

РАЗВИТИЕ МОДЕЛЬНОГО РЯДА ДВИГАТЕЛЕЙ КОНЦЕРНА «HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES» (материалы конгресса CIMAC 2013)

Выпуск в 2001 г. корейским многопрофильным концерном «Hyundai Heavy Industries» (HHI) среднеоборотного дизеля H21/32 собственной конструкции положил начало семейству 4-тактных двигателей HiMSEN, общее число которых в мире к настоящему времени превысило 8800 единиц. Одновременно велась работа над созданием других моделей ряда: минимальной (H17/28) и максимальной (H46/60V), которая имела наибольшую размерность в классе среднеоборотных двигателей, разработанных до 2012 г. Быстрое и стабильное повышение годового выпуска двигателей свидетельствует об их растущей популярности на внутреннем и международном рынках.

Настоящий обзор, составленный по материалам 27 Конгресса CIMAC, посвящен развитию двигателей HiMSEN — высокооборотных, на базе исходной модели H17V и среднеоборотных размерностью 46/60. Представлены проектные концепции создания новых двигателей, в том числе блочный принцип построения, последовательное функциональное развитие, оптимизация по характеристикам расхода топлива и вредных выбросов, снижение эксплуатационных затрат за счет унификации, повышения ресурса компонентов и узлов, а также максимального упрощения техобслуживания двигателей.

Перевод докладов выполнен к.т.н. Г. Мельником

МОДЕЛЬ H46V ЗАВЕРШАЕТ МОДЕЛЬНЫЙ РЯД ДВИГАТЕЛЕЙ HiMSEN

*Chan Yun Seo, Sung Hyeok Kim,
Jong Suk Kim, Ju Tae Kim, Joo Ho Jin,
Hyundai Heavy Industries.Co.,LTD.,
Республика Корея*

Реферат

«Hyundai Heavy Industries» (HHI), один из мировых лидеров в области двигателестроения, работает над созданием новых моделей дизелей, и совершенствованием существующих. Учитывая пожелания заказчиков, компания постоянно улучшает основные характеристики дизелей и газовых двигателей, такие как агрегатная мощность, спектр применяемого топлива, экологические и эргономические показатели. Одной из последних разработок HHI стал двигатель H46V размерностью ЧH46/60. Эта модель должна обеспечить существенное снижение вредных выбросов и расхода топлива, а также повышение надежности. Создание H46V позволило расширить типоразмерный ряд двигателей HHI в диапазоне мощности от 575 кВт (5H17/28) до 26 000 кВт (20H46/60V), включая двигатели HiMSEN для судовых силовых установок, стационарных установок и военных объектов. Уникальная конструкция новой среднеоборотной машины H46V не только позволяет обеспечить выполнение действующих и перспективных экологических требований, но и заметно облегчает обслуживание двигателя. Для этого были использованы самые современные технологии, а также выполнен большой объем расчетно-экспериментальных работ, в том числе

по повышению прочностных характеристик (снижение тепловых нагрузок, шума и вибрации), внедрению высокоэффективного турбонаддува, цикла Миллера, совершенствованию эффективности систем смазки и охлаждения, оптимизации геометрии камеры сгорания и конструкции форсунок. Кроме того, в конструкции применены технологии VVT/VIT, уже успешно отработанные на предыдущих моделях HiMSEN меньшей размерности. В докладе представлен новый двигатель H46V, демонстрирующий новые возможности и технологии HHI, которые позволяют оперативно реагировать на быстро меняющиеся требования рынка и другие конъюнктурные факторы.

Введение

Фирмой «Hyundai Heavy Industries» (HHI) был разработан ряд двигателей внутреннего сгорания, в том числе H17/28, H21/32, H25/33 и H32/40. На базе выполненных исследований были разработаны форсированные рядные и V-образные двигатели.

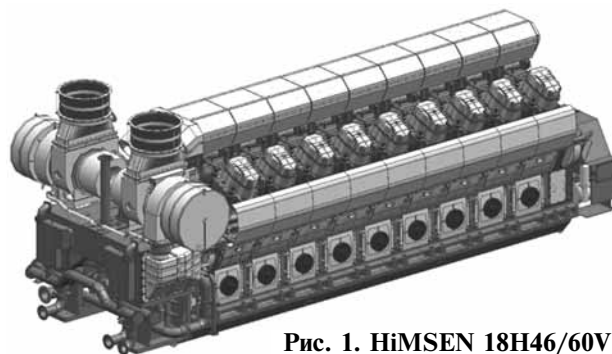


Рис. 1. HiMSEN 18H46/60V

В настоящее время ННІ завершает разработку модели NiMSEN 18H46/60V (рис. 1), нового модельного ряда среднеоборотных четырехтактных двигателей (рис. 1). Двигатель отличается высокой удельной мощностью по отношению к весогабаритным показателям. Цилиндровая мощность составляет 1300 кВт при 600 об/мин. Типоразмерный ряд включает конфигурации 12V, 14V, 16V, 18V и 20V, покрывая диапазон мощности от 15 600 до 26 000 кВт, что делает данный двигатель самым мощным в своем классе машин.

Требования рынка

При выборе двигателя для большинства потребителей решающее значение имеют такие факторы, как низкие эксплуатационные расходы, низкая стоимость жизненного цикла, надежность и высокий КПД, а также соответствие требованиям действующих экологических нормативов. Оценивая требования рынка более детально, можно отметить следующее.

Во-первых, имеет место жесткая конкуренция между двигателестроителями всего мира в стремлении создать двигатель, который, наряду с минимальным расходом топлива, обеспечил бы минимальные эксплуатационные расходы в течение жизненного цикла, включая стоимость запчастей.

Во-вторых, одним из главных показателей качества двигателя считается его удельная мощность, что требует от проектантов создания максимально жестких конструкций при минимальном весе.

Наконец, не следует забывать о нормативах по выбросам NO_x IMO Tier 2, которые вступили в силу для судов, построенных после 1 января 2011 г., и Tier 3 — для судов, построенных после 1 января 2016 г. При этом если соответствие Tier 2 может быть обеспечено за счет так называемых «внутренних» мероприятий, то для достижения уровня Tier 3 такие меры могут оказаться недостаточными. Кроме того, последние дополнения к Конвенции MARPOL предписывают обеспечить пошаговое снижение содержание серы в топливе.

Конструктивные особенности

Основная задача, которую поставили перед собой разработчики H46V, состоит в создании достаточно простой конструкции модульного типа, сочетающей высокие мощностные показатели с использованием последних технических достижений в данной области. Исходя из этого, было сведено к минимуму количество трубных соединений и число компонентов двигателя для повышения удобства эксплуатации.

Так, например, воздушный тракт с полостями для охлаждающей воды, выполнен по модуль-

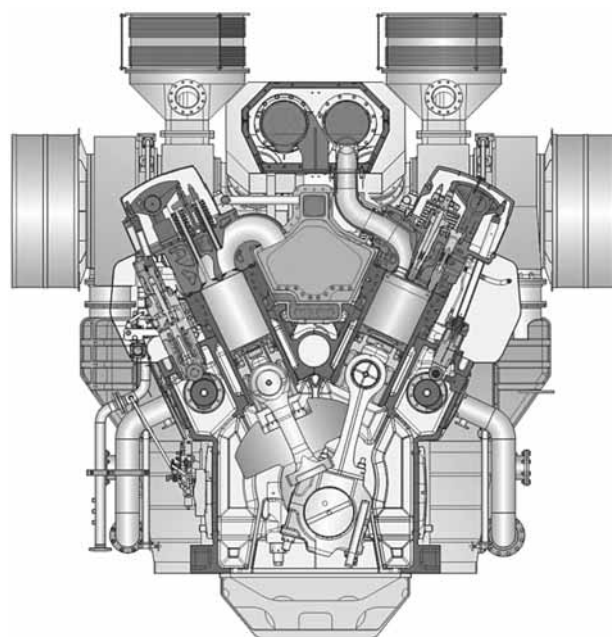


Рис. 2. Поперечное сечение дизеля H46V

ному принципу и соединяет входной патрубок с цилиндрами.

Повышение удельной мощности достигается упрочнением всех элементов конструкции с использованием новейших методов расчета и результатов натуральных испытаний.

Компоненты двигателя

Блок цилиндров

Расчет основных структурных элементов, таких как блок цилиндров, втулки цилиндров, головки цилиндров и крышки коренных подшипников, производился в исследовательском центре ННІ с использованием метода конечных элементов (МКЭ) (рис. 4). В результате была разработана легкая конструкция блока цилиндров из чугуна с шаровидным графитом, отличающаяся низким уровнем напряжений.

Выполнена работа по оптимизации конструкции компонентов, влияющих на рабочие характеристики двигателя, таких как форма воздушных окон на входе, геометрия поршня и профили

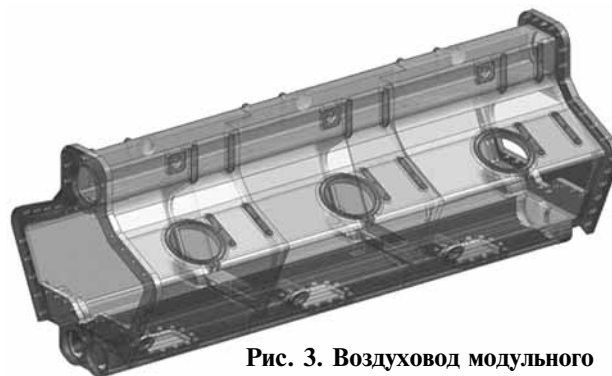


Рис. 3. Воздуховод модульного типа с каналами охлаждения

Таблица 1

Основные параметры двигателя

H46V	
Диаметр цилиндра, мм	460
Ход поршня, мм	600
Скорость, об/мин	600/514
Мощность, кВт/цил	1300/1200
Скорость поршня, м/с	12/10
Степень сжатия	16
ВМЕР, бар	26,1/28,1

Таблица 2

Мощностной ряд двигателей

H46V Output (kWm)						
Cylinder No.	12	14	16	18	20	
Speed (rpm)	514	14,400	16,800	19,200	21,600	24,000
	600	15,600	18,200	20,800	23,400	26,000

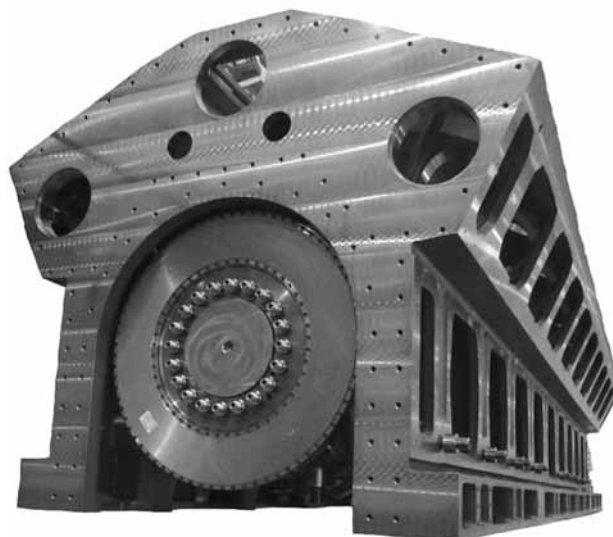


Рис. 5. Блок цилиндров после механической обработки

кулаков. Кроме того, в двигателе был применен глубокий цикл Миллера и турбокомпрессор с высокой степенью повышения давления.

