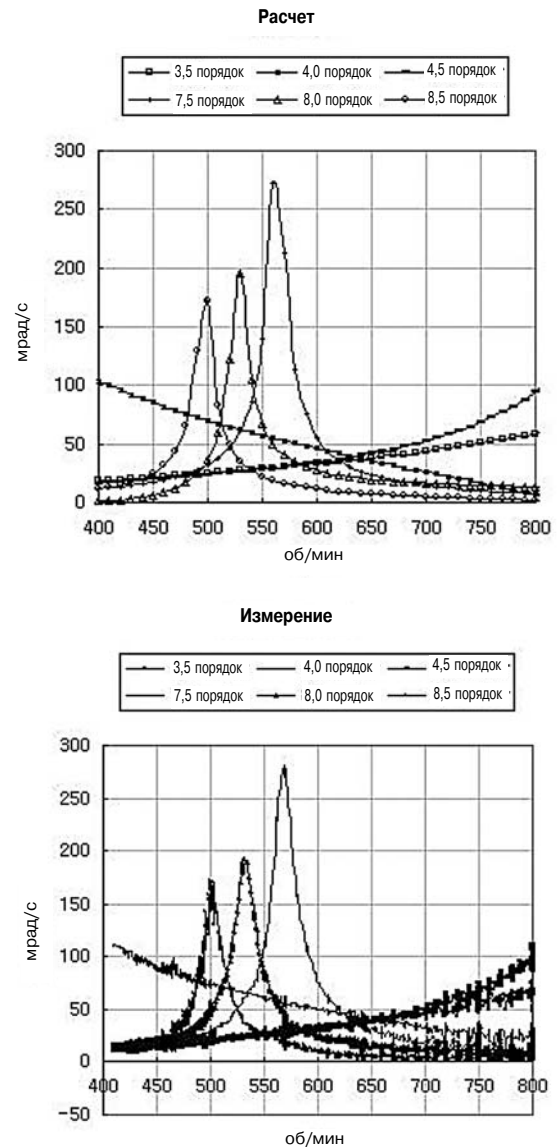


Рис. 10. Сравнение результатов расчетов и измерений амплитуды крутильных колебаний

и измерений показаны на рис. 10, из которого видно, что эти результаты, т. е. резонансные значения скорости и амплитуды всех гармоник, в обоих случаях практически совпадают.

Как и в двигателе N17/28, шестерня распределителя перенесена на свободный конец коленчатого вала, что позволило уменьшить число шестерен гитары и упростить сборку.

На рис. 11 показаны технико-экономические показатели опытного образца 8-цилиндрового двигателя 8N32/40, полученные в ходе его испытаний. Для достижения приемлемого компромисса между требованиями топливной экономичности и количеством вредных выбросов был выбран цикл Миллера со степенью сжатия 15.

С помощью визуализации топливного факела были получены характеристики факела — глубина проникновения и угол раскрытия конуса факела.

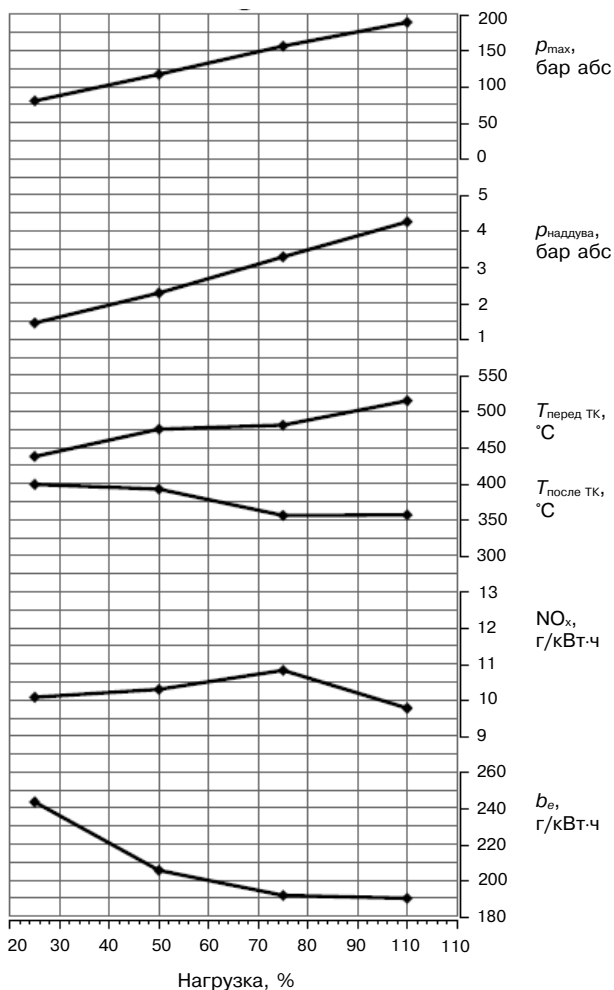


Рис. 11. Результаты испытаний двигателя 8Н32/40 (нагрузка генератора 4000 кВт при 720 об/мин)

На рис. 12 показана визуализация нескольких последовательных фаз развития топливного факела. Было проведено моделирование для оценки влияния конфигурации сопла на характеристики двигателя, в том числе экологические.

