ИЗДАЕТСЯ
С ЯНВАРЯ
1979 г.

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ
ЖУРНАЛ

ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЕ

№ 3 (265)
июль–сентябрь 2016

Санкт-Петербург

ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЕ В РОССИИ		**ENGINE BUILDING IN RUSSIA**
Стратегия развития поршневого двигателестроения России на период до 2020 года (*продолжение*)	**3**	**Road Map for the Development of Reciprocating Engines in Russia up to Year 2020** (*continued*)
РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ		**ANALYSES, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF ENGINES**
Гаврилов В.В. **Принципы организации и показатели качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле**	**16**	*Gavrilov V.V.* **Air-Fuel Mixing in Marine Diesel Engine: Concept and Quality Metrics**
ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ		**ENVIRONMENTAL ISSUES**
Новиков Л.А., Корчинский В.С. **Оценка дополнительных затрат судовладельцев при использовании SCR-технологии на судах**	**23**	*Novikov L.A. and Korchinsky V.S.* **Evaluation of Shipowner's Additional Expences Involved in SCR Technology Implementation**
НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ		**ENGINE BUILDING NEWS**
Развитие модельного ряда двигателей ПАО «Звезда» и ООО «УДМЗ» (материалы конгресса CIMAC 2016)	**32**	**Development of New ZVEZDA and UDMZ Engine Families (based on CIMAC 2016 papers)**
ИНФОРМАЦИЯ		**INFORMATION**
Рефераты статей	**56**	**Synopsis**

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

ПРЕДПРИЯТИЯ

В.А. Шелеметьев	*техн. директор*	*ОАО «Коломенский завод», г. Коломна*
В.А. Рыжов	*гл. конструктор*	*ОАО «Коломенский завод», г. Коломна*
Е.С. Васюков	*техн. директор*	*ЗАО УК БМЗ, г. Брянск*
А.К. Лимонов	*гл. конструктор*	*ОАО РУМО, Н. Новгород*
Е.И. Бирюков	*гл. конструктор*	*ОАО «Барнаултрансмаш», г. Барнаул*
В.М. Гребнев	*техн. директор*	*ОАО «Волжский дизель им. Маминых», г. Балаково*
Р.Х. Хафизов	*зам. гл. констр. по двиг.*	*ОАО КамАЗ, г. Набережные Челны*
А.А. Матюшин	*генеральный директор*	*ОАО ЗМЗ, г. Заволжье*
В.И. Федышин	*директор*	*ООО МПЦ «Марине»*
В.В. Коновалов	*1-й зам. ген.директора*	*ПАО «Звезда», Санкт-Петербург*
А.П. Маслов	*вед. инж.-конструктор*	*ООО ГСКБ «Трансдизель», г. Челябинск*
А.С. Калюнов	*начальник ИКЦ*	*ООО НЗТА, г. Ногинск*

НИИ

В.С. Папонов	*ген. директор*	*ОАО НИКТИД, г. Владимир*
Д.П. Ильющенко-Крылов	*гл. инженер*	*ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург*
В.А. Сорокин	*зав. отделом*	*ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург*
В.И. Ерофеев	*нач. отдела*	*I ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург*
В.В. Альт	*директор*	*ГНУ СибФТИ, г. Новосибирск*
Ю.А. Микутенок	*президент*	*ООО НПХЦ «Миакрон-Нортон»*
Б.А. Зеленов	*директор*	*НТЦ ПМТ ФГУП ЦНИИМ, Санкт-Петербург*
А.М. Махмудов	*с.н.с.*	*ФГУП «Крыловский ГНЦ», Санкт-Петербург*

ВУЗЫ

Ю.В. Галышев	*зав. кафедрой ДВС*	*СПбГПУ, Санкт-Петербург*
Н.Д. Чайнов	*проф. кафедры Э-2*	*МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва*
О.К. Безюков	*проф. кафедры ТК СДВС*	*ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург*
А.А. Иванченко	*зав. кафедрой СЭУ*	*ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург*
Л.В. Тузов	*проф. кафедры ТК СДВС*	*ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург*
А.С. Пунда	*проф. кафедры ДВС*	*ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург*
В.К. Румб	*проф. кафедры ДВС и АСЭУ*	*ГМТУ, Санкт-Петербург*
А.В. Смирнов	*нач. кафедры Д иТУ*	*ВИ(ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург*
В.О. Сайданов	*проф. кафедры Д иТУ*	*ВИ(ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург*
А.А. Обозов	*профессор кафедры ТД*	*ФГБОУ ВПО БГТУ, г. Брянск*
А.В. Разуваев	*профессор кафедры ТАМ*	*БИТТУ фил. ГОУ ВПО СГТУ г. Балаково*

Издатель журнала — ООО «ЦНИДИ-Экосервис», Санкт-Петербург.
Журнал издается при поддержке Военного института (инженерно-технического) — ВИ(ИТ) Военной академии материально-технического обеспечения (ВА МТО), Санкт-Петербург.

Электронные версии журнала (2005–2016 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» (www.elibrary.ru) и включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Выпускающий редактор Н.А. Вольская
Редактор инф. отдела Г.В. Мельник
Ст. редактор О.Д. Камнева
Верстка — А.В. Вольский

Сдано в набор 03.09.2016
Подписано в печать 26.09.16
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7
Зак. 133. Тираж 700 экз.
Цена договорная

Почтовый адрес редакции журнала:
ООО «ЦНИДИ-Экосервис», 191123, Санкт-Петербург, а/я 65

Тел.: +7 (921) 956-31-94
+7 (812) 719-73-30

E-mail: ecology@rdiesel.ru
www.rdiesel.ru

ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЕ

Типография «Светлица»
Лиц. ПД № 2-69-618, 196158,
Санкт-Петербург, Московское шоссе, 25, 215

© Журнал «Двигателестроение». 2016. № 3 (265)

УДК 621.43

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ РОССИИ НА ПЕРИОД ДО 2020 ГОДА

(*Продолжение. Начало см. № 1–2, 2016*)

2. Развитие компонентной базы

2.1. Текущая рыночная ситуация среди производителей компонентов

Анализ рынка поршневых двигателей по отраслям, проблем и причин их возникновения показал приоритетные направления реализации стратегии по развитию производства компонентов.

Производство современных конкурентоспособных поршневых двигателей во всех отраслях сдерживается из-за отсутствия отечественной компонентной базы по направлениям:

- ➢ производство отливок и черновая обработка блоков, крышек и втулок цилиндров;
- ➢ производство топливной аппаратуры;
- ➢ производство агрегатов наддува;
- ➢ производство элементов ЦПГ и КШМ;
- ➢ производство коленчатых валов, шатунов и шестерен;
- ➢ производство систем комплексной нейтрализации выбросов вредных веществ;
- ➢ производство современных метизов;
- ➢ производство газового оборудования, компонентов систем зажигания и питания газовым топливом;
- ➢ производство компонентов системы управления двигателем.

Сложившая обстановка в отрасли может быть охарактеризована как достаточно сложная, в связи с чем и возникла необходимость разработки комплекса мер по изменению вектора развития и улучшению ситуации.

Разработчики и производители компонентов не имеют возможности на компенсацию своих затрат, как на разработку, так и на подготовку производства. Одним из факторов, который не позволяет реализовать в полной мере необходимые мероприятия, — это отсутствие действенного контроля за заказчиками.

Ситуация среди самих поставщиков тоже достаточно неоднозначная. Во-первых — их достаточно много по отношению к количеству потребителей, во-вторых — они узконаправлены в своих отношениях с заказчиком, в-третьих — они не обладают полным циклом, в большинстве случаев у них отсутствуют службы, которые могут заниматься разработкой перспективных продуктов. Учитывая эти основные факторы, можно сделать заключение, что эти компании функционируют на грани выживания. Анализ ситуации определяет проблемы, которые сегодня стоят перед отраслью.

1. Отсутствие до настоящего времени перспективных программ и целевого финансирования по развитию рынка поставщиков компонентов в России со стороны правительства.

2. Отсутствие стимулов для использования комплектующих отечественного производства в существующих программах развития производителей конечного продукта, что соответственно делает бесперспективным развитие компонентной базы.

3. Проведение политики неравноправного участия в проектах со стороны интернациональных автопроизводителей, которые запустили свое производство на территории России.

4. Отсутствие долгосрочной кооперации, прежде всего из-за отсутствия понимания объемов спроса на конечный продукт, как в процессе разработки продукта, так и в процессе его коммерциализации, что не позволяет поставщикам компонентов проводить модернизацию производства в целях повышения качества продукции.

5. Погоня за сиюминутной прибылью со стороны заказчика.

6. Разработка новых продуктов проводится в крайне сжатые сроки, без должного финансирования, без гарантий на покрытие расходов по разработке, что приводит к низкому качеству продукта, иногда к отсутствию необходимых потребительских свойств.

7. Ценовой диктат (демпинг) со стороны заказчика и неисполнение финансовых обязательств ставит отрасль производства компонентов на грань выживания и делает ее полностью неконкурентоспособной по сравнению с иностранными производителями аналогичной продукции.

8. Частичное или полное отсутствие контроля со стороны государства или надзорных органов за выполнением технических норм и регламентов при производстве двигателей и компонентов.

9. Высокая степень распыления капитала, низкая рентабельность и прибыльность предприятий, обусловленная перечисленными выше факторами.

Все вышеперечисленное описывает общее состояние отрасли как весьма негативное. Если не принимать каких-либо мер по изменению

ситуации, то будущее выглядит еще более плачевным, вплоть до полной потери компонентной подотрасли.

2.2. Развитие литейного производства компонентов поршневых двигателей

Литые детали являются базовыми, силовыми высоконагруженными деталями, образующими основу поршневых двигателей и их наиболее ответственные компоненты и узлы. Качество литых заготовок (их эксплуатационные свойства, точность, тонкостенность) является основным фактором, определяющим эффективные показатели двигателя, его ресурс и надежность.

Возможность получать отливки из различных сплавов, различной конфигурации, максимально приближенные по форме к готовым деталям, в широком диапазоне размеров и масс, с разнообразными эксплуатационными свойствами — все это гарантирует сохранение доминирующей роли литых заготовок в двигателестроении. Это гарантирует высокий и стабильный спрос на отливки при сохранении прочных рыночных позиций литейных производств (при условии производства высококачественных отливок по конкурентным ценам).

2.2.1. Проблемы отрасли литых компонентов

Доля литых компонентов в поршневом двигателе доходит до 70 % по массе и до 25 % стоимости двигателя. При этом за последние 30 лет наблюдается серьезное падение производства отливок в России. Резкий спад связан с нарушением кооперационных связей, которые были заложены в едином отраслевом комплексе СССР, неэффективной приватизацией и ликвидацией предприятий.

Основные литейные производства РФ оснащены в большинстве случаев устаревшим технологическим оборудованием середины прошлого века. Эти предприятия выпускают грубые, толстостенные, металлоемкие отливки с низкими эксплуатационными свойствами, не соответствующими ни современным, ни тем более перспективным требованиям поршневого двигателестроения, что сдерживает его развитие. Доля современного оборудования в отечественных литейных цехах составляет около 6 %.

Как следствие, большая часть отечественных заводов-производителей поршневых двигателей сталкивается с проблемой изготовления качественных отливок блоков и головок цилиндров. Проблема низкого качества литья обусловлена отсутствием либо значительной изношенностью технологического оборудования производственных цехов и инфраструктуры. Зачастую для удовлетворения собственных потребностей предприятия закупают отливки за рубежом, что в конечном итоге увеличивает стоимость конечного продукта и вызывает серьезную зависимость от зарубежного производителя.

Также требует решения проблема низкой эффективности производства. В 2010 г. Международной финансовой корпорацией IFC выполнено исследование, по результатам которого был сделан вывод о том, что затраты на производство у российских литейных компаний значительно ниже, чем в Европе: стоимость энергоресурсов на 54 %, стоимость рабочей силы на 92 %, накладные расходы на 71 %.

Однако эти преимущества нивелируются неэффективным управлением ресурсами. В результате себестоимость литья в РФ по сравнению с литейным производством Германии ниже всего на 4 %. По оценке исследования IFC при использовании современных технологий производства литья издержки предприятий могут снизиться примерно на 36 % по сравнению с аналогичным предприятием в Германии.

Российской литейной отрасли сложно конкурировать на внешнем рынке из-за соотношения цена–качество: цена приближается к уровню европейских производителей, а качество, зачастую, не соответствует стандартам ЕС.

2.2.2. Основные направления решения проблемы

1. Активное внедрение инноваций и современных технологий литья.

2. Повышение конкурентоспособности продукции и производительности труда.

3. Повышение качества управления ресурсами литейного производства.

4. Возрождение производства дефицитных отливок сложной конфигурации и высокой размерной точности.

5. Обеспечение предприятий высококвалифицированными кадрами за счет обучения и переподготовки специалистов, а также за счет привлечения специалистов из-за рубежа.

6. Внедрение ресурсо-энергосберегающих технологий с учетом одобренных Правительством Российской Федерации предельных уровней цен (тарифов) на продукцию (услуги) субъектов естественных монополий.

7. Удовлетворение требований потребителей отливок: ОАО «КамАЗ», ОАО «Группа ГАЗ», ОАО ТМЗ, ОАО «ЧТЗ-Уралтак», ОАО «Коломенский завод», ОАО «Пензадизельмаш», ОАО УДМЗ и др.

8. Улучшение экологических характеристик действующих производств.

9. Привлечение к деятельности существующих производственных структур центров субконтрактинга и аутсорсинга в целях стабильности загрузки производственных мощностей литейных предприятий России, привлечения иностранных партнеров и инвестиций, поставщиков оборудования и т. д.