Для оптимизации процесса изготовления отливки на ранней стадии проектирования было проведено моделирование процесса литья блока цилиндров (рис. 5). При этом был использован один большой песчаный стержень, помещенный внутрь картера и способный выдерживать максимальное количество литейных циклов.

Широкие смотровые окна для коленчатого и распределительного валов с обеих сторон картера гарантируют удобство доступа к внутренним компонентам и простоту их обслуживания.

Головка цилиндра

Головка цилиндра выполнена литьем из чугуна с шаровидным графитом. В головке цилиндра в сборе (рис. 6) размещены клапаны,

форсунка, пусковой воздушный клапан и т. д. Две полости для охлаждающей воды и двойное огневое днище предохраняют головку от перегрева.

Был промоделирован ряд вариантов конструкции головки для нахождения оптимальной (с точки зрения минимальной тепловой нагрузки) конфигурации.

Процесс литья головки цилиндра методом свободной заливки представляет значительные технологические сложности, поскольку в этом процессе задействовано 11 стержней. Поэтому исследователи НИИ уже на стадии эскизного проектирования выполнили работу по моделированию процесса литья, чтобы свести литейные дефекты к минимуму.

Гибридная система топливоподачи

Гибридная система топливоподачи позволяет улучшить рабочие показатели двигателя и снизить

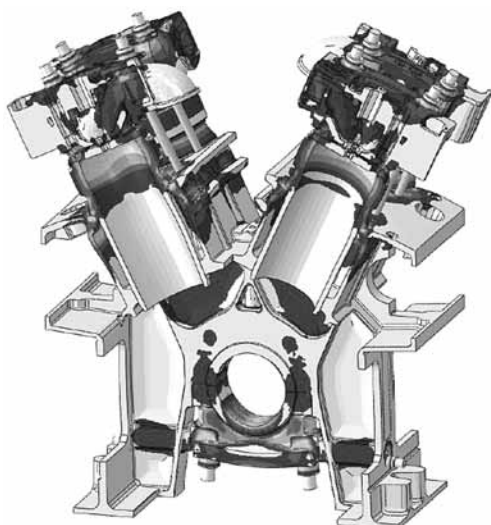


Рис. 4. Результат расчета прототипа двигателя с помощью МКЭ

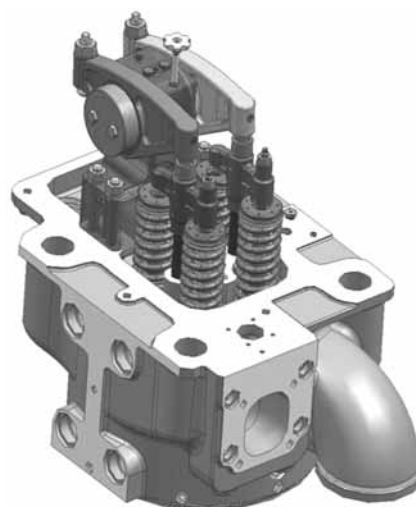


Рис. 6. Головка цилиндра в сборе

дымность отработавших газов при малых нагрузках. Применение форсунок с электронным управлением позволило обеспечить необходимое давление впрыска и осуществить предварительный впрыск на малых нагрузках, при использовании механического топливного насоса высокого давления.

Регулирование фаз газораспределения (VVT)

Система регулирования фаз газораспределения (VVT — variable valve timing) позволяет регулировать количество поступающего воздуха, изменяя угол закрытия клапана (рис. 7).

Применение VVT позволяет улучшить рабочие показатели двигателя и снизить дымность ОГ на малых нагрузках. Подобная система для двигателя меньшей размерности уже создана, и вскоре будет установлена также на H46V.

Кулачковый вал / Распределительный механизм

Распределительный механизм (гитара) состоит из 8 шестерен. При этом вращение двух кулачковых валов в противоположных направлениях обеспечивается установкой дополнительной шестерни во втором блоке цилиндров (рис. 8).

Коленвал

Коленвал высокофорсированного двигателя должен обладать достаточной жесткостью. Все галтели должны быть аккуратно скруглены и иметь высокую степень чистоты обработки поверхности.

Химический состав чугуна для отливаемых деталей двигателя тщательно подбирался с тем, чтобы получить максимальную жесткость и оптимальные механические свойства.

Выбранная схема распределительного механизма позволяет использовать одинаковые кулач-



Рис. 7. Механизм VVT для двигателя малой размерности

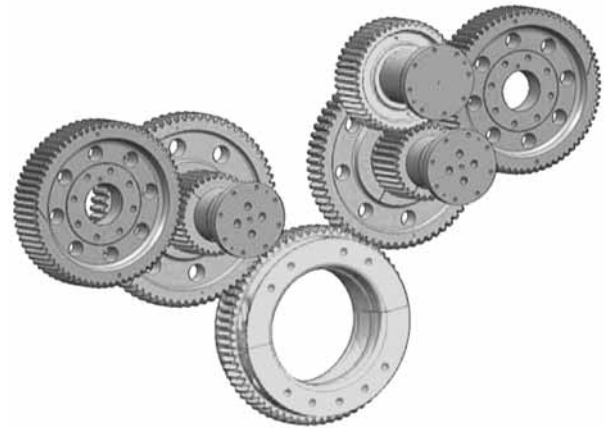


Рис. 8. Кинематическая схема гитары

ковые валы в обоих блоках V-образного двигателя. Такие же кулачковые валы могут использоваться и в рядных двигателях (рис. 9–10).

В целях минимизации числа компонентов кулачковый вал используется в качестве масляного канала для собственной смазки, а также смазки распределительного механизма и ТНВД.

Коленвал двигателя выполнен как изделие высшего мирового уровня (рис. 11). Это стало возможным благодаря приобретенному фирмой ННІ уникальному опытуковки и механической обработки коленвалов для самых различных двигателей, в том числе двухтактных.

Гаситель крутильных колебаний (демпфер T/V)

Демпфер T/V (torsional vibration damper) устанавливается на высокопрочном коленчатом валу для ослабления крутильных колебаний. Диаграмма крутильных колебаний приведена на рис. 12.

В зависимости от вибросхемы двигателя при различном числе цилиндров гаситель крутильных колебаний может быть пружинного или вязкостного типа.

Поршень и шатун

Поршень состоит из стального днища и юбки, выполненной из чугуна с шаровидным графитом. Такая конструкция обеспечивает высокую жест-



Рис. 9. Кулачковый вал в сборе



Рис. 10. Сегмент кулачкового вала

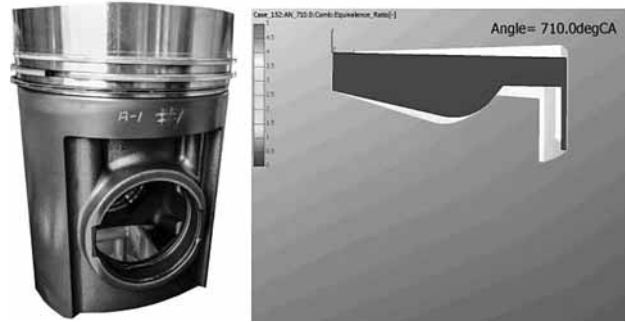


Рис. 13. Поршень — общий вид и оптимизация профиля камеры сгорания

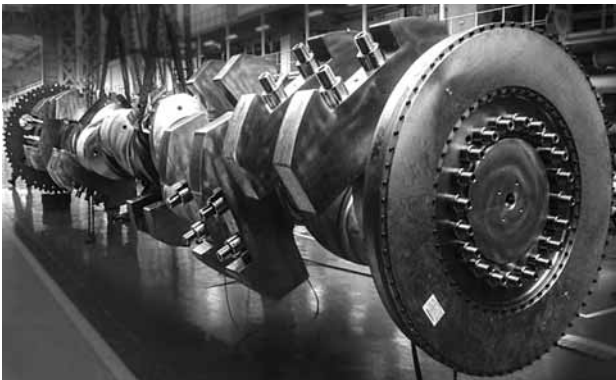


Рис. 11. Коленвал в сборе

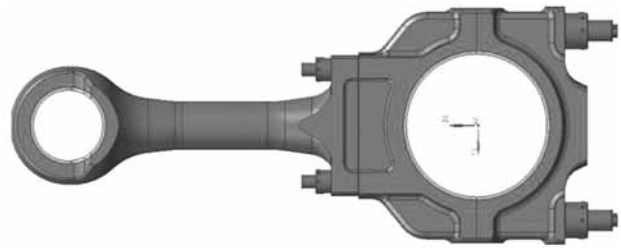


Рис. 14. Шатун в сборе

объемной штамповки с последующей механической обработкой. Функционально он состоит из трех частей — стержень, верхняя и нижняя головки (рис. 14).

Большой опыт ННІ в области проектирования шатунов позволил создать шатун достаточной жесткости, устойчивый к фреттингу. Для предотвращения фреттинга между стержнем шатуна и верхней частью нижней головки устанавливается прокладка.