Результаты моделирования сравнивались, прежде всего, с данными, полученными при испытаниях. При этом исследовались различные типы сопел и проводилась их оптимизация по расходу топлива и выбросам NO_x .

На рис. 13 показаны расчетная сетка и распределение температур в момент, соответствующий 15° после ВМТ, при разных конфигурациях сопла.

Для экономии машинного времени и уменьшения трудоемкости расчета факел разбивается на сегменты соответственно числу отверстий сопла форсунки, и расчет проводится для одного сегмента.

В расчете варьировались размеры сопла и число отверстий, и исследовалось влияние обоих факторов на выбросы NO_x и расход топлива.

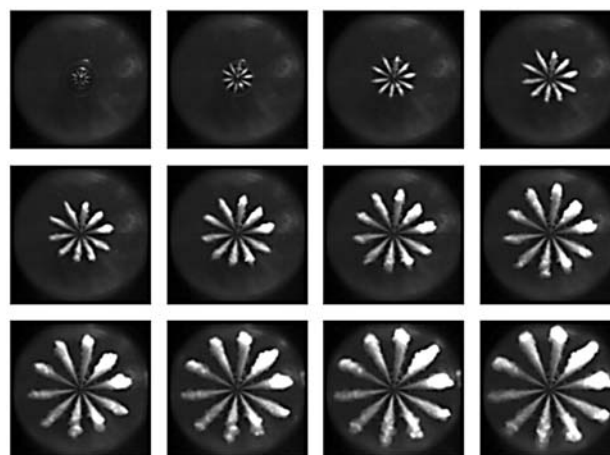


Рис. 12. Визуализация нескольких последовательных фаз развития топливного факела (нагрузка 100% при 720 об/мин)

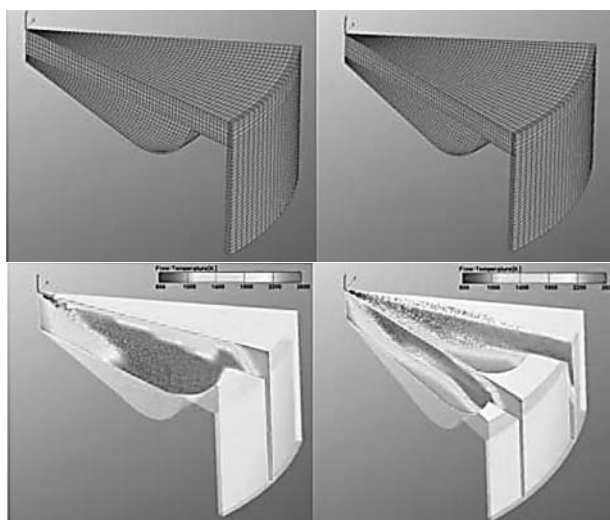


Рис. 13. Генерация расчетной сетки и распределение температуры внутри факела в зависимости от конфигурации сопла

Система автоматики

Фирма ННІ разработала высоконадежную модульную систему автоматики, управления и защиты двигателя на микропроцессорной основе. Для этого в исследовательском центре ННІ была сформирована специальная команда. Базовый модуль и модуль защиты системы отвечают всем требованиям классификационных обществ. Они являются основой при создании аналогичных систем для дизелей с системой common rail, газовых и других двигателей.

Заключение

Была успешно создана новая модель дизеля HiMSEN H32/40, востребованная на рынке и предназначенная для привода стационарных и судовых дизель-генераторов, в том числе устанавливаемых на контейнеровозах. В ней воплощена проектная концепция HiMSEN, получившая название PRACTICAL engine. Говоря о перспек-