Таблица 2.1

Потребность заводов в отливках головок блоков цилиндров и крышек цилиндров

Предполагаемые потребители	Предполагаемый объем сбыта	
	при полном импортозамещении, ед.	для перспективных двигателей, ед.
ОАО РУМО	680	
ОАО «Пензадизельмаш»	800	6000
ОАО «Коломенский завод»	8320	
ООО УДМЗ	400	3022
ОАО «Волжский дизель им. Маминых»	250	2200
ОАО «Алтайский моторный завод»	719	
ОАО «Звезда»	1000	21 600
ОАО «Тутаевский моторный завод»	8416	35 000
ООО «Уральский моторный завод»	800	
ОАО «Барнаултрансмаш»	776	
ОАО «ЧТЗ-Уралтрак»	1078	60 000
ОАО «Автодизель»	123 000	60 000
ООО ВМТЗ	150	
ОАО «КамАЗ»	300 000	70 000
ОАО АК «Туламашзавод»	1183	
ОАО «Заволжский моторный завод»	65 976	
ОАО «Ульяновский моторный завод»	43 343	
ОАО «Завод Дагдизель»	44	

Таблица 2.2

Потребность заводов в отливках блоков цилиндров

Предполагаемые потребители	Предполагаемый объем сбыта	
	при полном импортозамещении, ед.	для перспективных двигателей, ед.
ОАО РУМО	100	
ОАО «Пензадизельмаш»	120	1000
ОАО «Коломенский завод»	520	
ООО УДМЗ	46	315
ОАО «Волжский дизель им. Маминых»	85	180
ОАО «Алтайский моторный завод»	719	
ОАО «Звезда»	50	1800
ОАО «Тутаевский моторный завод»	1052	3500
ООО «Уральский моторный завод»	100	
ОАО «Барнаултрансмаш»	465	
ОАО «ЧТЗ-Уралтрак»	1 539	5000
ОАО «Автодизель»	41 052	60 000
ООО ВМТЗ	150	
ОАО «КамАЗ»	38 613	70 000
ОАО АК «Туламашзавод»	1187	
ОАО «Заволжский моторный завод»	65 976	
ОАО «Ульяновский моторный завод»	43 343	
ОАО «Завод Дагдизель»	44	

10. Создание современного литейного производства компонентов двигателей путем приобретения (с государственной поддержкой) передовых технологий и технологического оборудования, создания совместных предприятий на территории РФ с использованием имеющегося научно-технического задела.

2.2.3. Приоритетные задачи реализации стратегии развития литейного производства компонентов поршневых двигателей

Стратегия предусматривает решение следующих приоритетных задач:

1. Удовлетворение спроса на литые компоненты на внутреннем рынке, в том числе спроса на компоненты для новых перспективных двигателей.

2. Организация производства на территории РФ отливок сложной конфигурации и высокой размерной точности для нужд отрасли поршневого двигателестроения.

3. Снижение зависимости отрасли поршневого двигателестроения от импорта литья.

4. Повышение конкурентоспособности российской отрасли литых компонентов.

5. Снижение вредного воздействия литейных предприятий отрасли на окружающую среду.

2.2.4. Потребности отрасли поршневого двигателестроения в литых компонентах

Суммарный объем выпускаемых в России поршневых двигателей составляет около 295 000 штук в год. При этом объем импорта отливок для нужд отрасли поршневого двигателестроения достигает порядка 70 % в массовом эквиваленте.

К критичным отливкам, определяющим эксплуатационные характеристики двигателя, относятся: блок и крышка цилиндров (головка блока цилиндров). Масса этих отливок варьируется от 50 до 10 000 кг.

Потребности отечественных производителей поршневых двигателей представлены в табл. 2.1 и 2.2

На основании данных, приведенных в таблицах, а также исходя из технологических особенностей, серийности и материала целесообразно разделить отливки на группы (рис. 2.1).

2.2.5. Необходимые инвестиционные проекты и комплекс мероприятий

При реализации комплекса мер по локализации литых компонентов отрасли поршневого двигателестроения на территории РФ необходимо максимально эффективно использовать существующие ресурсы и максимально эффективно



Рис. 2.1. Группы отливок

внедрять новые технологии при организации новых производств.

Группа № 1. Отливки из черных сплавов для крупносерийного и среднесерийного производства высокооборотных двигателей.

Потребители литья: ОАО «КамАЗ», ОАО «Автодизель», ОАО «Тутаевский моторный завод», ООО «ЧТЗ-Уралтрак».

Развитие производства чугунных блоков и головок блоков цилиндров двигателей для российской автомобильной промышленности нацелено на импортозамещение этой продукции и на снижение ее себестоимости. Более низкая себестоимость изделий блоков и головок блоков цилиндров по сравнению с импортными аналогами может быть достигнута за счет более низких производственных затрат и при соблюдении современных стандартов литейного производства.

Для обеспечения потребностей крупных потребителей литья необходимо максимально эффективно задействовать существующие производственные мощности литейных заводов ПАО «КамАЗ», Концерна «Тракторные заводы», ПАО «Тутаевский моторный завод» и др.

Необходимо провести оптимизацию и, при необходимости, модернизацию имеющегося литейного производства на заводе ПАО «КамАЗ», проектная мощность которого составляет 238 000 т литья в год. Модернизировать литейное производство для корпусных деталей рядных и V-образных двигателей рабочим объемом 7–12 л на ПАО «КамАЗ».

Для полного отказа от импорта отливок блоков и крышек (головок) цилиндров предприятиями ОАО «Автодизель», ПАО «Тутаевский моторный завод» необходимо построить новый литейный завод либо модернизировать чугунолитейное производство ПАО «Тутаевский моторный завод» мощностью 60 000 т литья в год для корпусных деталей рядных и V-образных двигателей рабочим объемом 12–50 л.

Группа № 2. Отливки из цветных сплавов для крупносерийного и среднесерийного производства высокооборотных двигателей.

Потребители литья: ОАО «АвтоВАЗ», ОАО «Заволжский моторный завод», ОАО «Ульяновский моторный завод», ООО «ЧТЗ-Уралтрак».

Необходима модернизация совместного производства цветного литья ПАО «КамАЗ» и группы «Sollers».

Группа № 3. Отливки из черных и цветных сплавов для мелкосерийного и опытного производства высокооборотных двигателей.

Потребители литья. ОАО «Тутаевский моторный завод», ОАО «Барнаултрансмаш», ОАО «ЧТЗ-Уралтрак», ОАО «Алтайский моторный завод», ООО «Уральский моторный завод», ОАО АК «Туламашзавод».

Специфика изготовления отливок из черных и цветных сплавов для двигателей спецтехники заключается в большом количестве опытного и мелкосерийного производства различных отливок сложной конфигурации. При этом для получения отливок высокой размерной точности с минимальными припусками на механическую обработку необходимо использовать качественные высокоточные литейные стержни, изготовленные по технологии «Cold-box-amin-процесс». Данная технология предполагает высокую степень оснащенности участка изготовления стержней, а также наличие дорогостоящей оснастки.

Наиболее эффективным решением является организация нового современного производства литейных стержней по технологии «Cold-box-amin-процесс». Такое производство сможет снабжать литейными стержнями все существующие литейные цеха заводов-изготовителей двигателей, что позволит максимально эффективно использовать сохранившиеся мощности литейных цехов, сохранить рабочие места на предприятиях-изготовителях поршневых двигателей без дорогостоящей модернизации каждого.

Данная бизнес-модель эффективно используется и хорошо зарекомендовала себя в таких странах, как Германия, Чехия, Польша, США и др.

Необходимое финансирование для строительства нового завода по производству литейных стержней составляет 2,4 млрд рублей.

Группа № 4. Отливки из черных сплавов для среднеоборотных дизельных двигателей.

Потребители литья: ОАО «Звезда», ОАО «Коломенский завод», ОАО ВДМ, ОАО «Пензадизельмаш», ООО УДМЗ, ОАО ТМЗ.

Для обеспечения потребностей производителей среднеоборотных дизельных двигателей в литых компонентах необходимо построить независимый современный литейный завод по производству отливок блоков и крышек цилиндров из высокопрочного чугуна и других сплавов мощностью 20 000 т/год (с учетом роста отечественного рынка среднеоборотных дизельных двигателей).

Организация нового литейного производства будет способствовать решению задачи по локализации в России полного цикла производства современных среднеоборотных дизельных двигателей при замещении импорта и снижении себестоимости изделий.

Новое литейное производство позволит получать отливки высокой размерной точности, с хорошим качеством поверхности, низким уровнем дефектности без облоя и заусенцев, что снижает затраты на очистку и механическую обработку отливок.

Необходимое финансирование для организации нового литейного производства блоков и крышек цилиндров среднеоборотных дизельных двигателей составляет 3,6 млрд рублей.

Целесообразно в концепцию и бизнес-план проекта литейного производства для среднеоборотных двигателей включить создание производственных мощностей для механической обработки блоков цилиндров (как минимум — предварительной, а лучше — окончательной).

Во избежание существенных затрат на транспортировку крупногабаритных литейных деталей целесообразно располагать мощности по механической обработке непосредственно в месте расположения литейного производства. Это позволит применять технологии ремонта отливок при обнаружении незначительных дефектов непосредственно в месте их производства, а также использовать возвратные материалы в технологическом процессе литья.

Отсутствие нового литейного производства с механообрабатывающим комплексом осложняет организацию производства перспективных семейств среднеоборотных двигателей, разработанных в рамках ФЦП «Национальная технологическая база», так как на предприятиях, планирующих организацию производства новых двигателей отсутствует современное оборудование для механической обработки — пятикоординатные обрабатывающие центры с размером стола 2000−5000 мм.

Необходимое финансирование на создание производственных мощностей для механической обработки блоков цилиндров составляет 3,4 млрд рублей.

Группа № 5. Производство компонентов из чугунного и стального литья для лицензионных среднеоборотных дизельных двигателей.

Потребители компонентов: гражданский морской флот.

Для обеспечения компонентами чугунного и стального литья производства лицензионных среднеоборотных дизельных двигателей необходимо сформировать независимую вертикально-интегрированную структуру. Мощность производства — до 20 тыс. тонн в год.

Необходимое финансирование для организации нового литейного производства компонентов среднеоборотных дизельных двигателей составляет 4 млрд рублей.

2.2.6. Центр компетенций развития литейного производства компонентов поршневых двигателей

Необходимо создать центр компетенций по производству высокоточных отливок в целях:

➢ технологической поддержки литейных заводов;

➢ подготовки высококвалифицированных кадров;

➢ внедрения новых технологий на предприятия;

➢ разработки новых технологических решений;

➢ разработки и освоения новых материалов.

При создании данного центра необходимо учитывать специализацию и наличие компетенций действующих предприятий.

2.2.7. НИОКР в области литейного производства компонентов поршневых двигателей

Для реализации поставленных задач необходимо выполнить ряд НИОКР, направленных на разработку передовых технологий и условий, которые обеспечат создание, массовое производство и вывод на рынок прецизионных отливок блоков и крышек цилиндров поршневых двигателей различного назначения.

➢ НИОКР по разработке технологии литья и конструкции литейной оснастки для отливок блоков и крышек цилиндров среднеоборотных дизельных двигателей нового поколения из высокопрочного чугуна;

➢ НИОКР по разработке технологии литья и конструкции литейной оснастки для отливок блоков и крышек цилиндров для перспективных высокооборотных поршневых двигателей из высокопрочного чугуна;

➢ НИОКР по разработке технологии литья и конструкции литейной оснастки для отливок блоков и крышек цилиндров для перспективных высокооборотных поршневых двигателей из сплавов на основе алюминия.

2.3. Развитие производства топливной аппаратуры и ее компонентов

Топливная аппаратура современных поршневых двигателей является основным компонентом, который определяет важнейшие показатели двигателя — расход топлива, токсичность отработавших газов, удельную мощность.

Основными действующими производителями топливной аппаратуры в РФ являются ОАО ЯЗДА, ООО АЗПИ, ОАО НЗТА и АО ДААЗ. В результате реализации подпрограммы «Создание и органи-

зация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007–2011 гг. был создан соответствующий научно-исследовательский задел для разработки перспективных образцов ТПА.

В развитие этого задела необходимо подготовить производственную базу для производства ТПА, так как существующие технологические возможности не позволяют в полном объеме обеспечить производство ТПА с требуемыми параметрами. Для решения данной задачи необходимо финансирование технологической подготовки производства и покупка высокотехнологичного оборудования.

В целях эффективности использования средств, выделяемых на решения данной задачи, необходимо обеспечить диверсификацию как по агрегатам (ТНВД, форсунка, компоненты), так и по типоразмерным рядам и типам ДВС — дизельный, бензиновый, газовый (табл. 2.3, 2.4).

Необходимо создание центров компетенций и производства отдельных элементов топливной аппаратуры, таких как топливных насос высокого давления (например, ЯЗДА), инжекторы (например, АЗПИ), топливные рейки и другие элементы с обязательным учетом специализации предприятий. В случае отсутствия научно-технологического задела, компетенций и технологий (например, топливная рейка) предлагается создание и развитие соответствующих производств с привлечением стратегического партнера.

Для двигателей специального назначения топливная аппаратура должна выполнять требование по многотопливности.

2.4. Развитие производства агрегатов наддува

Агрегаты наддува современных поршневых двигателей, наряду с топливной аппаратурой, является основным компонентом, который определяет важнейшие показатели двигателя — расход топлива, токсичность отработавших газов, удельную мощность и обеспечивает требуемые динамические характеристики транспортного средства.

Основными действующими производителями агрегатов наддува в РФ являются АО «НПО Турботехника», ОАО «КамАЗ» — турбокомпрессоры с радиальной турбиной (ТКР), ОАО «Пензадизельмаш», СКБТ (Пенза) и СКБ «Турбина» (Челябинск) — турбокомпрессоры с осевой турбиной (ТК). При этом «КамАЗ» производит турбокомпрессоры исключительно для собственных нужд, а СКБ «Турбина» только для двигателей специального назначения ЧТЗ.