Гильза цилиндра

Гильза цилиндра должна выдерживать высокие динамические нагрузки, тепловые нагрузки и нагрузки фиксации. При ее проектировании особое внимание уделялось концентраторам напряжений, в частности сопряжению цилиндрической поверхности с посадочным фланцем. В процессе исследования также моделировались

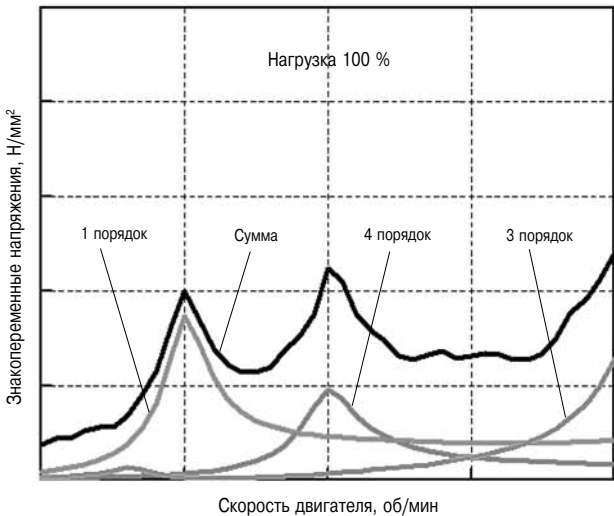


Рис. 12 Диаграмма крутильных колебаний

кость и относительно малый вес поршня. Форма камеры в поршне выбрана из условия оптимизации процесса сгорания с точки зрения расхода топлива (рис. 13).

Поршень имеет три кольца с хромовым покрытием для повышения износостойкости. Верхнее поршневое кольцо имеет хромо-керамическое покрытие, придающее особую устойчивость к износу его наружной поверхности.

Шатун изготавливается из стального сплава, легированного хромом и молибденом, методом

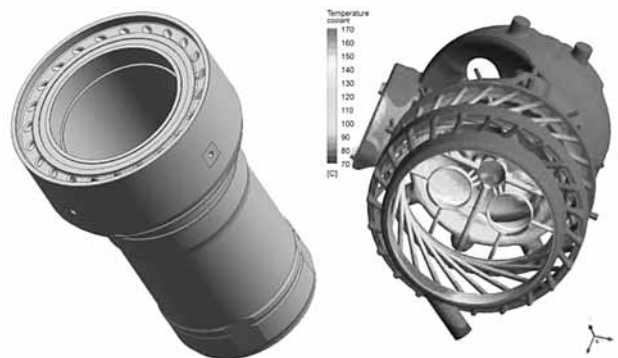


Рис. 15. Схема гильзы цилиндра и визуализация модели охлаждения втулки

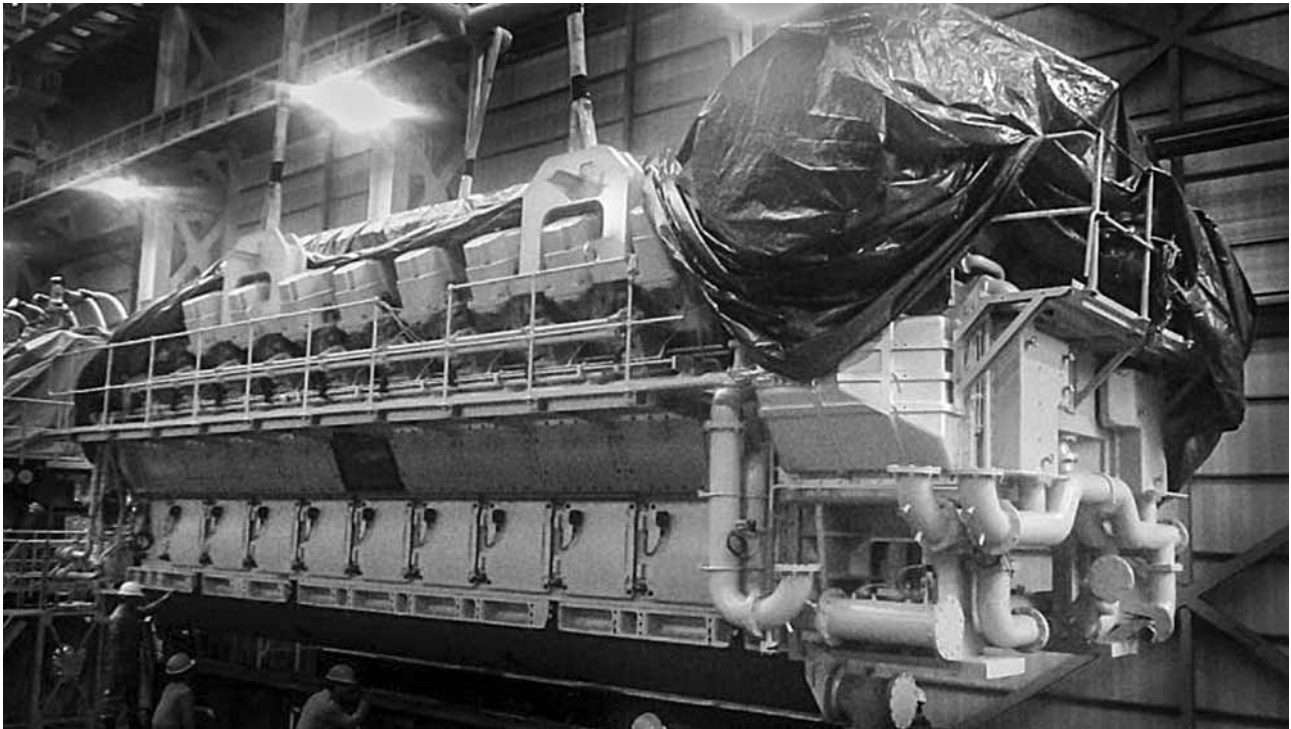


Рис. 16. Общий вид двигателя H46V на испытательном стенде

охлаждающие полости во втулке и в головке цилиндра для достижения максимальной эффективности охлаждения (рис. 15).

Гильза цилиндра может изготавливаться из серого чугуна специального состава. Рабочая поверхность гильзы подвергается хонингованию в целях создания микроструктуры для удержания масляного слоя.

Верхнее (скребковое поршневое) кольцо уменьшает расход масла и препятствует нагарообразованию в верхней части втулки.

Выводы

Создание двигателя H46V позволило завершить формирование модельного ряда среднеоборотных двигателей HiMSEN.

Завершен первый этап функциональных и ресурсных испытаний двигателя, результаты которых подтвердили достижение показателей, близких к целевым. Дальнейшая доработка конструкции будет выполнена на предсерийных образцах для различных применений.

ННІ непрерывно работает над повышением мощности, снижением вредных выбросов, расхода топлива и веса двигателей. На всех этапах создания новой модели — ОКР, проектирование и изготовление — первоочередное внимание уделялось как «внутренним», так и «внешним»

мероприятиям, направленным на снижение вредных выбросов до уровня, определяемого действующими и перспективными стандартами.

Для достижения уровня выбросов NO_x IMO Tier 3 потребуются использование «внешних» мероприятий, т. е. очистка отработавших газов.

На начало 2013 г. намечено проведение типовых испытаний. По завершении типовых испытаний будут проведены ресурсные испытания H46V, на основании которых можно будет оценить стоимость жизненного цикла и показатели надежности двигателя с системой очистки газов.

Двигатель будет также испытан на соответствие военным стандартам, поскольку в дальнейшем планируется использовать его на одном из военных проектов.

Учитывая мировую тенденцию постепенного перехода от жидкого топлива к газу, ННІ планирует разработку газового варианта H46V. Кроме того, будут созданы версии рядного двигателя для различных видов применения.

Литература

1 Park J.K. et al., «Continuous Development of Hyundai HiMSEN Family», Page № 222, CIMAC 2010 Bergen.

**H17V – ПЕРВЫЙ ВЫСОКООБОРОТНЫЙ
ДВИГАТЕЛЬ HiMSEN**

*Se Ho Jeong, Sung Soo Jung, Su Weon Noh,
Yeong Seok Ryoo, Jong Suk Kim,
Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd.,
Республика Корея*

Реферат

За последнее десятилетие фирма «Hyundai Heavy Industries» (НН) накопила значительный опыт в области создания среднеоборотных двигателей разных мощностных диапазонов. Надежные технологии, хорошо зарекомендовавшие себя при разработке семейства двигателей HiMSEN, послужили основой для создания в 2011 г. первого высокооборотного двигателя типа H17V. Эти двигатели размерностью 17/21 при частоте вращения 1500/1800 об/мин имеют номинальную мощность от 1,5 до 3,5 МВт. Перед разработчиками была поставлена задача — создать компактный дизель с высоким КПД и минимумом вредных выбросов. В базовой модели двигателя используются электроуправляемые форсунки с механическим приводом — решение, рассматриваемое в качестве первой ступени для перехода к электронному управлению. Для того чтобы полностью реализовать все преимущества оригинальных конструкторских решений, были привлечены самые современные технологии и проведена большая экспериментальная работа. Так, удалось добиться значительного увеличения срока службы трущихся деталей за счет оптимизации системы охлаждения поршня и конструкции шатуна. Для снижения вредных выбросов до уровня IMO Tier 2 были применены такие конструктивные мероприятия, как высоконапорный турбокомпрессор, воздухоохладитель и глубокий цикл Миллера. Новые технические решения позволили существенно снизить удельный расход топлива и выбросы NO_x. Продолжается работа по дальнейшему снижению выбросов NO_x до уровня IMO Tier 3. Для проверки надежности машина была поставлена на 10 000-часовые испытания на стенде НН. Осмотр основных компонентов после заданной наработки позволил обнаружить потенциальные проблемы и спрогнозировать срок службы машины. В настоящем докладе кратко освещены процесс создания двигателя H17V и исследования, направленные на оптимизацию конструкции.