Основные параметры семейства двигателей NiMSEN

| Engine Type | | H17/24 | | H17/24G | | H17/28 | | H21/32 | | | | H25/33 | | | | H32/40 | | H32/40V | | | | |
|-------------------|---------------------------------|--------|------|---------|--|--------|------|--------|------|------|------|--------|------|------|------|--------|------|---------|-------|-------|-------|-------|
| Bore | mm | 170 | | 170 | | 170 | | 210 | | | | 250 | | | | 320 | | 320 | | | | mm |
| Stroke | mm | 240 | | 240 | | 280 | | 320 | | | | 330 | | | | 400 | | 400 | | | | mm |
| Engine speed | rpm | 1000 | 1200 | 1000 | 1200 | 900 | 1000 | 720 | 750 | 900 | 1000 | 720 | 750 | 900 | 1000 | 720 | 750 | 720 | 750 | 720 | 750 | rpm |
| Output/cyl. | kW | 110 | 130 | 90 | 110 | 115 | 125 | 160 | 160 | 200 | 200 | 240 | 250 | 290 | 300 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 | kW |
| Piston speed | m/s | 8.0 | 9.6 | 8.0 | 9.6 | 8.4 | 9.3 | 7.7 | 8.0 | 9.6 | 10.7 | 7.9 | 8.3 | 9.9 | 11.0 | 9.6 | 10.0 | 9.6 | 10.0 | 9.6 | 10.0 | m/s |
| BMEP | bar | 24.2 | 23.9 | 19.8 | 20.2 | 24.1 | 23.6 | 24.1 | 23.1 | 24.1 | 21.7 | 24.7 | 24.7 | 23.9 | 22.2 | 25.9 | 24.9 | 25.9 | 24.9 | 24.9 | 24.9 | bar |
| Pmax | bar | 165 | 165 | 160 | 160 | 170 | 170 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 190 | 190 | 190 | 190 | 190 | bar |
| SFOC | g/kWh | 195 | 197 | | | 193 | 193 | 186 | 186 | 187 | 189 | 184 | 184 | 185 | 185 | 183 | 185 | 183 | 183 | 184 | 184 | g/kWh |
| Engine Power [kW] | Cylinder in line | 5 | 500 | 585 | 450 | 550 | 520 | 550 | 800 | 800 | 900 | 900 | | | | | | | | | | 12 |
| | | 6 | 660 | 780 | 540 | 660 | 690 | 750 | 960 | 960 | 1200 | 1200 | 1440 | 1500 | 1740 | 1800 | 3000 | 3000 | 6000 | 6000 | 6000 | 16 |
| | | 7 | 770 | 910 | 630 | 770 | 805 | 875 | 1120 | 1120 | 1400 | 1400 | 1680 | 1750 | 2030 | 2100 | 3500 | 3500 | 8000 | 8000 | 8000 | 18 |
| | | 8 | 880 | 1040 | 720 | 880 | 920 | 1000 | 1280 | 1280 | 1600 | 1600 | 1920 | 2000 | 2320 | 2400 | 4000 | 4000 | 9000 | 9000 | 9000 | 20 |
| | | 9 | | | | | | | 1440 | 1440 | 1800 | 1800 | 2160 | 2250 | 2610 | 2700 | 4500 | 4500 | 10000 | 10000 | 10000 | |
| Fuel Oil | DO, MDO HFO180 cSt @50 °C | | LNG | | HFO upto ISO 8217 RMH55(700 cSt@50 °C) | | | | | | | | | | | | | | | | | |

тивах новой модели в этом высококонкурентном сегменте рынка, НИИ особо подчеркивает такие ее качества, как удобство в эксплуатации и обслуживании, экологическая чистота, экономическая эффективность и высокая надежность, достигнутые благодаря применению самых современных фирменных технологий.

Модель H32/40 завершает мощностной ряд двигателей НИИ — H17/24, H17/28, H21/32, H25/33, который покрывает потребности в диапазоне мощности от 450 до 10 000 кВт, причем указанные двигатели могут использоваться в качестве главных судовых, стационарных и судовых дизель-генераторов.



НОВОСТИ ЗАО «ТРАНСМАШХОЛДИНГ»

КОЛОМЕНСКИЙ ЗАВОД ОТПРАВИЛ НА ВЕРФЬ ДИЗЕЛЬ-ДИЗЕЛЬНЫЙ АГРЕГАТ ДЛЯ КОРВЕТА «БОЙКИЙ»

Коломенский завод отправил на ОАО «Судостроительный завод "Северная верфь"» (Санкт-Петербург) первый дизель-дизельный агрегат ДДА12000 для главной энергетической установки многоцелевого сторожевого корабля «Бойкий» проекта 20380 класса «корвет». В скором времени на верфь будет отправлен и второй ДДА (силовая установка каждого корвета состоит из двух агрегатов).

ДДА12000 был создан специалистами Коломенского завода по заказу ФГУП «Центральное морское конструкторское бюро "Алмаз"» для Военно-морского флота России и успешно прошел межведомственные испытания в 2006 г.

Дизель-дизельные агрегаты выполняют на корабле функцию главной энергетической установки. Каждый ДДА состоит из двух дизелей 16Д49 и реверс-редукторного агрегата. Особенностью ДДА является обеспечение на режимах реверсирования высокой мощности при минимальных расходах топлива и масла. Он оснащен современной микропроцессорной системой управления и контроля основных параметров работы.

Ранее пропульсивные комплексы на базе коломенских агрегатов ДДА12000 были установлены заказчиком на головном корвете «Стережущий» (с 2008 г. несет службу в Балтийском море), а также на корвете «Сообразительный», который готовится к спуску на воду в ближайшее время.

Корабли проекта 20380 предназначены для патрулирования прибрежных вод, эскортных и противолодочных операций; при их создании широко применялись технологии, обеспечивающие малую заметность для радаров.

В настоящее время Коломенский завод участвует в нескольких проектах ВМФ России по строительству надводных кораблей классов «корвет» и «фрегат», подводных лодок проектов 636, 1650, 01570. Кроме того, коллектив предприятия работает над созданием дизеля нового поколения Д500 типоразмерного ряда 26,5/31. Расчетные характеристики проектируемого двигателя соответствуют перспективным требованиям, а в его конструкцию заложены резервы его дальнейшей модернизации.