В результате реализации подпрограммы «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007–2011 гг. на

Таблица 2.3

Потребность заводов в форсунках

Предполагаемые потребители	Объем производства/сбыта за 2014 г., ед.	Предполагаемый объем сбыта	
		при полном импортозамещении, ед.	для перспективных двигателей, ед.
ЗАО ПО «Дизель-Энерго»		6000	
ОАО РУМО		600	
ОАО «Пензадизельмаш»		720	6000
ОАО «Коломенский завод»		8220	
ООО УДМЗ		400	3022
ОАО «Волжский дизель им. Маминых»		510	2160
ОАО «Алтайский моторный завод»	2600	4000	
ОАО «Звезда»	910	2500	21 600
ОАО «Тутаевский моторный завод»	8400	8400	35 000
ООО «Уральский моторный завод»		540	
ОАО «Барнаултрансмаш»		2790	
ОАО «ЧТЗ-Уралтрак»	1500	4300	60 000
ОАО «Автодизель»	60 000	246 000	400 000
ООО ВМТЗ	4500	4500	
ОАО «КамАЗ»	35 000	308 000	420 000
ОАО АК «Туламашзавод»	2500	2600	
ОАО «Заволжский моторный завод»		330 000	
ОАО «Ульяновский моторный завод»		173 000	
ОАО «Завод Дагдизель»		170	
Прочие	2 620 000		

Таблица 2.4

Потребность заводов в ТНВД и форсунках производства ОАО НЗТА и ОАО ЯЗТА

Предполагаемые потребители	Объем производоства/сбыта за 2014 г., ед.		Предполагаемый объем сбыта при полном импортозамещении, ед.	Предполагаемый объем сбыта для перспективных двигателей, ед.
	ОАО НЗТА	ОАО ЯЗТА		
ЗАО ПО «Дизель-Энерго»			6000	
ОАО РУМО			460	
ОАО «Пензадизельмаш»			150	6000
ОАО «Коломенский завод»			620	
ООО УДМЗ			200	315
ОАО «Волжский дизель им. Маминых»			200	260
ОАО «Алтайский моторный завод»			1000	
ОАО «Звезда»			400	2000
ОАО «Тутаевский моторный завод»	1050	1052	1500	4000
ООО «Уральский моторный завод»			400	
ОАО «Барнаултрансмаш»			1396	
ОАО «ЧТЗ-Уралтрак»			1000	6000
ОАО «Автодизель»		25 097	270 000	65 000
ООО ВМТЗ	1253		1300	
ОАО «КамАЗ»		14 490	100 000	75 000
ОАО АК «Туламашзавод»			1300	
ОАО «Заволжский моторный завод»			100 00	
ОАО «Завод Дагдизель»			100	
Прочие	29382	13 448		

НИОКР по турбокомпрессорам (четыре Государственных контракта) были выделены более 500 млн рублей. Три контракта выполнено АО «НПО Турботехника» и один ОАО «Пензадизельмаш». В результате этого в отрасли получен значительный научно-исследовательский потенциал для создания перспективных образцов турбокомпрессоров и других агрегатов наддува для двигателей внутреннего сгорания. В том числе была создана база для разработки и производства агрегатов наддува с радиальной турбиной для высокофорсированных судовых и тепловозных двигателей и турбоэлектрокомпрессоров для двигателей различного назначения. Планируется НИОКР по созданию систем наддува для высокофорсированных среднеоборотных дизелей (степень повышения давления 4,5–5,5 и расходом воздуха 3,5–7,5 кг/с), по разработке и внедрению турбоэлектрокомпрессоров и систем автоматического управления воздухоподачей.

Кроме того, государственные контракты дали возможность организовать в составе НПО «Турботехника» Инжиниринговый центр по агрегатам и системам двигателей (ИЦ КСД), который может решать задачи создания и постановки на производство агрегатов и систем наддува для всей отрасли — как составная часть либо как филиал создаваемого Федерального исследовательского центра по развитию поршневого двигателестроения.

Задачи центра включают: осуществление полного цикла работ по созданию конструкторской и технологической документации для производства компонентов (агрегатов и систем) двигателей для транспорта различного назначения — автотракторного, железнодорожного, водного, воздушного и для спецтехники. Деятельность ИЦ КСД уже сегодня включает такие направления, как разработку, изготовление и испытание опытных образцов агрегатов наддува, жидкостно-масляных теплообменников, систем выпуска и нейтрализации отработавших газов и других систем и агрегатов двигателей, проектирование, производство и внедрение исследовательских испытательных стендов. Центр осуществляет работу по государственным контрактам, инновационным проектам и договорам с заводами, а также организует обучение и подготовку специалистов из числа студентов ведущих вузов.

Таким образом, уже в 2015 г., российское производство турбокомпрессоров на 50–60 % закрывает потребности отечественного двигателестроения. Развитие кооперации НПО «Турботехника» и ОАО «КамАЗ» и проведение модернизации производства позволит обеспечить потребность отрасли на 90 %.

Таблица 2.5

Предполагаемый годовой объем сбыта турбокомпрессоров и теплообменников

Предполагаемые потребители	Объем производства/сбыта за 2014 г., ед.	Предполагаемый к 2020 г. годовой объем сбыта при полном импортозамещении, ед.	Предполагаемый к 2020 г. годовой объем сбыта для перспективных двигателей, ед.
ЗАО ПО «Дизель-Энерго»		100	
ОАО РУМО		120	
ОАО «Пензадизельмаш»		130	1000
ОАО «Коломенский завод»		530	
ООО УДМЗ	62	400	1000
ОАО «Волжский дизель им. Маминых»		90	200
ОАО «Алтайский моторный завод»	40	750	
ОАО «Звезда»	12	70	1800
ОАО «Тутаевский моторный завод»	1116	1100	4000
ООО «Уральский моторный завод»		100	20 000
ОАО «Барнаултрансмаш»	3	600	
ОАО «ЧТЗ-Уралтрак»	1238	1200	5000
ОАО «Автодизель»	27 719	40 000	65 000
ООО ВМТЗ	16	150	
ОАО «КамАЗ»	39 190	50 000	70 000
ОАО «Заволжский моторный завод»	1450	7500	20 000
ОАО ГМЗ «Агат»	11	100	5000

Потребность производителей поршневых двигателей в турбокомпрессорах и охладителях наддувочного воздуха приведена в табл. 2.5.

Существующие технологические возможности не позволяют обеспечить в полном объеме собственное производство агрегатов наддува в связи с отсутствием в стране точного высокопрочного чугунного литья по корковым формам. Решить эту задачу планирует НПО «Турботехника» с участием ЗАО «Литаформ» и заводов потребителей турбокомпрессоров. Кроме того, необходимо дополнительное приобретение высокоточного оборудования, в том числе обрабатывающих центров, станков с ЧПУ, балансировочных и сборочных линий для обеспечения требуемого качества при изготовлении основных компонентов турбокомпрессоров (колес компрессора и турбины, корпусов и т. д.).

В целях эффективности использования средств, выделяемых на решения данной задачи, необходимо обеспечить диверсификацию как по агрегатам (ТКР, приводные компрессоры, электротурбокомпрессоры), так и по типоразмерным рядам и типам ДВС — дизельный, бензиновый, газовый.

2.5. Развитие производства элементов цилиндропоршневой группы и элементов кривошипно-шатунного механизма

В настоящее время компоненты поршневой группы в основном производятся на территории РФ, однако для среднеоборотных ДВС, а также для высокооборотных бензиновых ДВС современное экономически оправданное производство находится за пределами РФ. Основными произ-

Таблица 2.6

Потребность заводов в шатунах

Предполагаемые потребители	Предполагаемый объем сбыта при полном импортозамещении, ед.	Предполагаемый объем сбыта для перспективных двигателей, ед.
ЗАО ПО «Дизель-Энерго»	6000	
ОАО РУМО	680	
ОАО «Пензадизельмаш»	800	6000
ОАО «Коломенский завод»	8320	
ООО УДМЗ	400	3022
ОАО «Волжский дизель им. Маминых»	510	2200
ОАО «Алтайский моторный завод»	4000	
ОАО «Звезда»	2500	21 600
ОАО «Тутаевский моторный завод»	8400	35 000
ООО «Уральский моторный завод»	800	
ОАО «Барнаултрансмаш»	3720	
ОАО «ЧТЗ-Уралтрак»	4300	60 000
ОАО «Автодизель»	246 320	360 000
ООО ВМТЗ	350	
ОАО «КамАЗ»	308 000	420 000
ОАО АК «Туламашзавод»	1100	
ОАО «Заволжский моторный завод»	330 000	
ОАО «Ульяновский моторный завод»	173 000	
ОАО «Завод Дагдизель»	170	

Таблица 2.7

Потребность заводов в коленчатых валах

Предполагаемые потребители	Предполагаемый объем сбыта при полном импортозамещении, ед.	Предполагаемый объем сбыта для перспективных двигателей, ед.
ЗАО ПО «Дизель-Энерго»	80	
ОАО РУМО	100	
ОАО «Пензадизельмаш»	120	1000
ОАО «Коломенский завод»	520	
ООО УДМЗ	46	315
ОАО «Волжский дизель им. Маминых»	85	180
ОАО «Алтайский моторный завод»	719	
ОАО «Звезда»	50	1800
ОАО «Тутаевский моторный завод»	1500	4000
ООО «Уральский моторный завод»	100	
ОАО «Барнаултрансмаш»	465	
ОАО «ЧТЗ-Уралтрак»	539	5000
ОАО «Автодизель»	41 052	60 000
ООО ВМТЗ	150	
ОАО «КамАЗ»	38 613	70 000
ОАО АК «Туламашзавод»	1187	
ОАО «Заволжский моторный завод»	65 976	
ОАО «Ульяновский моторный завод»	43 343	
ОАО «Завод Дагдизель»	44	

водителями элементов ЦПГ являются совместные предприятия для автомобильных и спец. дизелей КамАЗ–Федерал-Могул, ЗАО «Костромской завод автокомпонентов», а также ОАО ТМЗ; для среднеоборотных дизелей, как правило, данные компоненты производятся на базе самого предприятия либо закупаются за рубежом. Элементы КШМ как для высокооборотных дизелей, так и для среднеоборотных дизелей производятся заводом изготовителем ДВС. Для обеспечения требуемых параметров компонентов этой группы необходима модернизация производства. Потребность отрасли двигателестроения в шатунах и коленчатых валах приведена в табл. 2.6 и 2.7 соответственно

Существующее технологические возможности не позволяют в полном объеме обеспечить производство элементов КШМ и ЦПГ с требуемыми параметрами. Частично данная проблема может быть решена при обеспечении предприятий-изготовителей современным высокотехнологичным оборудованием (сплит-технология при изготовлении шатунов и т. д.). В целях эффективности использования средств, выделяемых на решения данной задачи, требуется обеспечить диверсификацию по рядам типоразмеров ДВС.

Необходимо использовать имеющийся опыт ПАО «КамАЗ» в трансфере технологий и обеспечении локализации производства совместно с фирмой Federal-Mogul, а также проведение модернизации кузнечного производства в ПАО

Таблица 2.8

Потребность заводов в гильзах, поршнях и поршневых кольцах

Предполагаемые потребители	Объем производоства/сбыта за 2014 г., ед.	Предполагаемый объем сбыта при полном импортозамещении, ед.	Предполагаемый объем сбыта для перспективных двигателей, ед.
ЗАО ПО «Дизель-Энерго»		28 000	
ОАО РУМО		2040	
ОАО «Пензадизельмаш»		2400	
ОАО «Коломенский завод»		24 960	
ООО УДМЗ		1200	9066
ОАО «Волжский дизель им. Маминых»		1530	6600
ОАО «Алтайский моторный завод»	12 000	12 000	
ОАО «Звезда»		7500	64 800
ОАО «Тутаевский моторный завод»	25 200	25 200	105 000
ООО «Уральский моторный завод»		2400	
ОАО «Барнаултрансмаш»		11 162	
ОАО «ЧТЗ-Уралтрак»		12 900	180 000
ОАО «Автодизель»		800 000	1 080 000
ООО ВМТЗ		1050	
ОАО «КамАЗ»		924 000	1 260 000
ОАО АК «Туламашзавод»		3300	
ОАО «Заволжский моторный завод»	990 000	990 000	
ОАО «Ульяновский моторный завод»	519 000	519 000	
ОАО «Завод Дагдизель»		510	
Прочие	9 728 800		

ТМЗ с последующей современной технологией обработки поковок (коленвал, шатун и др.). Потребность заводов производителей двигателей в деталях поршневого комплекта приведена в табл. 2.8.

Организация производства коленчатых валов для среднеоборотных двигателей

В целях решения задачи производства коленчатых валов для среднеоборотных двигателей нового поколения возможна реализация двух направлений:

➢ создание специализированного независимого производства коленчатых валов по типу компании «Alfing» (Германия);

➢ модернизация соответствующих производств на каждом из предприятий-производителей двигателей.

2.6. Развитие производства комплексных систем управления

Реализация подпрограммы «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы позволила создать требуемый научно-исследовательский потенциал для разработки перспективных образцов комплексных адаптивных систем управления. Основными производителями систем управления могут быть ООО АБИТ, ОАО ИТЕЛМА, ОАО «НПО автоматики». Необходимый научно-технический потенциал накоплен в МГТУ им. Н.Э. Баумана и в ФГУП НАМИ.

2.7. Развитие производства систем нейтрализации, рециркуляции и выпуска отработавших газов

Сравнение позиций отечественных и иностранных производителей проведено в подотрасли производства систем выпуска и комплексной очистки газов. Однако аналогичная картина характерна для систем наддува, топливоподачи, охлаждения, смазки и других систем и агрегатов двигателя.

В производстве систем выпуска и нейтрализации отработавших газов положение по соотношению отечественных и зарубежных производителей складывается следующим образом.

Объем рынка РФ выпускных систем и систем нейтрализации составлял в 2013 г. по сторонним оценкам около 26 млрд руб., в том числе первичный рынок (производство) 25 млрд руб, вторичный (запчасти) 0,6 млрд руб. Этот объем позволяет разместить в рынке не более 2–3 самодостаточных компаний.

Структура себестоимости этой группы компонентов следующая: себестоимость системы выпуска формируется на 90 % за счет отечественных поставщиков при применении черного металла, и на 30 % при производстве систем из нержавеющих сталей (практически полностью отсутствует производство нержавеющих российских труб).

Системы нейтрализации для бензиновых двигателей (трехкомпонентные): основные компоненты — каталитические керамические блоки и термоизолирующие прокладки на 100 % импортного производства.

Структура себестоимости для наиболее технологичной системы нейтрализации дизельных двигателей восстановительного типа представлена на рис. 2.2 (71 % импортных комплектующих.).

Подобное соотношение локальных и импортных компонентов приводит к очень высокой цене на эти системы, что исключает их использование производителями двигателей, предназначенных для внутреннего рынка (периодическая отсрочка полного введения норм Евро 4, 5).

В настоящее время на рынке Российской Федерации около 50 производителей выпускных систем, из них 45 ориентированы только на вторичный рынок (рынок запчастей). При этом на первичный рынок работает 8 компаний, из них 5, контролируемых иностранными производителями, и 3 отечественные.

Аналогичная картина характерна для производства систем нейтрализации отработавших газов. Доминируют 7 компаний, находящиеся под контролем иностранных производителей. Круг отечественных производителей представлен 4 компаниями.