Введение

В 2001 г. состоялась презентация первого среднеоборотного 4-тактного двигателя Hyundai типа H21/32 [1]. Это событие знаменовало появление на рынке нового типоразмерного ряда дизелей, получивших общее название HiMSEN. Одновременно фирма начала работы над созданием других моделей ряда, в том числе

(H17V). Всего фирма «Hyundai Heavy Industries» (НН) к 2013 г. выпустила порядка 8000 среднеоборотных дизелей HiMSEN, используемых в качестве главных и вспомогательных судовых двигателей, а также в стационарных установках. В течение всего указанного периода имел место значительный ежегодный прирост выпуска двигателей. Это говорит о том, что заказчики в полной мере оценили все преимущества концепции двигателей HiMSEN, основанные на принципах Hi-Touch и Hi-Tech [1]. Именно использование принципа Hi-Touch позволило разработать простые и практичные конструкции, а также существенно снизить трудоемкость обслуживания за счет минимизации числа компонентов, а также количества и общей протяженности трубопроводов.

H17V — это первый высокооборотный двигатель собственной разработки «Hyundai». Диаметр его цилиндра равен 170, а ход поршня — 210 мм. В нем использовано большинство принципиальных конструкторских решений, примененных ранее в среднеоборотных двигателях HiMSEN.

Известно, что соображения экономии места в большинстве случаев приводят к заметному усложнению конструкции высокооборотных двигателей. Создателям H17V удалось избежать этой опасности за счет оптимизации расположения компонентов. Тем самым техническое обслуживание двигателя заметно упростилось. Использование автоматизированного проектирования, накопленного опыта и самых передовых технологий позволило выполнить требования IMO Tier 2 при сохранении механической системы впрыска.

Впоследствии на базе H17V планируется создание машин, соответствующих более жестким экологическим нормативам, а именно, дизелей, оборудованных системой common-rail, и газовых двигателей.

Проектная концепция

Выбор типа двигателя

Высокая конкуренция в секторе среднеоборотных двигателей и ужесточение экологических требований побудили НН обратиться к рынку высокооборотных дизелей, способных работать в составе установок самого различного назначения. На основании изучения рынка потребностей было решено сделать H17V базовой моделью для создания высокооборотных двигателей меньшей мощности. То обстоятельство, что двигатель H17V имеет тот же диаметр цилиндра, что и модель рядных среднеоборотных дизелей H17/28, облегчило унификацию и позволило заимствовать ряд конструкторских решений.

Целевые показатели

Двигатели H17V предназначены для использования в качестве главных и вспомогательных

судовых дизелей, приводов стационарных установок и агрегатов морских платформ. Агрегаты будут иметь различную комплектацию в зависимости от конкретного назначения. Марка применяемого дизельного топлива должна быть не ниже No. 2-D по ASTM D975, EN590 или DMA/DMX по ISO 8217. Цилиндровая мощность должна составлять 140 кВт при 1500 об/мин или 160 кВт при 1800 об/мин. Двигатель выпускается в следующих конфигурациях: 12V, 16V, 18V и 20V, обеспечивая диапазон мощности от 1500 до 3500 кВт.

Основные технические характеристики приведены в табл. 1 и 2, а габаритные размеры на рис. 1.

Проектная концепция

Высокооборотный двигатель H17V создавался в рамках проектной концепции Hi-Touch, использованной при разработке семейства среднеоборотных двигателей HiMSEN. Подобная унификация позволила непосредственно использовать большинство компонентов прототипа, уменьшить количество оригинальных деталей и узлов, свести к минимуму количество и протяженность трубопроводов, что существенно облегчает заказчикам и операторам освоение новой машины и ее эксплуатацию.

Концепция Hi-touch, впервые реализованная в 2001 г., иллюстрируется рис. 2 и 3. Проектная концепция Hi-touch позволила создать опытный одноцилиндровый отсек и обеспечить все необходимые внешние коммуникации.

Таблица 1

Основные технические характеристики двигателей

Тип двигателя	H17V	
Диаметр цилиндра, мм	170	
Ход поршня, мм	210	
Скорость двигателя, об/мин	1,500	1,800
Цилиндровая мощность, кВт	140	160
Средняя скорость поршня, м/с	10,5	12,6
ВМЕР, бар	23,5	22,4
Удельный расхода топлива, г/кВт·ч	192	197

Таблица 2

Мощностной ряд двигателей

Двигатель	Скорость	Мощность
	об/мин	кВт
12H17/21V	1500	1,680
	1800	1,920
16H17/21V	1500	2,240
	1800	2,560
18H17/21V	1500	2,520
	1800	2,880
20H17/21V	1500	2,800
	1800	3,200

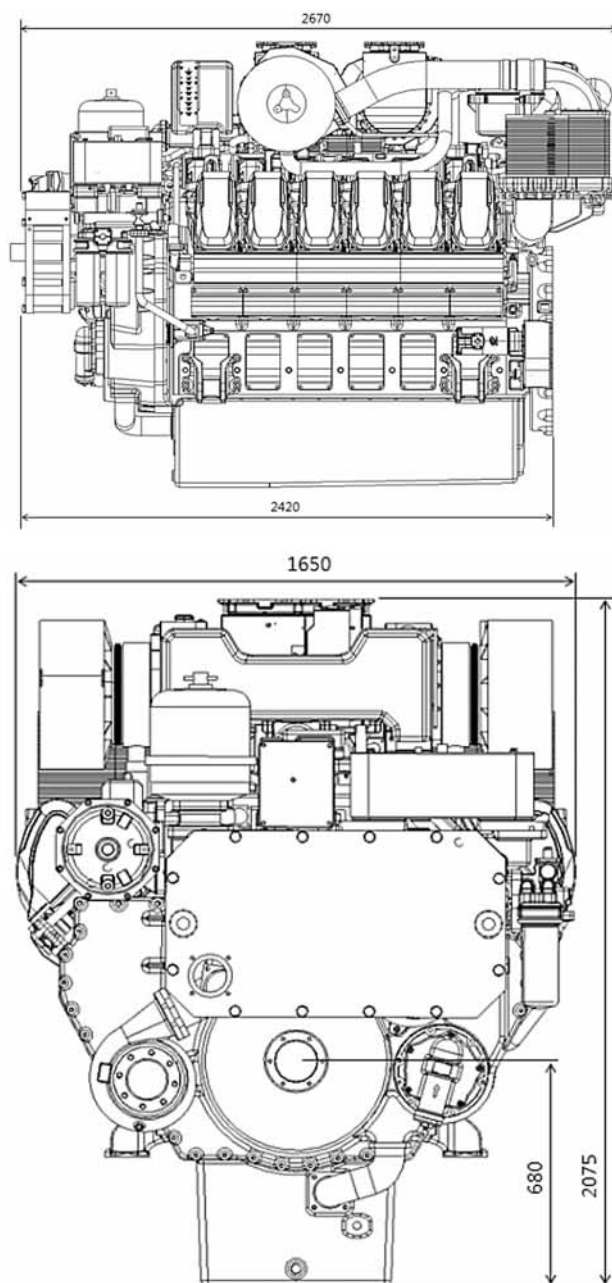


Рис. 1. Габаритный чертеж двигателя 12H17V

Общий вид двигателя H17V в различных конфигурациях, основанных на концепции Hi-touch, представлен на рис. 4 и 5.

История вопроса

Первые среднеоборотные двигатели семейства HiMSEN были выпущены в 2001 г. С тех пор до 2012 г. было разработано 10 моделей этого семейства двигателей, в том числе дизели шести типов (H17/28 [2], H25/33, H25/33V, H32/40 [3], H32/40V, H46/60V), газовые двигатели трех типов (H17/24G, H35/40G, H35/40GV) и один двухтопливный двигатель (H35DF). В ходе работ был накоплен значительный опыт исследований и проектирования, в том числе компьютерного.

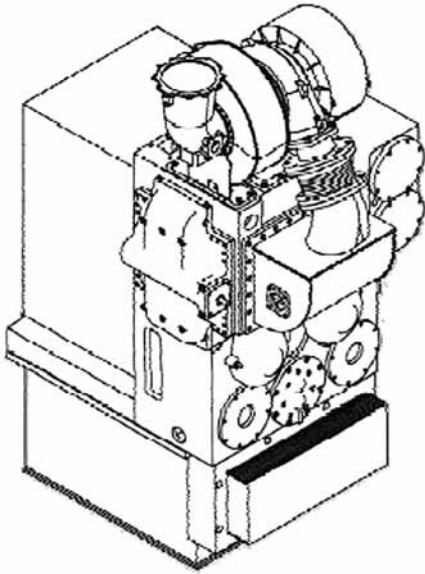


Рис. 2. Модуль воздушноснабжения Н21 — общий вид

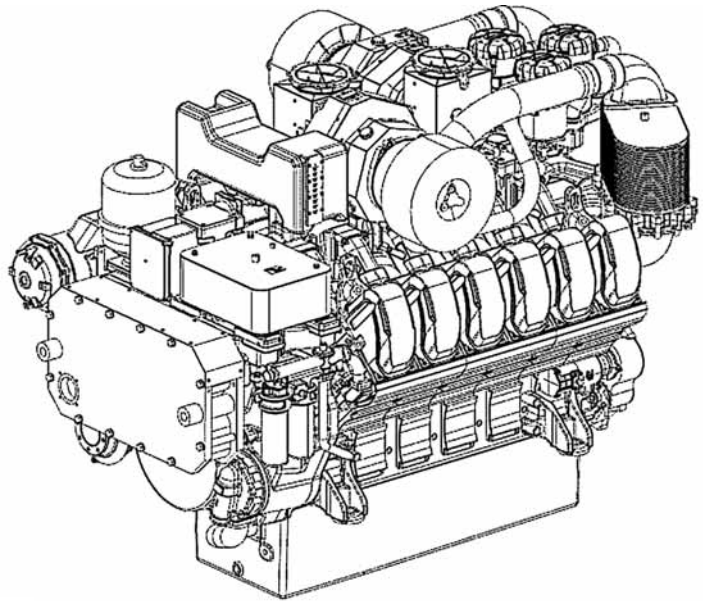


Рис. 4. Двигатель Н17V — общий вид

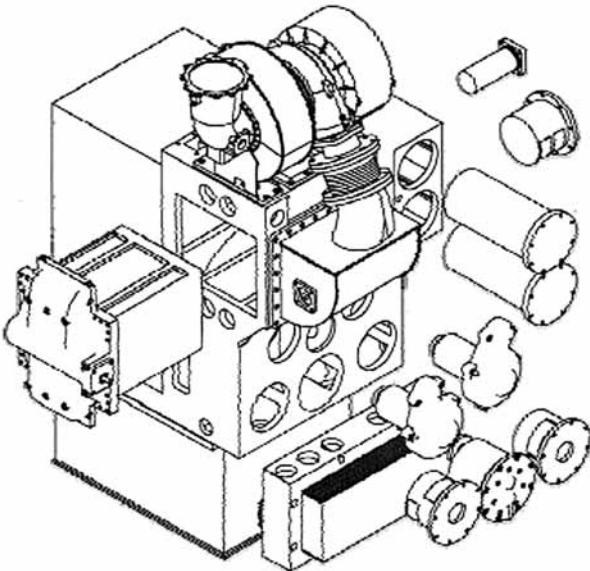


Рис. 3. Непосредственный доступ к модулю воздушноснабжения Н21

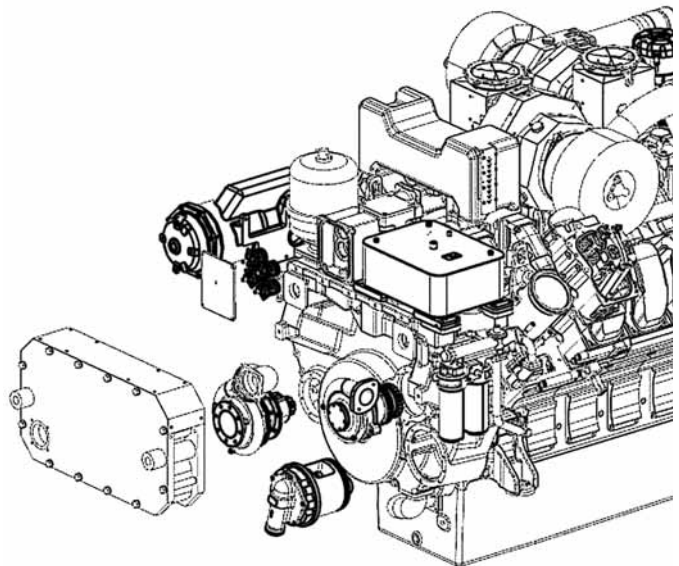


Рис. 5. Двигатель Н17V — возможность непосредственного доступа для техобслуживания

Все это позволило успешно справиться с задачей создания нового высокооборотного двигателя Н17V, отличающегося высокой надежностью и эффективностью.

Система топливоподачи

Наряду с большим опытом создания механических систем топливоподачи, ННН располагает рядом технологий, позволяющих выполнять требования действующих на сегодняшний день экологических нормативов для среднеоборотных двигателей. В таких двигателях, как правило, применяются индивидуальные ТНВД, связанные с форсунками через топливные трубки высокого давления, что обусловлено спецификой работы на тяжелых топливах.

В двигателе Н17V было решено использовать насос-форсунки, поскольку в высокооборотных двигателях тяжелые топлива не применяются, а одним из главных приоритетов становится компактность конструкции. Насос-форсунка двигателя Н17V, отличается от стандартной. Она оптимизирована специально для данного типа двигателя. С целью повышения давления впрыска пришлось изменить ряд конструктивных параметров форсунки, в том числе проходное сечение сопел, коэффициент подачи и угол распыла.

Так как скорость двигателя выросла, скорость распространения факела также должна увеличиться, поскольку сократилось отведенное для сгорания время. Чтобы ускорить процесс сгорания

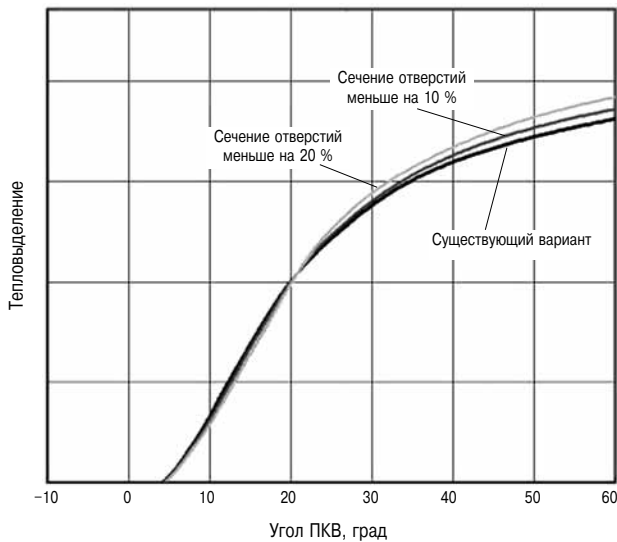


Рис. 6. Зависимость тепловыделения от проходного сечения сопловых отверстий при 100% нагрузке

необходимо повысить тонкость распыливания топлива, для чего нужно увеличить скорость его истечения через сопловые отверстия. Необходимое проходное сечение сопловых отверстий было определено путем одномерного моделирования, а влияние данного изменения на показатели двигателя рассчитывалось с помощью трехмерного моделирования рабочего процесса. На рис. 6 показаны результаты моделирования тепловыделения в зависимости от проходного сечения сопловых отверстий при 100 % нагрузки. Мы видим, что после 20° ПКВ до ВМТ при уменьшении проходного сечения сопел тепловыделение растет благодаря увеличению скорости распространения факела.

Впускной патрубок

Впуск должен быть организован таким образом, чтобы добиться максимальной гомогенности рабочей смеси за счет более эффективной турбулизации потока. На рис. 7 показаны два варианта впускного патрубка — существующий и экспериментальный, разработанный с использованием методов вычислительной гидромеханики (CFD). Влияние геометрии впускного патрубка на показатели рабочего процесса исследовалось с помощью трехмерной модели. На рис. 8 показано распределение коэффициента избытка воздуха



Рис. 7. Два варианта впускного патрубка

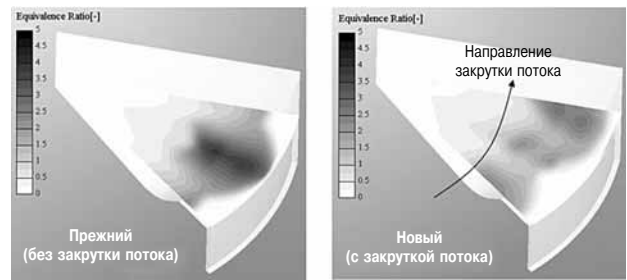


Рис. 8. Распределение стехиометрического коэффициента избытка воздуха для двух вариантов камеры в поршне

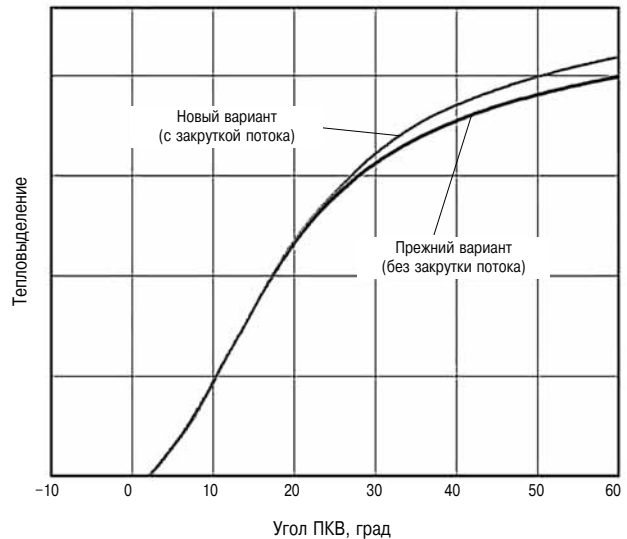


Рис. 9. Кривые тепловыделения для двух вариантов камеры в поршне

в камере сгорания при 30° ПКВ за ВМТ для обоих вариантов впускного патрубка. Экспериментальный патрубок, как выяснилось, в этом отношении превосходит существующий, т. е. дает более равномерное распределение коэффициента избытка воздуха. Вследствие этого удалось добиться более интенсивного тепловыделения после 25° ПКВ за ВМТ благодаря повышению скорости факела (рис. 9).

Поршень и распылитель

Качество рабочего процесса в большой степени зависит от формы камеры сгорания. Однако характер этой зависимости достаточно сложен, поскольку геометрия камеры сгорания влияет как

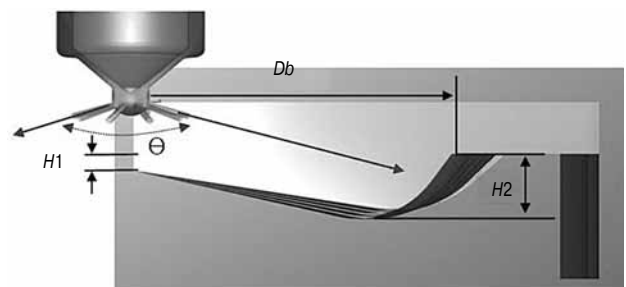


Рис. 10. Геометрические параметры, варьируемые при оптимизации камеры в поршне

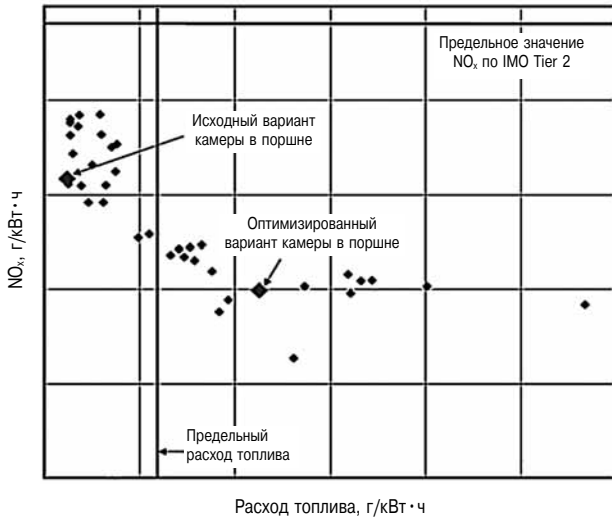


Рис. 11. Расчетная зависимость NO_x от удельного расхода топлива (SFOC) для вариантов исполнения камеры в поршне при 100% нагрузке