Все автосборочные предприятия, контролируемые иностранными автомобильными концернами, работают исключительно с иностранными производителями (или их дочерними компаниями) выпускных систем и систем нейтрализации отработавших газов.

В результате 75 % рынка контролируется иностранными производителями, что произошло в течение 3–5 последних лет. Пока зарубежными

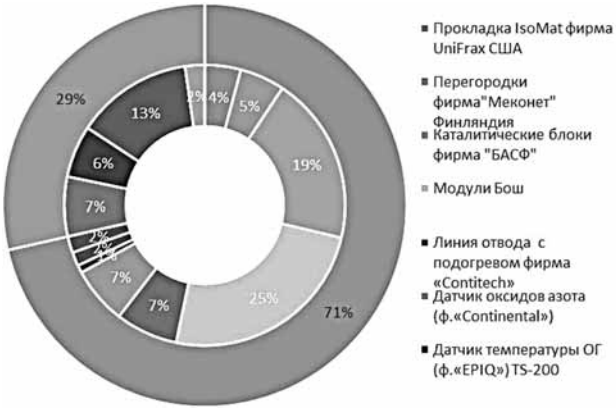


Рис. 2.2. Структура себестоимости комплексной системы нейтрализации отработавших газов

компаниями слабо контролируется вторичный рынок изделий для продукции ОАО «АвтоВАЗ», но это дело времени. Закрытие балансов российскими компаниями, контролируемыми иностранцами, последние 3–4 года проводится с убытками, что означает либо демпинг, либо 100 %-ный вывод прибыли.

По системам менеджмента качества необходимо отметить, что в настоящее время внедрение и применение системы ISO16949 нецелесообразно. При существующих объемах выпуска компонентов по малым и средним предприятиям внедрение этой системы приводит к реализации конкурентного преимущества крупных игроков рынка поршневых двигателей и запретительной мерой по входу на рынок мелких и средних производителей.

Сравнение качества продукции и рыночных условий иностранных и отечественных производителей компонентов систем нейтрализации показывает следующее.

1. Условия производства и качество примерно одинаковы (производственное оборудование практически однотипное, поставляется одними и теми же производителями).

2. Технический уровня разработок зарубежных компаний выше (инженерный центр существует только у двух отечественных производителей).

3. Уровнь цен и условия продаж для иностранных производителей значительно лучше (например, Группой компаний ГАЗ договоры заключаются с иностранцами на 3–5 лет, цены на одну и ту же продукцию выше на 10–20 %, отсутствуют альтернативные поставщики).

4. Объемы производства иностранных концернов, стоящие за российскими дочерними компаниями, имеют оборот на порядок превышающий оборот, крупнейшего российского производителя.

5. Производительность труда — при соответствующих объемах выпуска иностранных и отечественных производителей соизмеримы.

6. Условия развития и кредитования для иностранных производителей значительно лучше (по суммам, ставкам и срокам кредитования).

Стратегия развития и импортозамещения в подотрасли компонентов заключаются в следующем.

1. Создание крупного отечественного компонентного холдинга (с оборотом 10–15 млрд рублей в год) за счет слияния мелких производителей (получение распределенной сети производства, синергетического эффекта за счет снижения транспортно-логистических расходов, управленческих расходов, расходов на разработку, испытания, усиление позиций в переговорах с производителями). Основой для объединения может послужить выдача государственных гарантий базовому предприятию под коммерческий кредит на техническое перевооружение от структур ВЭБ и ВТБ с отсрочкой платежей по кредиту на 5 лет при единой ценовой политике холдинга.

2. Создание единого специализированного центра разработки, испытаний и сертификации продукции с возможностью облегченного доступа участникам холдинга к проведению испытаний.

3. Законодательное стимулирование программ развития поставщиков компонентов (субъектов малого и среднего бизнеса), зарегистрированных в Минпромторге России за счет снижения налогооблагаемой прибыли.

4. Отсрочка уплаты НДС на ввозимое оборудование в рамках программ технического перевооружения поставщиков компонентов, зарегистрированных в Минпромторге РФ.

5. Законодательное запрещение формирования уставного капитала ввозимым оборудованием участникам нерезидентам в акционерных обществах и обществах с ограниченной ответственностью — переход на прямое финансирование уставного капитала.

6. Снижение допустимой доли в уставном капитале малых и средних предприятий иностранных членов при одновременном расширении льгот по кредитованию.

7. Закрепление правил создания СП с долей отечественных производителей не менее 51 % и обязательным переносом современных технологий и НТЦ на территорию России.

8. Контроль требований Правительства за выполнением программ локализации и норм вредных выбросов при выпуске продукции.

9. Законодательное оформление форм стратегических альянсов для выхода на зарубежные рынки, в том числе для покупки аналогичных производств за рубежом и перенос их на территорию Российской Федерации.

10. Создание специализированных целевых ориентированных на нужды конкретных предприятий программ обучения студентов (бакалавров и магистров отдельно) в рамках имеющихся специальностей, с ранней специализацией (2–3-й курс), увеличенным объемом практических занятий и со специальным государственным стипендиальным фондом.

11. Закрепление только за отечественными предприятиями права на рециклинг, в том числе переработку отработавших ресурс катализаторов, что резко повысит рентабельность производства систем нейтрализации.

12. Создание единой в отрасли компонентов системы внедрения менеджмента качества ISO 9001 на первом этапе и при укрупнении предприятий переход на ISO 16949.

13. Создание механизма, законодательно закрепляющего продажи металлов платиновой группы на территории РФ по внутренним ценам для стимулирования производства высокотехнологичных изделий с высокой добавочной стоимостью.

14. Создание и стимулирование использования систем ретрофикации для ПДВС, находящихся в эксплуатации.

Реализация мер возможна совместными усилиями ФГУП НАМИ, АО НПО «Турботехника», ООО «Инта-Центр», ООО «Экоальянс».

2.7.1. Повышение качества горюче-смазочных материалов

Перспективные требования к дизельному топливу:

➢ снижение и стабилизация содержания серы и полициклических углеводородов в составе дизельного топлива;

➢ повышение эксплуатационных свойств различных видов топлива, в том числе:

— коррозионной активности;

— смазывающей способности;

— цетанового числа;

— низкотемпературных свойств (предельная фильтруемость).

Показатели дизельного топлива	Перспективные требования EN 590
Массовая доля серы, %, не более	0,010
Цетановое число, не менее	52
Плотность при 15 °С, кг/м	820–845
Кинематическая вязкость при 40 °С, мм^2/с	1,5–4,0
Фракционный состав: 95 % перегоняется до, °С	340
Содержание полициклических ароматических углеводородов, %, не более	10
Смазывающая способность, мкм, не более	400
Окислительная стабильность, г/м^3, не более	20
Предельная температура фильтруемости, °С, не выше (для зимних сортов)	– 60

Перспективные требования к моторному маслу:

➢ применение моторных масел пониженной вязкости для повышения механического КПД двигателя;

➢ обеспечение длительной работоспособности для увеличения интервала межсервисного обслуживания двигателей, работающих на газовых и жидких топливах (применение масел по технологии Low saps).

Требования по снижению расхода топлива приводят к смещению классов вязкости от 15W-40 к 10W-40 и, в дальнейшем, к 5W-30.

2.8. Создание и развитие сети предприятий поставщиков компонентов двигателей

Следует предусмотреть поддержку отечественных производителей компонентов по следующим направлениям с учетом достигнутых практических результатов.

1. Подшипники скольжения.
2. Современные резинотехнические изделия.
3. Газобаллонное оборудование, в том числе системы зажигания и системы питания газовых двигателей.
4. Циркуляционные и моторные масла.
5. Системы регулирования фаз газораспределения.
6. Системы непосредственного впрыска бензина.
7. Топливная аппаратура дизельных двигателей.

2.9. Выводы по результатам анализа рынков поршневых двигателей и компонентов

1. Выявлены сегменты рынка с большим финансовым потенциалом, в котором полностью отсутствует отечественная продукция либо ее доля ничтожно мала.

2. Производство современных отечественных двигателей существенно зависит от поставок импортных комплектующих (литых корпусных деталей, цилиндропоршневой группы, топливоподающих систем, систем наддува, систем комплексной нейтрализации, систем управления, РТИ, метизов и др.).

3. Отсутствие отечественных технических решений для ПДВС и их компонентов в отдельных областях применения.

4. Выявлено дублирование разработок новых двигателей на отечественных предприятиях.

5. Конечному потребителю необходимо комплексное решение в виде энергетических установок (гибридных систем для легковых автомобилей, судовых дизель-электрических агрегатов, пропульсивных компонентов и когенерационных установок).

6. Реализация стратегии позволит решить указанные выше проблемы и значительно расширить российский рынок поршневых двигателей для отечественных потребителей.

3. Результаты реализации программы господдержки 2011–2015 гг.

Представляется крайне необходимым остановить экспансию зарубежных двигателестроительных предприятий в виде поставок готовой продукции и компонентов и сохранить в России стратегически важную отрасль, обеспечивающую транспортную, энергетическую и оборонную безопасность государства.

В целях улучшения ситуации в отрасли Министерством промышленности и торговли реа-

лизована подпрограмма «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы, результаты которой можно будет увидеть в течение ближайших двухтрех лет. Общий объем финансирования данной подпрограммы составляет 16,1 млрд рублей, в том числе 8,1 млрд рублей из внебюджетных источников.

В результате выполнения Государственных контрактов в рамках реализованной подпрограммы к 2017 году по нашим оценкам только в области среднеоборотных дизельных двигателей годовой объем реализуемой продукции должен возрасти на 15,01 млрд рублей в год, а в области высокооборотных дизельных двигателей (в том числе двигателей специального назначения) — на 5 млрд рублей в год.

Мировая практика показывает, что для успешного развития той или иной отрасли, концентрации финансовых вложений для получения положительных экономических показателей необходимо создать центры компетенций. Одной из самых наукоемких отраслей, обеспечивающих наибольшую добавленную стоимость в структуре цены конечного продукта, является двигателестроение. Возрождение собственного транспортного машиностроения без подобных центров невозможно.

Без концентрации финансовых, кадровых ресурсов в форме научно-технических центров, в краткосрочной перспективе, в лучшем случае, мы сможем претендовать на локализацию того или иного производства на территории нашей страны.

Кроме того, мировая практика показывает, что подобные центры компетенции создаются, как правило, на базе или в тесном сотрудничестве в техническими вузами. Это объясняется тем, что при создании современного поршневого двигателя необходимы компетенции большого числа специалистов, а именно технологов, металлургов, специалистов в области обработки давлением, механической обработки, литейщиков, материаловедов, специалистов в области систем управления, механики сплошной среды, гидравликов, специалистов в области газовой динамики, прикладной математики и многих других. Специалисты такого широкого профиля с необходимым набором компетенций и уровнем знаний имеются только в специализированных отраслевых НИИ и в высшей школе.

С учетом вышеизложенного, можно утверждать, что без государственной поддержки развитие двигателестроения невозможно, но с поддержкой и в краткосрочной перспективе может привести к устойчивому экономическому росту данного сегмента экономики нашей страны.

На основании представленной стратегии должна быть разработана комплексная программа сохранения и развития отечественного двигателестроения. Реализация программы потребует адекватной финансовой поддержки государства и введения на период ее реализации мер по ограничению импорта зарубежной техники и компонентов в тех секторах, где в максимальной степени требуется независимость от зарубежных поставок: судостроение, военная техника, железнодорожный транспорт, малая и распределенная энергетика, авто- и мототранспорт, легкая, в том числе беспилотная авиация, робототехника.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Реализованную Министерством промышленности и торговли подпрограмму «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 годах дизельных двигателей и их компонентов нового поколения» федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы на сегодняшний день можно признать успешной.

2. Для повышения эффективности уже существующей поддержки государством отрасли «Поршневое двигателестроение» необходимо разработать отдельную федеральную целевую программу, основными целями которой будут:

➢ определение целевых показателей развития отрасли двигателестроения:

— устранение зависимости от импорта двигателей и компонентов в 2016–2020 гг.;

— повышение экономических показателей производств двигателестроения в 2016–2020 гг.;

— повышение технического уровня разрабатываемых двигателей в 2016–2020 гг.;

➢ создание современной высокотехнологичной производственной базы по выпуску основных компонентов поршневых двигателей (литейное производство блоков, крышек цилиндров и других основных деталей, топливной аппаратуры, агрегатов наддува, элементов цилиндро-поршневой группы, элементов кривошипно-шатунного механизма, комплексных систем управления, систем выпуска и очистки газов);

➢ повышение качества образования и возрождение научных школ в области двигателестроения с целью подготовки высококвалифицированных специалистов;

➢ концентрация ресурсов в форме создания специализированного федерального исследовательского центра по развитию поршневого двигателестроения в Российской Федерации.

(*Продолжение в следующих выпусках*)

УДК 621.436

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И СГОРАНИЯ В СУДОВОМ ДИЗЕЛЕ

В.В. Гаврилов, д.т.н., профессор
ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова

Отмечена ключевая роль смесеобразования в комплексе внутрицилиндровых процессов в дизеле, включая процесс горения топлива. Рассмотрены известные критерии оценки качества смесеобразования. Установлена разрозненность критериев и их частный характер. Предложена система критериев качества смесеобразования. Она представляет собой иерархическую систему, в которой в роли генерального критерия выступает удельный индикаторный расход топлива в дизеле. Система содержит последовательность частных критериев. В указанную последовательность входят как известные критерии, так и критерий, предложенный автором. На основе использования системы критериев выполнена постановка оптимизационной задачи, решение которой дает возможность обоснованного выбора сочетаний параметров топливной аппаратуры и камеры сгорания, обеспечивающих высококачественные смесеобразование и сгорание в дизеле.

Для развития судовой энергетики необходимы разработка новых и модификация выпускающихся дизельных двигателей. Они должны отвечать современным непрерывно возрастающим требованиям к их технико-экономическим и экологическим показателям. Одним из важнейших путей решения этой проблемы является повышение качества смесеобразования и сгорания в дизеле. Соответствующие задачи на практике решаются преимущественно методом трудоемкой и дорогостоящей доводки рабочего процесса двигателя на испытательном стенде завода, в ходе которой могут варьироваться те или иные параметры топливной аппаратуры (ТА) и камеры сгорания (КС). Решения зачастую принимаются по интуиции, методом проб и ошибок, без достаточно ясного понимания сущности происходящих в дизеле процессов, базирующихся на устаревших знаниях, без «локального» рассмотрения процессов, без ориентиров в виде некоторых критериев их качества и без предварительной количественной оценки. Не всегда достигается наилучший результат этой работы. Другими словами, налицо недостаточное теоретическое обеспечение решения рассматриваемых задач.