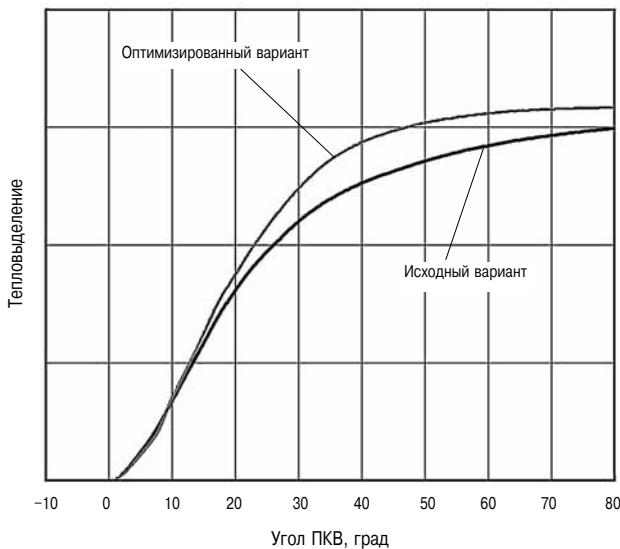


Рис. 12. Кривые тепловыделения для вариантов камеры в поршне при 100 %-ной нагрузке

на поле потока, так и на взаимодействие воздуха с топливным факелом. Как показывает анализ источников, оптимизация камеры сгорания является далеко не простой задачей, так как она должна учитывать целый ряд параметров двигателя и системы топливоподачи. В настоящей работе для оптимизации (по расходу топлива) формы камеры в поршне использованы следующие четыре параметра (рис. 10): диаметр чаши D , ее высота $H1$, глубина $H2$ и угол распыла θ .

На рис. 11 показана расчетная зависимость NO_x от удельного расхода топлива (SFOC) для двух вариантов исполнения камеры в поршне при 100 % нагрузке. Согласно расчетам, для оптимальной (по совокупности критериев) формы камеры в поршне характерны более высокое

значение выбросов NO_x и меньший расход топлива по сравнению с исходным вариантом. При этом оптимальная камера имеет несколько меньший, по сравнению с исходной, диаметр D и, соответственно, несколько большую глубину $H2$, поскольку степень сжатия меняться не должна. На рис. 12 показаны результаты расчетов тепловыделения для обоих вариантов камеры в поршне при 100 % нагрузке. После 14° ПКВ за ВМТ тепловыделение, по сравнению с исходным вариантом, возросло, поскольку скорость факела увеличилась вследствие оптимизации формы камеры сгорания.

Верификация проектных решений

В ходе создания H17V было изготовлено 3 опытных двигателя. Первым был изготовлен 12-цилиндровый двигатель — для проведения испытаний с целью оценки качества и надежности основных компонентов. После того как была выбрана форма основных движущихся частей и компонентов системы топливоподачи, проектанты приступили к определению характеристик рабочего процесса. На основании результатов данных испытаний и математического моделирования удалось улучшить характеристики рабочего процесса и повысить ресурс движущихся частей, что было подтверждено результатами 10 000-часовых испытаний. Отметим, что 12-цилиндровый двигатель создавался исключительно с целью проверки основных характеристик и ресурса. Вопросы внешних привязок и техобслуживания были оставлены пока за скобками. Одновременно для исследования возможности различного применения нового двигателя в рамках концепции Ni-touch были собраны 12-цилиндровый двигатель для стационарного применения и 20-цилиндровый двигатель для главной судовой установки. Обе машины были поставлены на 1500-часовые испытания для изучения особенностей их работы

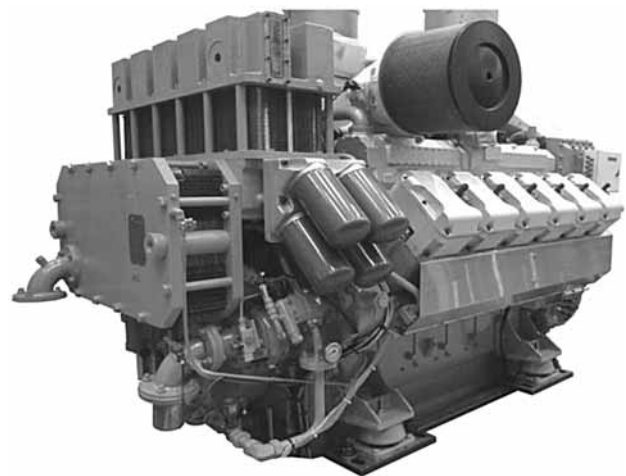


Рис. 13. Действующий макет 12H17V (только для функциональных испытаний)

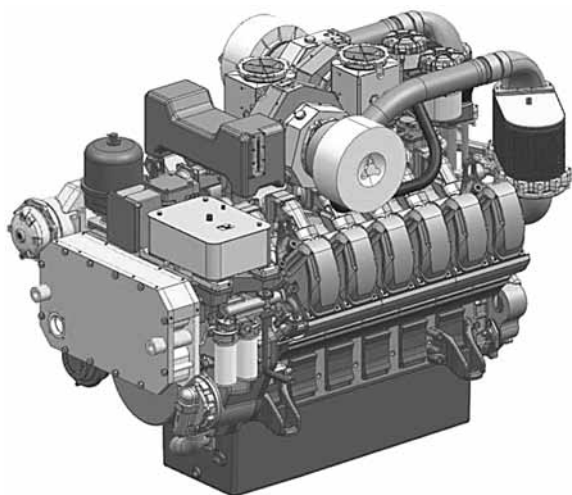


Рис. 14. Опытный двигатель 12Н17V — предсерийный вариант

в различных режимах. По результатам этих испытаний, перед началом серийного выпуска, необходимо было оценить показатели надежности двигателей, а также ресурс и регламент замены основных компонентов (за исключением несущих конструкций и движущихся частей).

На рис. 13 показан первый опытный образец 12-цилиндрового двигателя, подготовленный для функциональных испытаний. Рис. 14 иллюстрирует концепцию моделирования Hi-touch. По результатам испытаний были внесены изменения в конструкцию большинства компонентов (не

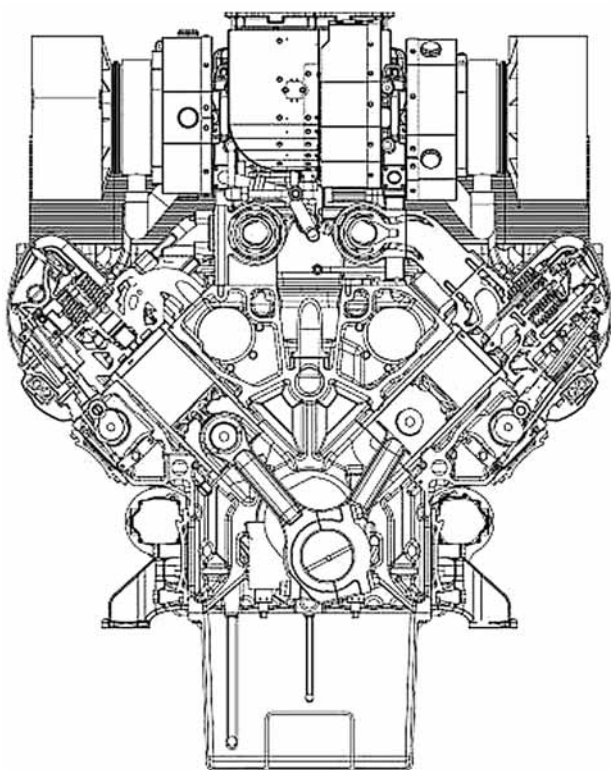


Рис. 15. Двигатель 12Н17V в разрезе

считая структурных элементов, движущихся частей и деталей камеры сгорания).

На рис. 15 представлен поперечный разрез двигателя Н17V. Как и в среднеоборотных V-образных двигателях HiMSEN, всасывающий и выпускной коллекторы расположены в развале блока, а распределительные валы — по обеим его сторонам. Для минимизации количества и протяженности трубопроводов водяные и масляные каналы расположены в теле блока.

Блок цилиндров, коленвал и шатун

Основные структурные элементы и движущиеся части — блок цилиндров, головка блока, шатун и цилиндрическая втулка — в процессе доводки подверглись многочисленным изменениям, целью которых было увеличение коэффициентов запаса усталостной прочности, применяемых в 3D-расчетах методом КЭ. 1500-часовые испытания включали различные испытательные циклы, в том числе на многоцикловую и малоцикловую усталость. 12-цилиндровый действующий макет прошел (в общей сложности) 10 000-часовые испытания.

Блок цилиндров выполнен из чугуна с шаровидным графитом. При его проектировании ставилась задача минимизировать толщину стенок для снижения веса двигателя, сохраняя при этом необходимую прочность конструкции. Конфигурация каналов для охлаждающей жидкости и смазочного масла выбиралась из условия сохранения максимальной прочности корпуса.