Известно, что в комплексе внутрицилиндровых процессов ключевая роль принадлежит смесеобразованию, определяющему показатели сгорания топлива и, в конечном счете, показатели работы дизеля. Опыт работы по рассматриваемой теме показывает, что проблема организации рационального смесеобразования начинается с отсутствия общепризнанного критерия его качества. Исследователями предложены весьма разнообразные критерии, которые носят частный характер. Каждый из них бесспорно отражает некоторые существенные свойства смесеобразования. Учет этих критериев способствует адекватному представлению о процессе и частично может решить проблему его рациональной организации. Однако встает вопрос, какой из критериев следует предпочесть? Необходимость выбора побуждает выдвинуть гипотезу о возможности формирования и использования системы критериев качества смесеобразования. Ожидается, что такая система критериев поможет повысить эффективность работ по организации процесса.

На основании сказанного цель данного исследования состоит в разработке принципов организации процессов смесеобразования и сгорания, качество которых может быть количественно оценено на основе системы известных и новых критериев.

Для достижения указанной цели необходимо было исследовать известные критерии оценки качества смесеобразования, обосновать выбор тех из них, которые могли бы войти в состав предлагаемой системы критериев, и проверить целесообразность использования системы на практике.

Рассмотрим результаты анализа известных критериев качества смесеобразования [1]. Несмотря на хроническую неразрешенность проблем, связанных с теорией смесеобразования, создатели дизелей во все времена вынуждены отвечать на два взаимосвязанных вопроса: какое смесеобразование можно считать высококачественным и как следует его организовывать?

Наиболее часто ответ на эти вопросы дается в общем виде, используются качественные оценки смесеобразования. Ю.Б. Свиридов ставил задачу обеспечения «*высокой скорости смесеоб-*

разования», которая достигается «*...при хорошем распределении топлива в камере сгорания, т. е. при тщательном подборе конфигурации факела топлива к форме камеры сгорания, при тонком распыливании топлива и при интенсивных завихривании и турбулизации среды...*». А.С. Лышевский отмечал важность обеспечения некого рационального распределения топлива на некотором расстоянии от сопла форсунки, максимального использования воздушного заряда камеры сгорания. В трудах НИИДа и МАДИ обсуждалась необходимость такой организации смесеобразования, которая обеспечивает возможность задания определенной взаимосвязи между характеристиками впрыскивания топлива и выделения теплоты при сгорании, которая позволяет управлять указанными характеристиками. В ряде работ ЦНИДИ предлагается путем профилирования днища поршня добиваться определенного соответствия распределения масс топлива и воздуха по радиусу КС (при центральном расположении форсунки). По мнению Н.Ф. Разлецева, указанное распределение должно быть таким, чтобы в определенной фазе процесса была обеспечена некоторая зависимость локального коэффициента избытка воздуха от радиуса камеры [2]. Но при этом авторы, как правило, не располагают достоверными сведениями о распределении массы топлива по длине струи [3].

Довольно распространенным является принцип, в соответствии с которым необходимо всеми средствами обеспечивать максимально возможную длину свободной топливной струи [4] или максимально возможные «объем» и «поверхность» струи [5 и др.]. Авторы исходят из того, что наиболее эффективное смесеобразование, обеспечивающее высокие скорости диффузионного горения топлива, можно получить главным образом в объеме топливной струи. Заметим, что в этих работах, как правило, остается вне поля зрения проблема своевременного использования для смесеобразования воздуха, находящегося между струями.

Многие авторы важную роль в смесеобразовании отводят вращательному движению воздушного заряда вокруг оси цилиндра дизеля [6], а также радиально направленным потокам заряда, образующимся в результате его перетекания в КС при движении поршня в окрестности ВМТ [7]. Интенсивность вращательного движения и число топливных струй выбирают с таким расчетом, чтобы увлекаемые потоком воздуха мелкие частицы топлива не переносились из одного факела в другой. Обычно при этом имеется в виду момент времени, соответствующий началу самовоспламенения. Но следует заметить, что указанный перенос частиц имеет место и после самовоспламенения. В некоторых работах, например в диссертации В.И. Быкова, это обстоятельство учтено. Способствуя ускорению и полноте диффузионного сгорания топлива, движение воздуха требует затрат энергии на его организацию. Поэтому всегда актуальны вопросы поиска соответствующих экономичных средств организации движения воздушного заряда и оценки эффективности соответствующих мероприятий.

Один из наиболее широко обсуждающихся вопросов — роли стенок КС в процессах смесеобразования и сгорания. Довольно устойчивым и весьма распространенным было мнение специалистов о недопустимости контакта между топливной струей и стенкой. Однако уже в 1942 г. В. Пфлаум пришел к выводу, что соударение топливной струи со стенкой КС, несмотря на нежелательное скопление крупных капель топлива на стенке и возможное их коксование, может благотворно влиять на качество смесеобразования за счет вовлечения в процесс воздуха, окружающего топливную струю. По мнению автора, необходимо специально организовывать такое соударение топливной струи со стенкой КС, при котором струя достаточно развита и подготовлена. При этом «поверхность» струи должна быть охвачена пламенем, а ядро струи должно находиться в состоянии испарения. Угол между осью струи и стенкой в месте соударения должен быть таким, чтобы своевременно предоставить движущимся после удара частицам топлива необходимые «боковые» объемы воздуха, в частности, объемы между струями. При всем разнообразии выводов последующих исследований по рассматриваемой проблеме принципы, сформулированные В. Пфлаумом, можно считать основополагающими. Они находят экспериментальное подтверждение в работах современных авторов [1, 8].

Первостепенное значение в организации высококачественного смесеобразования придается процессу топливоподачи. Этот процесс определяет характер изменения интенсивности впрыскивания в цилиндр и качества распыливания топлива во времени. Приведем некоторые общие выводы из выполненного анализа соответствующих многочисленных опубликованных работ.

Наиболее существенные факторы топливоподачи, определяющие качество смесеобразования, — продолжительность впрыскивания топлива φ_j, максимальное давление впрыскивания $p_{j\max}$, диаметр d_c и число i_c сопловых отверстий форсунки, а также вид расходной характеристики топливоподачи — зависимости массового расхода топлива от угла поворота коленчатого вала $g_j(\varphi)$.

Сокращение продолжительности впрыскивания φ_j, с одной стороны, способствует ускорению процесса сгорания топлива, а значит и повышению топливной экономичности дизеля. Объясняется это просто. Общеизвестно, что если сгорание происходит в окрестности ВМТ поршня, то есть теплота в цикл подводится при высоком уровне температур рабочего тела, то имеет место высокий термический КПД цикла. С другой стороны, сокращение φ_j влечет за собой уменьшение продолжительности перемешивания топлива с воздухом, что может снизить качество диффузионного сгорания. По мнению ряда авторов, это в некоторой степени ограничивает возможность влияния на продолжительность сгорания за счет интенсивности топливоподачи. Если в дополнение к сказанному отметить, что сокращение φ_j зачастую сопряжено с увеличением жесткости процесса сгорания, то можно сделать вывод о неоднозначном влиянии на качество смесеобразования и сгорания.

Продолжительность φ_j при некотором неизменном эффективном суммарном проходном сечении сопловых отверстий зависит от среднего давления впрыскивания топлива p_j. В исследованиях смесеобразования часто используется максимальное давление впрыскивания $p_{j\max}$. Давление впрыскивания влияет также на качество распыливания топлива и геометрические характеристики топливной струи. Вместе с тем встречаются сведения о том, что увеличение $p_{j\max}$ выше 100–110 МПа либо мало влияет [3], либо практически не влияет на средний размер капель распыленного топлива. Аналогичные выводы сделаны в некоторых публикациях относительно изменения дальнобойности и угла конуса струи.

С одной стороны, утверждается, что период задержки самовоспламенения τ_i и расстояние между очагом самовоспламенения и соплом форсунки практически не зависит от $p_{j\max}$, с другой — некоторые исследователи отмечают увеличение τ_i и указанного расстояния с ростом $p_{j\max}$. Отмечается сложное влияние $p_{j\max}$ на скорость распространения пламени и другие характеристики процесса горения, в том числе на эмиссию вредных веществ [3, 4]. В частности, в экспериментах на дизеле 1ЧН13/14 установлено, что при увеличении $p_{j\max}$ до 50–60 МПа уровень эмиссии NO_x существенно снижается, а при дальнейшем увеличении давления впрыскивания количество NO_x растет. Первоначальное снижение эмиссии авторы объясняют выравниванием поля локальных температур в КС, а дальнейший ее рост — увеличением так называемой среднемассовой температуры рабочего тела.

Ввиду неоднозначности упомянутых и других выводов выбор целесообразного уровня $p_{j\max}$ и продолжительности φ_j на практике представляет собой сложную задачу. Указанный выбор необходимо делать с учетом большого числа ограничений, например ограничений жесткости процесса сгорания, токсичности отработавших газов, механических напряжений в механизме привода топливной аппаратуры, затрат мощности на указанный привод и т. д.

Утверждения авторов относительно целесообразного вида расходной характеристики топливоподачи $g_f(\varphi)$ различны и противоречивы. Во многих работах обосновывается целесообразность относительно малой интенсивности подачи в период задержки самовоспламенения топлива и увеличенной интенсивности при окончании впрыскивания. Это достигается, в частности, применением так называемого двухфазного впрыскивания топлива (именуемого авторами «двухразовым», «ступенчатым», «двухступенчатым», «двойной топливоподачей»). При этом используется либо форсунка с двумя пружинами, либо две форсунки на один цилиндр. Опубликованы сведения об использовании «трехфазного» впрыскивания, позволившего, по утверждению авторов, снизить уровень эмиссии NO_x [9]. В упомянутых работах, как правило, речь идет об улучшении характеристик тепловыделения в дизеле и не достаточно раскрывается механизм влияния расходной характеристики топливоподачи на токсичность отработавших газов.

При разработке теории смесеобразования авторы предпринимали многочисленные попытки сформулировать критерии качества смесеобразования. Первым по хронологии и наиболее распространенным можно считать критерий, представляющий собой отношение дальнобойности топливной струи l_c к расстоянию $l_{кс}$ от сопла форсунки до стенки КС. Авторы считают, что необходимо добиваться определенного отношения в конце периода задержки самовоспламенения топлива или даже равенства $l_c = l_{кс}$. например был предложен критерий, оценивающий соотношение длины свободной горящей топливной струи, определяемой расчетом, с расстоянием $l_{кс}$.

Н.Ф. Разлейцев [2] предложил в качестве «критерия оптимальности формы КС» использовать совокупность характеристики распределения воздушно-топливного отношения по радиусу цилиндра $\alpha(r)$ и двух величин: $\bar{m}_{f\text{см}}$ — доли цикловой подачи топлива в зоне смешения пристенных потоков топлива соседних струй и $\bar{m}_{f\text{вт}}$ — доли цикловой подачи топлива, попавшего на зеркало цилиндра. Автор утверждает, что для «оптимального» смесеобразования (по условию достижения максимального КПД дизеля) необходимо обеспечить $\alpha(\underline{r})$ = const, а также некоторые значения $\bar{m}_{f\text{см}}$ и $\bar{m}_{f\text{вт}}$ (не более 0,15–0,20).

Попытки разработки критериев качества смесеобразования предпринимаются до настоящего времени. Ю.Н. Астанским предложен критерий E, названный «коэффициентом диффузионного форсирования смесеобразования», представляющим собой «среднее за период сгорания отношение масс воздуха и топлива, физически контактирующих друг с другом». Указанные массы определяются в работе посредством упрощенных интегральных оценок, не учитывающих параметры топливных струй и КС.

Г.М. Камфером разработан критерий оптимальности смешения $K_{см}$, предусматривающий равенство кинетической энергии вращательного движения воздушного заряда цилиндра требуемой энергии для тангенциального переноса паров топлива через межструйное пространство КС в течение периода впрыскивания топлива.

Критерий, предложенный С.В. Гусаковым [10], выражает отношение располагаемого времени на процесс испарения капель к потребному времени достижения каплями диаметра, равного критическому на момент воспламенения — диаметра таких капель, которые далее успевают испариться в период их нахождения во фронте пламени. Упомянутым здесь и другим современным критериям свойственно, на взгляд авторов, отсутствие возможности достоверной количественной их оценки. По-видимому, по этой причине они пока не получили широкого применения.

Опыт исследователей в решении обсуждаемой проблемы имеет большую ценность. Однако представленный краткий обзор позволяет сделать вывод о разрозненности, противоречивости, частном характере использующихся принципов организации смесеобразования и сгорания в дизелях и соответствующих критериев качества. Зачастую отсутствуют количественное выражение критериев качества смесеобразования. В большинстве случаев применяющиеся критерии учитывают лишь геометрические параметры топливной струи и КС. Они, как правило, оценивают смесеобразование в некоторый фиксированный момент времени, который чаще всего соответствует началу самовоспламенения топлива. При этом не учитывается, что процесс смесеобразования имеет место в течение всего последующего горения топлива.

Рассмотренным работам, направленным на обеспечение высококачественного смесеобразования, свойственен расчетно-экспериментальный характер. Использованные математические модели смесеобразования и сгорания, как правило, фрагментарно описывают процессы. При построении математической модели системный подход используется недостаточно. Адекватность моделирования многих процессов необходимо подтверждать экспериментами. Уровни сложности моделей элементарных процессов в пределах одной работы могут существенно различаться: при наличии «локального» описания одних процессов имеются грубые описания интегрального характера в отношении других процессов. Во многих работах применяется физическое моделирование отдельных элементарных процессов, а также комплекса процессов. Однако и для этой части работ также характерна фрагментарность. Как правило, физическое моделирование выполняет второстепенную роль.

На практике организация процессов смесеобразования и сгорания осуществляется путем согласованного выбора основных параметров ТА и КС [11]. Число возможных согласовываемых параметров велико, поэтому их набор в разных исследованиях может быть различным. Весьма различаются методики согласования.

Обсуждаемое согласование параметров двигателя на практике выполняется преимущественно экспериментальным путем при наличии некоторых предварительных расчетных оценок отдельных параметров деталей и узлов [8]. Происходит это во время так называемой доводки рабочего процесса на стенде завода. Процедура согласования может совершаться в виде последовательности однофакторных экспериментов или в виде многоэтапного исследования, которое представляет собой чередование расчетов рабочего процесса с экспериментами на дизеле, позволяющими идентифицировать параметры математической модели применительно к конкретным условиям работы дизеля [2].

Очевидно, что наличие большого числа стендовых испытаний при доводке существенно удлиняет и удорожает процесс создания дизеля. Поэтому необходим поиск новых методов и средств, позволяющих сократить объем доводочных работ и повысить при этом качество процессов смесеобразования и сгорания.

На наш взгляд, на указанном пути полезным может оказаться рассмотрение смесеобразования как системы. Это позволит увидеть сложную картину элементарных процессов, накладывающихся друг на друга в пространстве и времени, оказывающих взаимное влияние. Так, процессы движения и испарения капель топлива определяют и могут сопровождать их горение и, наоборот, горение может влиять на испарение и движение капель. И поскольку выходным элементом системы смесеобразования является процесс сгорания топлива, очевидно, что оценивать качество смесеобразования следует через качество сгорания.

Принимая во внимание эти рассуждения, можно предложить следующее определение понятия «высококачественное смесеобразование».

Это такое перемешивание топлива с воздухом, которое обеспечивает своевременное и полное сгорание топлива при допустимых уровнях тепломеханической напряженности деталей камеры сгорания и токсичности отработавших газов.

Как показал приведенный выше анализ опубликованных работ, известные критерии качества смесеобразования носят частный характер и не учитывают влияния совокупности большого числа действующих факторов. Ввиду обилия этих факторов авторам не удалось предложить универсальный критерий. Для оценки качества смесеобразования в данной работе предложено использовать систему критериев.

Так как качество смесеобразования может проявиться только через показатели результирующего процесса — процесса сгорания топлива или рабочего процесса дизеля в целом, генеральным критерием качества смесеобразования можно считать удельный индикаторный расход топлива или обратную ему величину — индикаторный КПД дизеля.

Принимая во внимание необходимость комплексной оценки смесеобразования и сгорания, наряду с b_i следует использовать характеристики собственно смесеобразования. Поэтому предлагаемая система представляет собой иерархию критериев, в которую, кроме генерального критерия, включены ряд частных критериев, в том числе известных.

Состав частных критериев в каждом конкретном случае может быть различным. Наряду с критериями, рассмотренными выше, для среднеоборотных дизелей с объемным смесеобразованием предлагается применение отношения координаты центра масс топлива в струе XC_f в некоторый момент времени ее развития к радиальной координате центра масс воздуха в секторе КС, приходящемся на одну струю, XC_a [1]. Целесообразность учета XC_f/XC_a при согласовании параметров ТА, КС и заряда цилиндра следует из результатов выполненных автором расчетно-экспериментальных исследований, которые показали, что камеры, равноценные по традиционному критерию $l_c/l_{кс}$, обеспечивают существенно различные показатели рабочего процесса дизеля. В упомянутых исследованиях установлена связь между показателями рабочего процесса и отношением XC_f/XC_a.

Если к обсуждаемым здесь критериям добавить предложенный Г.М. Камфером критерий смешения $K_{см}$, определяющий потребную кинетическую энергию вращательного движения заряда цилиндра, а также упомянутый выше критерий, характеризующий массовые доли топлива, содержащегося в зоне смешения струй $\bar{m}_{см}$ и достигшего втулки цилиндра $\bar{m}_{fвт}$ [2], то пример иерархической системы может быть представлен в виде последовательности $b_i - l_c/l_{кс} - XC_f/XC_a - \bar{m}_{fсм}$, $\bar{m}_{fвт} - K_{см}$. Возможны другие комбинации критериев. При решении задачи согласования параметров ТА, КС и заряда цилиндра частные критерии целесообразно использовать в порядке убывания степени их влияния на значение генерального критерия.

Ввиду того что качество смесеобразования и сгорания, как сказано выше, зависит от большого числа факторов, при согласовании параметров дизеля приходится рассчитывать и испытывать на дизеле множество вариантов их сочетания. Предварительно отобрав варианты по частным критериям, можно существенно сократить их число для дальнейших исследований. Такое сокращение области допустимых значений варьируемых параметров позволяет уменьшить объем потребных вычислительных ресурсов и трудоемкость доводки рабочего процесса дизеля, а также повысить качество этой работы.

Основываясь на опыте выполненных исследований, можно выделить несколько десятков факторов, определяющих качество смесеобразования. Повлиять на него можно, изменяя конструктивные и регулировочные параметры ТА, КС и заряд цилиндра. В обширном списке параметров отметим основные, наиболее часто варьируемые при доводке рабочего процесса дизеля. Это — диаметр d_c и число i_c сопловых отверстий форсунки; расстояние между соплом и стенкой КС $l_{кс}$, измеренное по оси соплового отверстия при положении поршня в ВМТ; угол θ между осью соплового отверстия и плоскостью крышки цилиндра, интенсивность топливоподачи (которая, в частности, может характеризоваться средним расходом топлива через форсунку $q_{fср}$); угол начала подачи топлива форсункой $\varphi_{нпф}$ относительно ВМТ поршня; диаметр горловины КС (углубления в поршне) $d_г$; угол наклона стенки КС γ в области встречи с ней топливной струи; давление p и температура T заряда цилиндра в некоторой характерной фазе рабочего цикла; вихревое число Ω заряда цилиндра. Представленный далеко не полный перечень свидетельствует о том, сколь сложна многофакторная задача поиска рационального сочетания параметров, обеспечивающих высококачественные смесеобразование и сгорание в дизеле.

Учитывая описанные обстоятельства, можно предложить набор методов обеспечения высокого качества смесеобразования и сгорания. В зависимости от уровня научно-технической подготовки производства на конкретном предприятии, от наличия на заводе необходимых результатов физического моделирования внутрицилиндровых процессов и соответствующего математического

и программного обеспечения могут быть применены либо один из следующих методов, либо их комбинация:

1) метод физического моделирования смесеобразования;

2) метод вычислительного (многофакторного или однофакторного) эксперимента;

3) метод математической оптимизации;

4) метод натурных испытаний дизеля.

По *первому методу* выбор сочетаний согласовываемых параметров производят расчетом пространственно-временных характеристик топливовоздушной смеси в КС на основе их физического моделирования. (Необходимый комплекс методов физического моделирования описан в [1]). Выбирают те сочетания, которые обеспечивают характеристики смеси, соответствующие аналогичным характеристикам в лучших двигателях того же класса. Выбранные сочетания проверяют в испытаниях дизеля.

Второй метод состоит в выполнении расчетов показателей рабочего цикла двигателя при некоторых сочетаниях согласовываемых параметров. Расчеты выполняют с использованием моделей топливоподачи и внутрицилиндровых процессов, в частности модели, предложенной автором [1]. Рассчитываемые сочетания выбирают одним из методов математического планирования эксперимента, например методом латинских квадратов. Выбранные на основании расчетов сочетания проверяют при испытаниях дизеля. Сочетания первого и второго методов применены в ряде работ, выполненных по заказу ОАО «Коломенский завод».

Третий метод заключается в постановке и решении математической задачи оптимизации с использованием моделей топливоподачи и внутрицилиндровых процессов [12]. При этом в качестве функции цели принимают удельный индикаторный расход топлива. В роли переменных проектирования выступает набор некоторых параметров ТА, КС и заряда цилиндра из тех, которые перечислены выше, или других. В качестве переменных состояния используются показатели тепломеханической напряженности дизеля, токсичности отработавших газов, а также те или иные частные критерии качества смесеобразования.

Оптимизационная задача в общем виде может быть записана так:

$$b_i = f[\bar{X}, \bar{Y}, (\bar{X})] \to \min, \qquad (1)$$

где

$$\bar{X} \equiv d_{\text{ñ}}, i_{\text{ñ}}, l_{\text{êñ}}, d_{\text{ã}}, \text{è}, \text{ã}, q_{f\text{ñð}}, \varphi_{\text{íïô}}, p, T, \Omega \ldots; \qquad (2)$$

$$\bar{Y} \equiv p_{j\max}, p_{\max}, (d_p / d_\varphi)_{\max}, T_{\text{ï}}, e_{\text{NOx}} \ldots \qquad (3)$$

В выражении (2) указаны переменные проектирования, а в (3) — переменные состояния. Здесь: $p_{j\max}$ — максимальное давление впрыскивания топлива; $p_{\max}$ — максимальное давление рабочего цикла; $(dp/d\varphi)_{\max}$ — жесткость процесса сгорания; $T_{\text{п}}$ — характерная температура поршня, $e\text{NO}_x$ — содержание окислов азота в отработавших газах. В список переменных состояния могут быть включены рассмотренные выше частные критерии $l_{\text{ñ}}/l_{\text{êñ}}$, XC_f/XC_a, $\bar{m}_{f\text{ñì}}$, $\bar{m}_{f\text{âò}}$, $K_{\text{ñì}}$ и другие.

Введением ограничений на перечисленные переменные состояния обеспечиваются, во-первых, допустимый уровень тепломеханической напряженности дизеля и токсичности отработавших газов, во-вторых, сокращение области допустимых значений параметров проектирования, что способствует сокращению потребных вычислительных ресурсов для решения оптимизационной задачи и повышению качества оптимизации.

Таким образом даже при указанном ограниченном наборе переменных проектирования размерность оптимизационной задачи довольно значительна. Состав переменных проектирования и переменных состояния может быть пересмотрен, их число может измениться как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения. Но в последнем случае необходимо иметь в виду, что увеличение размерности задачи влечет за собой, во-первых, значительный рост требуемых вычислительных ресурсов и, во-вторых, внесение дополнительных вычислительных погрешностей, вызванных учетом малозначащих факторов.

Четвертый метод — натурные испытания в традиционном понимании представляют собой доводку рабочего процесса дизеля на стенде. Кроме того, этот метод используется в качестве завершающей стадии применения любых вышеуказанных методов и служит для проверки рекомендаций, полученных тем или иным методом.

Выводы

1. Одной из важных проблем организации рационального смесеобразования в дизельном двигателе является проблема отсутствия общепризнанного критерия его качества. Исследователями предложены весьма разнообразные критерии, которые носят частный характер. Нуждаются в совершенствовании используемые на практике методики организации рационального смесеобразования.

2. В данной работе определено понятие «высококачественное смесеобразование». Это такое перемешивание топлива с воздухом, которое обеспечивает своевременное и полное сгорание топлива при допустимых уровнях тепломеханической напряженности деталей камеры сгорания и токсичности отработавших газов.

3. С учетом накопленного опыта исследователей в формулировании частных критериев предложено сформировать систему критериев качества смесеобразования.

4. Поскольку выходным элементом системы процессов смесеобразования является процесс сгорания топлива, очевидно, что оценивать качество смесеобразования следует через качество сгорания и даже посредством некоторого показателя качества рабочего цикла.

5. Предлагаемая совокупность критериев качества смесеобразования представляет собой иерархическую систему критериев, в которой в роли генерального критерия выступает удельный индикаторный расход топлива в дизеле (или индикаторный КПД) и содержится некоторая последовательность частных критериев. В указанную последовательность входят как известные критерии, так и критерий, предложенный автором. Он представляет собой отношение координаты центра масс топлива в струе в некоторый момент времени ее развития к радиальной координате центра масс воздуха в секторе камеры сгорания, приходящемся на одну струю.

6. В порядке совершенствования методики организации высококачественного смесеобразования в дизеле на основе использования предложенной системы критериев выполнена постановка оптимизационной задачи. В соответствии с методикой в зависимости от возможностей завода-изготовителя двигателей могут быть применены либо один из следующих методов, либо их комбинация: метод физического моделирования смесеобразования; метод вычислительного эксперимента; метод математической оптимизации; метод натурных испытаний дизеля. Применение предложенной методики на практике дает возможность обоснованного выбора сочетаний параметров топливной аппаратуры и камеры сгорания, обеспечивающих высококачественные смесеобразование и сгорание в дизеле.

Литература

1. *Гаврилов В.В.* Методы повышения качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле на основе математического и физического моделирования локальных внутрицилиндровых процессов: дис. ... докт. тех. наук /Санкт-Петербургский государственный морской технический университет. — СПб., 2004. — 359 с.

2. *Марченко А.П., Сукачев И.И., Гаврилов В.В.* Методика расчета движения и распределения топлива в камере сгорания форсированных дизелей // Двигатели внутреннего сгорания. — 2005. — № 1. — С. 53–58.

3. *Гаврилов В.В.* Повышение эффективности смесеобразования в судовых среднеоборотных дизелях: Отчет (Промежут.: Анализ математических моделей и разработка принципов организации процессов смесеобразования) / Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; Руковод. работы В. В. Гаврилов; № ГР 01.200.202457; Инв. № 02.200.2 01120. СПб., 2001. — 144 с.

4. *Габитов И.И., Неговора А.В.* Топливная аппаратура автотракторных дизелей. — Уфа : БашГАУ, 2004. — 216 с.

5. *Одинцов В.И., Сапожников Э.В.* Метод определения количества окислов азота, образующихся при сгорании топлива в цилиндрах дизеля // Материалы международ. науч.-техн. конф. «Двигатели 2008». Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2008. — С. 176–181.

6. *Голев Б.Ю.* Совершенствование впускных каналов тракторного дизеля: дис. ... канд. техн. наук / Владимирский государственный университет. — Владимир, 2009. — 149 с.

7. *Хандримайлов А.А., Солодов В.Г.* Структура течения воздушного заряда в цилиндре дизеля на такте впуска и сжатия // Двигатели внутреннего сгорания. — 2006. — № 1. — С. 89–93.

8. *Никифоров С.С.* Разработка методики профилирования открытой камеры сгорания при форсировании четырехтактного быстроходного транспортного дизеля: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Южно-Уральский государственный университет. — Челябинск, 2006. — 22 с.

9. *Кулаев П.В., Рыжов В.А.* Коломенская школа конструирования топливной аппаратуры // Тяжелое машиностроение. — 2002. — № 9. — С. 28–32.

10. *Гусаков С.В.* Разработка методов совершенствования процессов смесеобразования и сгорания в поршневых двигателях: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана. — М., 2002. — 32 с.