Коленвал изготовлен из стального Ni-Cr-Mo сплава, обладающего высоким сопротивлением на разрыв. Расчет крутильных колебаний подтвердил наличие необходимого запаса усталостной прочности, который обеспечивается за счет оптимизации диаметров главного и шатунного подшипников, а также геометрии и чистоты обработки галтелей. Конструкция обеспечивает

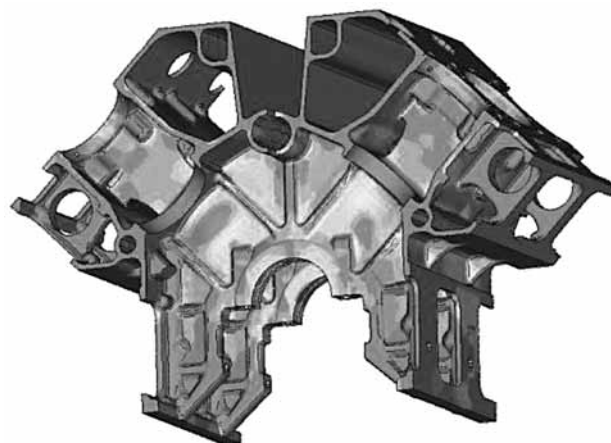


Рис. 16. Блок цилиндров

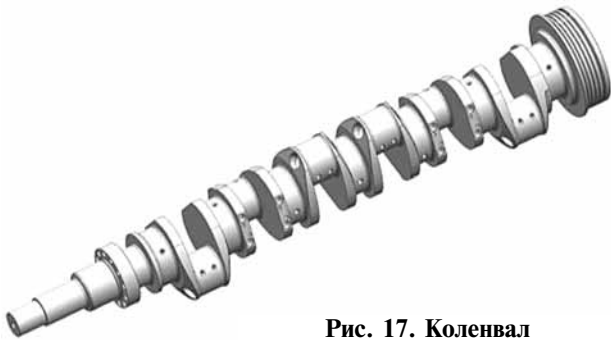


Рис. 17. Коленвал

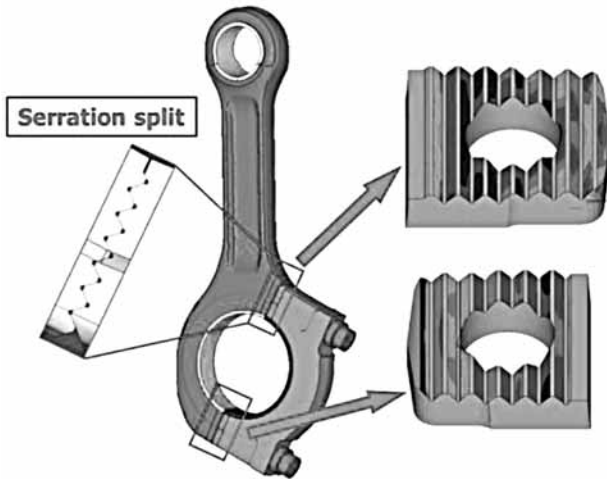


Рис. 18. Шатун

возможность организации дополнительного отбора мощности от свободного конца коленвала.

Кованые шатуны выполнены из легированной стали. Для облегчения техобслуживания двигателя в нем применены шатуны с косым разъемом.

Прочность шлицевого замка подтверждена расчетом усталостной прочности с использованием полноциклового нелинейного анализа и расчетом вероятности фреттинг-износа. Для обеспечения достаточных запасов по усталостной прочности конструкции и фреттинг-износу была проведена работа по оптимизации параметров шатуна, в том числе его формы, размеров и числа шлицев разъема.

Головка блока, втулка цилиндра и поршень

Поскольку компоненты камеры сгорания при работе подвергаются мощному тепловому воздействию, проектирование головки блока и втулки цилиндра опиралось на результаты расчетов структурной прочности и потоков тепла. Результаты указанных расчетов проверялись измерением температуры в критических точках, проводимых в ходе испытаний. Для оценки надежности и срока службы компонентов проводились также малоцикловые испытания.

Результаты измерения и характера изменения температуры втулки цилиндра и днища поршня показаны на рис. 19.

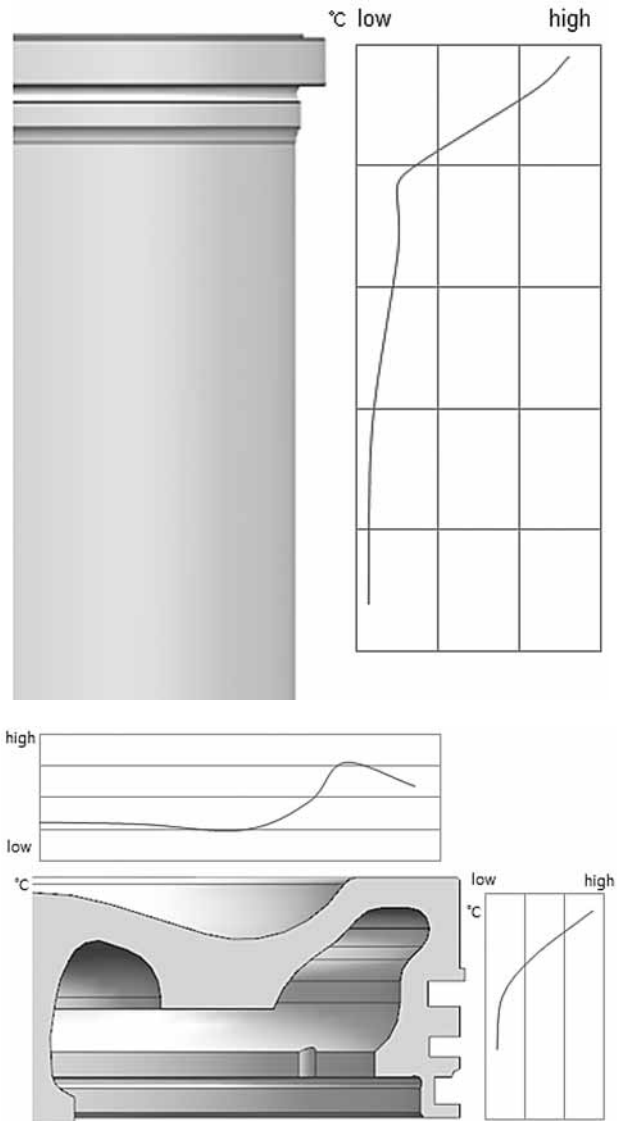


Рис. 19. Результаты измерения температуры втулки цилиндра и днища поршня (нагрузка 100 % при 1800 об/мин)

Выводы

Создававшийся на протяжении более десяти лет модельный ряд среднеоборотных двигателей Hyundai HiMSEN получил, наконец, завершение, и теперь перекрывает диапазон мощности от 575 кВт (5H17/21) до 26 000 кВт (20H46/60V). Опираясь на свой опыт и передовые технологии, фирма Hyundai к 2011 г. сумела создать первый двигатель полностью собственной конструкции HiMSEN H17/21V.

При создании двигателя H17V/21V использована проектная концепция среднеоборотных двигателей HiMSEN, ориентированная на создание *практического* двигателя, базирующегося на идеях Hi-touch и Hi-tech. В результате удалось одновременно повысить надежность, технологичность и ремонтпригодность конструкции за счет более удобного доступа к двигателю

и минимизации числа его компонентов. Достижение проектных показателей, сформулированных в техническом задании, подтверждено интенсивными испытаниями действующего

макета и опытного образца. В ближайшем будущем на базе дизеля H17V планируется начать разработку газового двигателя и двигателя, оборудованного системой common-rail.

Литература

1. Kim J.T. et al. Development of a New Medium Speed Diesel Engine — Hyundai H21/32. Vol. 1. Page № 47, CIMAC 2001, Hamburg.
2. Kim J.T. et al. Expansion of Hyundai's Medium Speed Diesel Engine Family — HiMSEN, Page № 49, CIMAC 2004, Kyoto.
3. Kim J.S. et al. Development of HiMSEN H32/40

Medium Speed Diesel Engine, Page № 164, CIMAC 2007, Vienna.

4. Park J.K. et al. Continuous Development of Hyundai HiMSEN Family. Page № 222, CIMAC 2010 Bergen.

5. Yoon W.H. et al. A Study on Optimal Design of Combustion System of High-speed Diesel Engine for Power Generation. Proceedings of the KSME Fall Annual Meeting, 2012. — P. 1118–1122.

Вниманию авторов

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

Тематика публикаций определила следующие основные разделы журнала:

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

Представляя рукопись статьи в редакцию, автор должен сообщить обо всех представлениях этой работы в печать или о ее предыдущих публикациях, которые могут рассматриваться как множественные и дублирующие публикации данной работы.

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

Для оперативного решения вопросов, связанных с подготовкой рукописи к публикации, и для размещения необходимой информации при публикации и в НЭБ, должны быть представлены сведения об авторах

фамилия, имя отчество всех авторов полностью (на русском и английском языке);

должность, ученая степень, ученое звание;

полное название организации — места работы каждого автора в именительном падеже, страна, город, (на русском и английском языке);

полный почтовый адрес места работы;

корреспондентский почтовый адрес, телефон и e-mail для контактов с авторами статьи.

Редакция планирует знакомить читателей с авторами статей, поэтому желательно присылать фотографии авторов цветные или черно-белые размером не менее чем 3x4 см. Допускаются электронные копии в форматах TIF, или JPG.

Оформление рукописи

Объем статьи не должен превышать 23 тысяч знаков, включая таблицы, формулы и список литературы.

Текст рукописи должен быть представлен в двух экземплярах на бумаге формата A4, гарнитура Times New Roman 12, через полтора интервала, с обязательным приложением электронной версии на CD (в формате Microsoft Word 2000/2003), полностью соответствующей оригиналу на бумаге.

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

Обязательным приложением к рукописи должны быть ключевые слова и реферат, в котором четко и сжато изложены основные цели и результаты работы.

Объем реферата — от 700 до 1200 знаков.

Обязательно указывать код УДК.

Заглавие статьи, ключевые слова а также реферат необходимо присылать на русском и английском языках.

Иллюстрационные материалы в виде графиков, диаграмм, схем и фотографий оформляются в виде приложений к тексту рукописи.

Все приложения к тексту рукописи представляются на отдельных листах, а в электронной копии — в виде отдельных файлов. Они должны быть пронумерованы в порядке упоминания, и снабжены поясняющими (подрисуночными) подписями.

Все обозначения на иллюстрациях должны быть объяснены (расшифрованы) в тексте или в подрисуночных подписях и соответствовать обозначениям в тексте.

Электронные копии иллюстраций представляются отдельными файлами в форматах TIF, JPG (не менее 300 dpi черно-белые полутоновые изображения).

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

Математические формулы допустимо приводить в статьях только те, которые необходимы для понимания существа вопроса, исключая подробное изложение методов и путей получения формул в конечном виде.

Все обозначения, встречающиеся в формулах, должны быть объяснены. При написании формул необходимо использовать общепринятые обозначения физических величин по Международной системе единиц (ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин).