11. *Гаврилов В.В., Мащенко В.Ю.* Исследование влияния профиля камеры сгорания на рабочий процесс дизеля с использованием программы CyberDiesel // Материалы. межотрасл. научн.-техн. конф. — СПб. : Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2010. — С. 57–59.

12. *Гаврилов В.В., Мащенко, В.Ю.* Математическое моделирование топливоподачи и локальных внутрицилиндровых процессов в дизеле с объемным смесеобразованием с использованием программы CyberDiesel // Журнал университета водных коммуникаций. — СПб., 2012. Вып. 2. — С. 92–98.

УДК 621.436

ОЦЕНКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ СУДОВЛАДЕЛЬЦЕВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ SCR-ТЕХНОЛОГИИ НА СУДАХ

Новиков Л.А., к.т.н., с.н.с.
ООО «ЦНИДИ-Экосервис»
Корчинский В.С., к.т.н., с.н.с.
ВИ (ИТ) Военной академии МТО

Выполнен анализ повышения эксплуатационных затрат судовладельцев при использовании SCR-технологии очистки отработавших газов судовых дизелей от выбросов NO_x, которая рассматривается как основное техническое решение для достижения требований стандарта IMO Tier 3. Показано, что применение SCR-технологии для снижения выбросов NO_x судовых дизелей связано с возникновением технологических и эксплуатационных рисков, последствия которых почти в два раза повышают эксплуатационные затраты судовладельцев при работе судов в зонах контроля выбросов.

Введение

Одним из основных результатов работы 65-й сессии КЗМС ИМО, состоявшейся в мае 2013 г., было принятие по инициативе Российской Федерации решения о переносе на пять лет (до 01.01.2021) введения зоны контроля выбросов (Emission Control Area for Nitrogen Oxides — NECA) и стандарта на Балтийском море. Решение было принято большинством стран членов ИМО, согласившихся с аргументами России о неготовности промышленного освоения коммерчески доступных технологий, а также неготовности инфраструктуры портов к эксплуатации судовых двигателей, соответствующих заявленным нормативам. Как показал анализ опытной эксплуатации судов с двигателями, оборудованными SCR реакторами, за прошедшие три года известные недостатки SCR-технологии, к которым относятся большие габариты, высокая стоимость, низкий ресурс работы дорогостоящих катализаторов и отсутствие технологий их утилизации, так и не были устранены.

Для России отсрочка во введении стандарта IMO Tier 3 была крайне необходимой, поскольку о проблеме промышленного освоения технологий и оборудования для предотвращения загрязнения атмосферы магистральным (не автомобильным), в том числе водным транспортом, производители отечественных судовых двигателей могли позволить себе попросту забыть почти на двадцать лет. Этому способствовала техническая политика государства (точнее полное отсутствие таковой) в области развития двигателестроения, вследствие чего национальные стандарты РФ, регулирующие ограничение выбросов в атмосферу, длительное время не пересматривались и до настоящего времени не гармонизированы с зарубежными. Как известно, в Европе и США на ближайшую перспективу (2016–2021 гг.) нормы вредных выбросов для дизелей различного назначения, по сравнению с действующим в настоящее время уровнем, будут снижены на 60–80 % [1, 2].

Введение ограничений выбросов NO_x на уровне IMO Tier 3 распространяется только на так называемые «зоны контроля выбросов» (ECA — Emission Control Areas). В этих зонах уже введены ограничения на выбросы SO_2 (за счет снижения содержания серы в топливе до уровня <1000 ppm с 01.01.2015), а также планируется ограничить выбросы частиц (PM). Применение тяжелого топлива с высоким содержанием серы допускается только при наличии системы очистки газов от SO_2 или использовании двух видов топлива: малосернистого — в зонах ECA и тяжелого — за пределами этой зоны.

В соответствии с требованиями стандарта IMO Tier 3 норма выбросов NO_x для судовых дизелей в зависимости от номинальной частоты вращения устанавливается на уровне 3,40–1,97 г/кВт·ч. Агентством по охране окружающей среды США (EPA Marine Tier 4) для судов прибрежного плавания в 2015 г. установлена норма выбросов NO_x = 1,8 г/кВт·ч, что очень близко к нормативу IMO Tier 3, при этом содержание частиц (PM) в отработавших газах не должно превышать 0,04 г/кВт·ч. Наиболее жесткие нормы на выбросы NO_x и частиц установлены в США нормативом EPA Stationary Tier 4 с 2011 г. для промышленных дизель-генераторов, что составляют по NO_x = 0,67 г/кВт·ч, и по частицам (PM) = 0,03 г/кВт·ч.

Приведенные данные лишний раз подтверждают стремление развитых стран к реализации ранее обозначенной стратегии радикального снижения уровня экологических показателей поршневых двигателей и постепенного сведения

их «практически к нулевым выбросам», что, в конечном итоге, приведет к значительному повышению стоимости их полного жизненного цикла, включая производство, обслуживание и утилизацию. В отношении двигателей для водного транспорта, который характеризуется наименьшим вкладом в глобальное загрязнение атмосферы, эта стратегия принята природоохранными ведомствами стран Европы и США и сформулирована ими же в качестве одного из основных общественных вызовов, по-видимому, только для того, чтобы создать экономически оправданную конкурентную среду для развития дорогостоящих альтернативных источников энергии, например топливных элементов или накопителей электрической энергии (аккумуляторов и суперконденсаторов).

Риски применения SCR технологии на судах

В соответствии с регламентом работы Комитета по предотвращению загрязнения морской среды (КЗМС) ИМО решение о сроках введения стандарта IMO Tier 3 в зонах NECA может быть принято при выполнении трех обязательных условий:

➢ наличия репрезентативных данных о доминирующем (или, по меньшей мере, значительном) вкладе выбросов от судового трафика в общее загрязнение атмосферы;

➢ наличия промышленно освоенных и коммерчески доступных технологий, обеспечивающих выполнение заявленных технических нормативов выбросов;

➢ отсутствия при использовании промышленно освоенных и коммерчески доступных технологий образования токсичных отходов, требующих утилизации.

В обеспечение первого условия рабочая группа Балтийской комиссии по предотвращению загрязнения морской среды Хельсинского Комитета (HELCOM) в феврале 2011 г. подготовила и распространила от имени Балтийских государств предложение о придании статуса NECA Балтийскому морю [3], оценив долю выбросов NO_x от судового трафика в Балтийском море явно завышенной величиной в 10 %. Все предыдущие экспертные оценки выбросов с судов оценивались величиной, не превышающей 5 %, и только в локальных зонах интенсивного судоходства (порты, проливы) [4]. Затем был опубликован прогноз международной каталитической ассоциации IACCSEA (International Association for the Catalytic Control of Ship Emissions to Air) из Великобритании [5], утверждающий, что к 2020 г. вклад судоходства в загрязнение атмосферы в прибрежных мегаполисах Северного и Балтийского морей превысит выбросы от автотранспорта и составит величину порядка 30 %. Начиная с 2012 г. Агентство по охране окружающей среды Евросоюза (EEA) упоминает водный транспорт в Европе как один из источников «серьезной экологической угрозы» региону Балтийского моря. Именно эта негативная терминология все более настойчиво навязывается общественному мнению чиновниками ЕЕА в отношении коммерческого судоходства, что носит очевидные признаки тенденциозного отношения к проблемам судоходства, и скорее всего ситуация обостряется для стимулирования коммерческих проектов под флагом охраны окружающей среды.

Научно-техническим и технологическим обеспечением второго условия для объявления зоны NECA в Балтийском и Северном морях можно считать результаты комплекса НИР по созданию судовых дизелей со сверхнизкими значениями вредных выбросов с кодовым названием HERKULES [6], который был инициирован и финансировался Евросоюзом и завершен в 2015 г. Результатами исследований, выполненных в рамках проекта HERCULES, а также других независимых исследований [7, 8] было показано, что возможности имеющихся технологий для управления кинетикой образования вредных веществ при горении жидкого топлива в цилиндре дизеля недостаточны для достижения требований стандартов IMO Tier 3, EPA Marine Tier 4 и тем более EPA Stationary Tier 4. Выполнение этих требований принципиально возможно только за счет установки внешних систем очистки газов, прежде всего технологии селективного восстановления NO_x аммиаком (Selective Catalist Redustion — SCR)

При переходе к испытаниям технологии SCR на судах она оказалась дорогостоящей и недостаточно эффективной и, кроме прочего, требующей развития соответствующей инфраструктуры, необходимой для поддержания ее функционирования. Именно отсутствие инфраструктурной готовности для поддержания технологии SCR в части заправки судов мочевиной, сбора и утилизации отработавших ресурс катализаторов, содержащих тяжелые металлы и токсичные компоненты, стало одной из причин для переноса сроков объявления Балтийского и Северного морей зоной NECA.

Однако эксперты Европейского объединения компаний двигателестроения EUROMOT [9] и международной каталитической ассоциации IACCSEA [5] продолжают упорно и не всегда обоснованно настаивать на том, что наиболее готовой технологией для промышленного освоения в целях обеспечения требований стандарта IMO Tier 3 (гарантированно обеспечивающей снижение выбросов NO_x на 80 %) является технология селективного каталитического восстановления NO_x аммиаком, выделяющемся при

термическом разложении водного раствора мочевины (SCR-процесс). Процесс восстановления может осуществляться в присутствии различных катализаторов на основе металлов второй группы, однако оптимальному соотношению по критерию цена–качество в наибольшей степени соответствует рецептура титан-ванадиевых катализаторов.

До принятия в 2000 г. первой редакции Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78 эта технология на судах практически не применялась в силу присущей ей ряда серьезных недостатков, трудно сочетаемых с условиями на судах. Подробно недостатки SCR-процесса рассмотрены в работе [4], здесь же ограничимся их простым перечислением:

➢ большие габариты и вес реакторов, сопоставимые с габаритами двигателя вследствие низких скоростей процесса каталитического восстановления окислов до элементарного азота;

➢ неполное соответствие «температурного окна» реакции с температурой отработавших газов судового дизеля, в особенности на режимах работы с малой нагрузкой, что заметно снижает эффективность процесса, вплоть до его прекращения;

➢ опасность появления в выпускной системе дизеля не вступившего в реакцию газообразного аммиака, не менее токсичного чем NO_x, из-за работы двигателей на режимах с низкой и переменной нагрузкой и с учетом тепловой инерции катализаторов;

➢ необходимость хранения запаса восстанавливающего реагента (32,5 % водного раствора мочевины специального качества) в количестве не менее 20 % от запаса топлива;

➢ высокие эксплуатационные риски необратимой дезактивации и необходимость преждевременной замены дорогостоящего катализатора вследствие низкого качества топлива или при авариях в топливной системе или в системе наддува;

➢ дополнительное выделение углекислого газа (суммарно до 3 %) из-за дополнительного расхода топлива вследствие повышения противодавления выпуску, а также в процессе гидролиза водного расхода мочевины.

В настоящее время в дизельных установках в качестве источника аммиака используется водный раствор мочевины, известный в Европе под торговой маркой AdBlue, а в США его обычно называют жидкостью для очистки отработавших газов дизелей (DEF — Diesel Exhaust Fluid).

Стандартная конфигурация среднеоборотного главного судового двигателя с SCR-реактором, предложенная фирмой «MAN Diesel & Turbo», приведена на рис. 1.

Как показал опыт эксплуатации реакторов SCR на судах — наибольшую сложность представляет

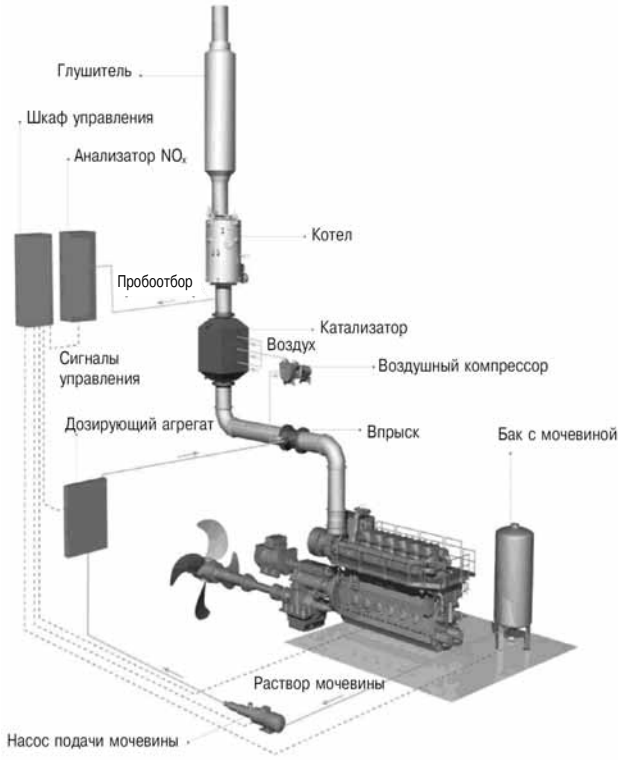


Рис. 1. Стандартная конфигурация среднеоборотного судового дизеля с SCR-реактором

согласование работы всех компонентов системы очистки газов, состоящей из двигателя, работающего с переменным составом и расходом газов, агрегата подачи мочевины в стехиометрическом соотношении с переменным массовым выбросом NO_x и контроля температурного режима реактора SCR. Это возможно только при наличии устройства интеллектуального управления подачей мочевины, встраиваемого в систему управления двигателя.

По данным ассоциации IACCSEA, к 2014 г., после вступления в силу норматива IMO Tier 2, в мире более пятисот судов с главными и вспомогательными двигателями различных производителей были оборудованы установками очистки газов с SCR-реакторами. Однако после контрольных проверок при первоначальных ходовых испытаниях в дальнейшем систематического наблюдения за эффективностью этих систем в условиях эксплуатации в течение многих лет не проводилось. При освидетельствованиях единственным критерием нормального функционирования системы был принят критерий соответствия расхода мочевины его расчетному значению. При этом официальная статистика по отказам, нарушениям функционирования, снижению эксплуатационной эффективности и ресурсу работы катализаторов полностью отсутствует.

В стандартной конфигурации системы предусмотрена периодическая очистка катализаторов, загрязненных сажей и аэрозолями, методом обдува сжатым воздухом от компрессора, который также используется для распыливания водного раствора мочевины. Однако эффективность этого метода защиты катализаторов вызывает обоснованные сомнения, поскольку обдув эффективен только в случае загрязнения катализаторов сухой сажей. Скорее всего, разработчиками обозначено таким образом понимание необходимости защиты катализаторов от загрязнения в условиях эксплуатации.