Формулы в электронной версии должны быть набраны с использованием редактора формул Microsoft Equation 3.0. (одна формула должна быть набрана одним блоком и вставлена отдельной строкой); внутри текстовой строки использования редактора формул, а также вставка любых элементов текста в виде картинок не допускается.

За достоверность набора формул несет ответственность автор.

Ссылки на цитируемые источники необходимо оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008.

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

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

Рукописи, направленные в редакцию, авторам не возвращаются

Редакция журнала

УДК 621.43

Стратегия развития поршневого двигателестроения России на период до 2020 года (продолжение) // Двигателестроение. — 2016. — № 2. — С. 3–18.

Ключевые слова: поршневые ДВС, анализ состояния двигателестроения России, импортозамещение, стратегия развития двигателестроения, развитие специализированных производств компонентов.

Выполнен анализ текущего состояния и перспектив развития поршневого двигателестроения в Российской Федерации. Показано, что двигателестроение России постепенно утрачивает передовые технологии, компетенции и рынки сбыта в конкурентной борьбе с зарубежными фирмами. Определены основные направления развития конструкции отечественных поршневых двигателей в целях повышения их конкурентоспособности. Табл. 7. Ил. 9.

УДК 621.822.1;621.436.12

Гаврилов К.В., Дойкин А.А., Лазарев В.Е., Асауляк А.А. Экспериментальная оценка параметров трения и изнашивания трибосопряжения поршень–цилиндр форсированного дизеля // Двигателестроение. — 2016. — № 2. — С. 19–23.

Ключевые слова: поршневые ДВС, трибосопряжение поршень–цилиндр, режимы трения, циклы нагружения, интенсивность изнашивания пар трения.

Приводятся результаты экспериментальных исследований пары трения поршень–цилиндр, изготовленной из различных материалов, на трибометре SRV, реализующем возвратно-поступательное движение контртел. Выполнено исследование условий появления смешанного и граничного режимов трения применительно к конструкции форсированного дизеля типа ЧН13/15. Получена зависимость интенсивности изнашивания пар трения от контактного давления для оценки ресурса трибосопряжения.

Табл. 1. Ил. 11. Библ. 11.

УДК 662.767.769

Пишулин М.В. Технологии гомогенизации топливо-воздушной смеси в поршневых ДВС // Двигателестроение. — 2016. — № 2. — С. 24–27.

Ключевые слова: двигатель с искровым зажиганием, технологии объемного сгорания HCCI и GDCI, условия самовоспламенения топлива, управление воспламенением, гомогенизация топливо-воздушной смеси.

Рассмотрены технологии гомогенизации топливо-воздушной смеси и управления режимом объемного сгорания, в цилиндре поршневого ДВС. Выполнен анализ преимуществ и недостатков управления воспламенением смеси в процессах объемного сгорания HCCI и GDCI. Библ. 5.

УДК 621.431.629

Алиев А.Я., Айдемиров О.М., Алиев С.А. Электроприводной насос системы охлаждения поршневого двигателя с индукторным электродвигателем // Двигателестроение. — 2016. — № 2. — С. 28–29.

Ключевые слова: система охлаждения, жидкостный насос, электрический привод, индукторный электродвигатель.

Рассмотрены основные недостатки систем охлаждения поршневых ДВС, с приводом насоса от коленчатого вала. Показаны преимущества системы охлаждения с приводом насоса от индукторного электродвигателя, обеспечивающей оптимальный тепловой режим работы двигателя.

Ил. 2. Библ. 4.

УДК 621.436

Крюков О.В. Автоматизированное нагружающее устройство для комплексных испытаний поршневых двигателей // Двигателестроение. — 2016. — № 2. — С. 30–35.

Ключевые слова: поршневые ДВС, стендовые испытания, нагружающие устройства, автоматизированный испытательный стенд, нагрузочная диаграмма обкатки, программа испытаний.

Рассмотрены проблемы проектирования автоматизированных нагружающих устройств для стендовых испытаний поршневых двигателей. Выполнена оценка энергоэффективности различных нагружающих устройств. Приведены структуры промышленных испытательных систем тепловых двигателей и программы их стендовых испытаний.

Ил. 4. Библ. 11.

УДК 621.432

Рыбаков М.Г. Диагностирование состояния поршневого уплотнения ДВС методом индицирования цилиндров // Двигателестроение. — 2016. — № 2. — С. 36–40.

Ключевые слова: диагностирование поршневого уплотнения, износ поршневых колец, износ втулок цилиндров, расходная характеристика утечек через уплотнения, индикаторная диаграмма.

Разработан метод определения утечек в поршневом уплотнении судового ДВС, основанный на анализе индикаторной диаграммы цилиндра с выключенной подачей топлива. Определены расходные характеристики утечек газов через уплотнения в цилиндрах судовых дизелей. Предложен способ диагностирования изменения состояния уплотнения в условиях эксплуатации, отличающийся высокой чувствительностью.

Табл. 3. Ил. 3. Библ. 3.

УДК 621.43

Развитие модельного ряда двигателей концерна «Hyundai Heavy Industries» (материалы конгресса CIMAC 2013) // Двигателестроение. — 2016. — № 2. — С. 41–54.

Ключевые слова: концерн ННІ, концепция развития модельного ряда двигателей, высокооборотные дизели H17/28, среднеоборотные дизели M46/60, особенности конструкции, характеристики.

Корейским многопрофильным концерном «Hyundai Heavy Industries» (ННІ) ведется работа над созданием новых моделей высокооборотных (H17/28) и среднеоборотных (H46/60V) двигателей. Представлены проектные концепции развития модельного ряда, в том числе блочный принцип построения, оптимизация характеристик расхода топлива и вредных выбросов, снижение эксплуатационных расходов, повышение ресурса, а также максимального упрощения обслуживания двигателей.

Перевод докладов выполнен к.т.н. Г. Мельником
Табл. 2. Ил. 35. Библ. 6.

UDK 621.43

Road Map for the Development of Reciprocating Engines in Russia up to Year 2020 (continued) // Dvigatelistroyeniye. — 2016. — № 2. — P. 3–18.

Keywords: reciprocating engine, engine building trends in Russia, import replacement, engine building strategies, development of dedicated industrial facilities for engine component production.

The analysis is carried out of today engine building trends in Russia and future perspectives of the branch. Domestic engine building is shown as gradually losing modern technologies, competences and competitiveness. The paper offers a roadmap for improvement in Russian make reciprocating engines targeted at their higher competitiveness. 7 tables, 9 ill..

UDK 621.822.1;621.436.12

Gavrilov K.V., Doykin A.A., Lazarev V.E., Asulyak A.A. Piston-cylinder Tribounit in High-Powered Diesel Engine: Experimental Evaluation of Friction & Wear Parameters

// Dvigatelistroyeniye. — 2016. — № 2. — P. 19–23.

Keywords: reciprocating engine, piston-cylinder tribounit, friction modes, test cycles, friction unit wear intensity.

Tribometer type SRV (based on reciprocating movement of reference gauges) was used to test piston-cylinder tribounit made of various materials. Conditions for boundary and mixed friction modes have been studied as applied to high-powered engine type CHN ЧН13/15. The tests yielded «wear intensity vs. contact pressure» curve, which largely defines tribounit service life.

1 table, 11 ill., 11 ref.

UDK 662.767.769

Pistchoolin M.V. Ways of Homogenization of Fuel/Air Mixture in Reciprocating Engine // Dvigatelistroyeniye. — 2016. — № 2. — P. 24–27.

Keywords: spark ignition engine, volumetric combustion technologies HCCI & GDCI, fuel autoignition conditions, ignition control, homogenization of fuel/air mixture.

Discussed are the technologies of fuel/air mixture homogenization and volumetric combustion control in engine cylinder. Ignition control technologies HCCI & GDCI are compared in terms of their respective strengths and weaknesses.

5 ref.

UDK 621.431.629

Aliev A.Ya., Aydemirov O.M., Aliev S.A. SRM-Driven Electrical Pump for Cooling System of a Reciprocating Engine // Dvigatelistroyeniye. — 2016. — № 2. — P. 28–29.

Keywords: cooling system, cooling pump, electric drive, switched reluctance motor, SRM.

Cooling systems featuring engine-driven pumps are shown as having a number of drawbacks. Advantages of SRM-driven pumps are demonstrated. Specifically, such pumps are able to secure optimum engine thermal conditions. 2 ill., 4 ref.

UDK 621.436

Kryukov O.V. Automated Dynamometer for Reciprocating Engine Test Bed // Dvigatelistroyeniye. — 2016. — № 2. — P. 30–35.

Keywords: reciprocating engine, benchmark test, dynamometer, test bed, test cycle, test schedule.

The article discusses design issues of automated dynamometers for engine test beds. Various dynamometers are compared in terms of power efficiency. Typical test system structures and engine test schedules are presented.

4 ill., 11 ref.

UDK 621.432

Rybakov M.G. Indicator Diagram as a Means of Evaluation of Piston Rings' Tightness // Dvigatelistroyeniye. — 2016. — № 2. — P. 36–40.

Keywords: piston ring diagnostics, piston ring wear, cylinder liner wear, seal throttling characteristic, indicator diagram.

The technology in question allows evaluation of a leak through the gap between piston rings and cylinder liner walls based on the analysis of indicator diagram with no fuel injected. Seal throttling characteristic are plotted for the gap between piston rings and cylinder liner walls of marine diesel engine. The technology enables accurate in-situ evaluation of piston-cylinder gap tightness.

3 tables, 3 ill., 3 ref.

UDK 621.43

Development of Hyundai Heavy Industries Engine Line-Up (Papers of CIMAC-2013) // Dvigatelistroyeniye. — 2016. — № 2. — P. 41–54.

Keywords: HHI, engine line-up concept, high-speed engines H17/28, medium-speed engines M46/60, design features, engine data.

One of the world's largest engine makers, Hyundai Heavy Industries (HHI) has been developing new high-speed (H17/28) and medium-speed (H46/60V) engine families. The below papers present design concepts of HiMSEN engine families, such as modular approach, optimization with respect to fuel consumption, emissions, operating costs, service life, and easy maintenance.

The CIMAC papers are translated into Russian by G.Melnik, PhD.

2 tables, 35 ill., 6 ref.