Результаты испытаний SCR-реактора на борту судна, полученные специалистами японских компаний «IHI Corporation» и «Diesel United Ltd.» [10], вносят некоторый диссонанс в общий одобрительный хор положительных отзывов об идеальной совместимости SCR-технологии с дизелями для достижения требований стандарта IMO Tier 3.

Было показано, что при возрастании концентрации сажи и аэрозолей в выпускном коллекторе дизеля примерно до 90 мг/м^3 (FSN = 2,2), что может быть вызвано загрязнением проточной части турбокомпрессора или возникновением не критичных неисправностей в работе форсунок, в несколько раз снижается ресурс работы катализаторов. Анализ отложений на поверхности показал, что сажа за несколько десятков часов покрывает активную поверхность катализатора блокирующим слоем толщиной приблизительно 100 μm, что вызывает процесс его необратимой дезактивации.

При оценке экономической эффективности применения технологии SCR на судах важнейшим показателем является ресурс работы катализаторов вследствие их высокой стоимости. При этом ресурс катализатора, пожалуй, — самый трудно прогнозируемый параметр системы. Различные производители катализаторов и оборудования для очистки газов от NO_x, работающего по SCR-процессу, декларируют ресурс работы катализаторов от 12 тыс. моторных часов. При этом ни один из производителей четко не формулирует браковочные критерии, по которым объективно можно дать заключение о том, что ресурс катализатора полностью выработан, и он подлежит замене. Работоспособность катализатора оценивается по его активности, устойчивости к отравляющему действию каталитических ядов, устойчивостью к загрязнению сажей и механической прочностью структуры носителя. С точки зрения необходимости обеспечения судовыми дизелями требований стандарта IMO Tier 3, изменение каждого из перечисленных критериев приводит к снижению эффективности катализатора в SCR-процессе.

В общем случае в процессах катализа под ресурсом понимается время работы катализатора до снижении его активности (эффективности) на 30 % по отношению к первоначальному уровню активности. При совместной работе установленного дизеля с SCR-реактором ресурсом работы катализаторов следует считать время, в течение которого выбросы NO_x, измеренные за реактором, продолжают соответствовать требованиям IMO Tier 3. Как показали результаты уже выполненных исследований, в большинстве случаев выбросы NO_x выходят за пределы нормы IMO Tier 3 после того, как эффективность SCR-процесса снижается до 70 %, то есть на 15–20 % по отношению к первоначальному уровню.

Приемлемым ресурсом для титан-ванадиевых каталитических блоков считается ресурс порядка 10–12 тыс. мото-часов, что примерно соответствует двухгодичной наработке главного судового двигателя. Названный ресурс обеспечивается при работе дизеля на малосернистых топливах (с содержанием серы не более 1000 ppm) и дымности отработавших газов не более 1,0 FSN (C ≈ ≈ 30 мг/м^3).

Результаты выполненных в ЦНИДИ ресурсных испытаний титан-ванадиевых катализаторов, изготовленных по патенту РФ № 2061543, при имитации различных эксплуатационных рисков, приведены на рис. 2.

Как уже упоминалось, к наиболее характерным эксплуатационным рискам относятся возможные некритичные неисправности в системах дизеля

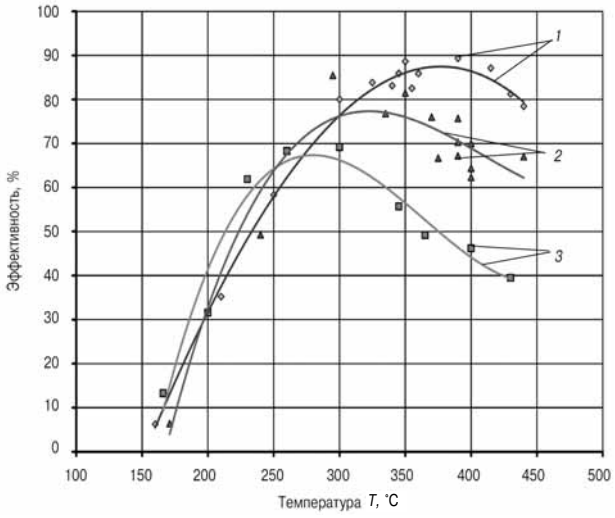


Рис. 2. Снижение эффективности титан-ванадиевого катализатора во времени при различных эксплуатационных рисках:

1 — базовая характеристика; *2* — наработка 300 часов (FSN = 1,8); *3* — наработка 390 часов (содержание серы в топливе 0,5 %); условия эксперимента: $V = 10 \cdot 10^3$ 1/ч; $NO/NH_3 = 1,0$

и ошибки, связанные с человеческим фактором, например «залили не то топливо». Здесь следует пояснить, что в случае эксплуатации судна, оснащенного SCR-реактором за пределами зоны ECA, существует высокая степень вероятности бункеровки судна топливом с высоким содержанием серы, что вызывает риск быстрого химического «отравления» катализаторов.

Результаты ресурсных испытаний показали, что достаточно даже одного фактора эксплуатационного риска («залили не то топливо»), чтобы его последствия привели к необратимой потере активности катализатора и сокращению его ресурса по отношению к заявленному до 400 часов. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что в условиях эксплуатации необходимо выполнять инструментальный контроль эффективности SCR-процесса с периодичностью не более 500 часов.

Оценка дополнительных затрат судовладельцев при эксплуатации судового дизеля с SCR-реактором

При создании судового дизеля, соответствующего требованиям перспективных стандартов, прежде всего необходимо учитывать его конкурентоспособность по показателям первоначальной стоимости и эксплуатационным затратам на протяжении полного жизненного цикла, включая затраты на поддержание в рабочем состоянии системы очистки газов. Несколько странным выглядит то обстоятельство, что при наличии достаточно агрессивной рекламы SCR-процесса данные о дополнительных затратах судовладельцев по результатам опытной эксплуатации оборудования на судах не публикуются.

В то же время имеются некоторые данные таких оценок, выполненных по различным методикам поставщиками и потребителями оборудования, что позволяет ориентировочно оценить дополнительные затраты судовладельцев при совместной работе судового дизеля с системой очистки газов, работающей по SCR-процессу. Такая оценка стала возможной благодаря имеющемуся опыту тестовой эксплуатации SCR-технологии в судовых условиях, хотя результаты этих оценок, особенно в части эксплуатационных затрат, отличаются в несколько раз.

Поскольку в РФ системные исследования экономических последствий введения зон контроля выбросов ECA и стандарта IMO Tier 3 не проводились и не предвидятся, информация, приведенная в этой работе, основана главным образом на результатах исследования, выполненного рабочей группой HELCOM при участии университета Турку (University of Turku) и Центра Морских Исследований (Centre of Maritime Studies) [3].

Инвестиционные затраты

Оценки инвестиционных (капитальных) затрат, выполненные рабочей группой HELCOM, достаточно конкретны, поскольку они основаны на некоторой обобщенной рыночной стоимости производства и реализации оборудования для очистки газов, работающего по технологии SCR, сложившейся в регионе.

Производители двигателей выполнили независимую оценку инвестиционных затрат на установку двигателя с SCR-реактором на судне как единого энергетического агрегата, соответствующего требованиям стандарта IMO Tier 3. Помимо стоимости оборудования, в инвестиции включены дополнительные затраты на обеспечение совместной работы двигателя и SCR-реактора, которые составляют стоимость интеграции системы очистки газов в систему управления двигателем (блок управления, программное обеспечение, исполнительные устройства, соединительные силовые и управляющие кабели). Результаты оценки дополнительных инвестиционных затрат приведены в табл. 1.

Следует отметить, что оценка стоимости оборудования, работающего по SCR-процессу, выполнена производителями двигателей для главных среднеоборотных двигателей мощностью более 4500 кВт. При этом в анализе вообще отсутствует упоминание о затратах, относящихся к вспомогательным двигателям мощностью более 130 кВт, которые также должны быть оборудованы системами SCR. Поскольку установленная мощность вспомогательных судовых дизелей для некоторых типов судов достигает 20 % от мощности главных, то было бы логично дополнить данными о дополнительных инвестициях, относящихся к установке SCR-реакторов на высокооборотные вспомогательные судовые двигатели.

Таблица 1

Инвестиционные затраты на установку двигателя с SCR-реактором на судне

Тип и диапазон мощности двигателя		Удельные инвестиционные затраты, EUR/кВт	
Тип двигателя (вид топлива)	**Диапазон мощности двигателя, кВт**	**Оценка затрат HELCOM**	**Оценка затрат производителями двигателей**
Среднеоборотный (дистиллят с содержанием серы <1 %)	4500–18 000	32–64	29–70
Малооборотный (дистиллят с содержанием серы <1 %)	8500–48 000	36–59	36–59
Курс обмена валюты: 1 EUR = 1,2894 $ (среднее значение на август 2010 г.)			

Так, например, при средней цене в Европе установленной мощности главного судового дизеля, равной ≈ 300 EUR/кВт, полная стоимость судового дизеля мощностью 10 МВт составит около 3 млн EUR.

Из приведенных данных следует, что в этом наиболее востребованном мощностном диапазоне размер удельных инвестиций на установку SCR-реактора в 2010 г. планировался на уровне 60 EUR/кВт или 600 000 EUR за агрегат. Действительная рыночная стоимость SCR-реактора для двигателя мощностью 10 МВт в 2014 г. составляла 1 000 000 EUR, то есть к планируемой дате введения стандарта IMO Tier 3 выросла на 40 %. Таким образом, стоимость судового двигателя, соответствие которого требованиям стандарта IMO Tier 3 обеспечивается за счет применения технологии SCR, возрастет не менее чем на 30–35 %.

Эксплуатационные затраты

Оценка эксплуатационных затрат выполнена с учетом опыта эксплуатации SCR-технологии в судовых условиях, хотя некоторые позиции этих оценок существенно расходятся с данными, выполненными при проведении настоящего исследования (табл. 2).

Приведенные в табл. 2 данные HELCOM и производителями двигателей расходятся в несколько раз, поэтому для выполнения экономических прогнозов и ведения официальных дискуссий с оппонентами они должны быть подвергнуты критическому анализу с нижеследующими комментариями.

При оценке эксплуатационных затрат, выполненной Канадой и США (MEPC 59/6/5), приняты во внимание только затраты на расход восстанавливающего реагента, равные 7,5 % от расхода топлива.

Оценка эксплуатационных затрат, выполненная HELCOM, кроме расходов на восстанавливающий реагент, а также расходов на осмотр и очистку катализаторов, выполняемых вручную, декларирует необходимость замены катализаторов каждые пять лет с указанием того, что эти затраты составят 60 % от первоначальной стоимости оборудования. Общие затраты на замену катализатора определены достаточно корректно, однако суммарные удельные эксплуатационные расходы, составляющие 2,55 EUR/МВт·ч, оказались более чем в два раза меньше, чем расходы на раствор мочевины (4–6 EUR/МВт·ч) по оценке производителей двигателей. По этой причине выполненная HELCOM оценка затрат может считаться существенно заниженной.

Наиболее корректная оценка ожидаемых эксплуатационных затрат выполнена производителями

Таблица 2

Дополнительные затраты на эксплуатацию двигателя с SCR-реактором

Статьи затрат при использовании технологии SCR на судне	Удельные эксплуатационные затраты по оценке различных источников		
	Оценка затрат Канадой и США (MEPC 59/6/5)	Оценка затрат HELCOM	Оценка производителей двигателей
Стоимость мочевины	EUR 1,18 за галлон (32,5 % раствор мочевины)	EUR 170 за тонну мочевины	EUR 150 за тонну мочевины, доставленной на судно в Стокгольме (Fred Holmberg & Co)
Расход мочевины в % от удельного расхода топлива	7,5 % от удельного расхода топлива	Не определялось	10 % от удельного расхода топлива (4–6 EUR/МВт·ч)
Ожидаемый полный срок службы оборудования	Не определялось	12,5 лет	15–25 лет
Срок до капитального ремонта оборудования SCR (замена катализаторов)	Не определялось	Каждые 5 лет при содержании серы в топливе <1 %	Каждые 5 лет при содержании серы в топливе <1 %
Стоимость капитального ремонта оборудования SCR (замена катализаторов)	Не определялось	Ориентировочно 60 % от основной стоимости оборудования SCR	Ориентировочно (0,35–0,75 EUR/МВт·ч)
Периодичность очистки катализаторов системы SCR	Не определялось	6 раз в каждые 1000 часов эксплуатации (один раз через каждые 155 часов)	Автоматическая очистка катализатора от сажи продувкой воздухом (приблизительно 1 раз в час). Визуальный контроль 1 раз в год
Затраты на очистку катализаторов системы SCR	Не определялось	4-6 чел.·час в год (150 EUR/1000 час)	1 чел.·день в год (сжатый воздух и энергозатраты на автоматическую очистку от сажы продувкой)
Средние эксплуатационные расходы	Не определялись	Среднее значение (2,55 EUR/МВт·ч)	Среднее значение (5,0–7,5 EUR/МВт·ч)

двигателей, уже имеющих некоторый опыт интегрирования судового дизеля с системой SCR в единый силовой агрегат.

Стоимость водного раствора мочевины по предварительным оценкам производителями двигателей составляет наибольшую статью затрат в общих эксплуатационных расходах (до 60 %), однако это справедливо только при условии ресурса работы катализаторов не менее 5 лет). Вместе с тем рыночная стоимость этого продукта подвержена значительным колебаниям (рис. 3).

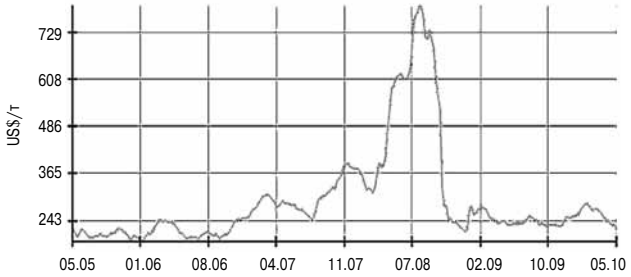


Рис. 3. Изменение стоимости химически чистой (нерастворенной) мочевины

Резкий рост рыночной цены химически чистой нерастворенной мочевины, которая используется для приготовления восстанавливающего реагента торговых марок AdBlue (32,5 % водный раствор мочевины) или DEF (Diesel Exhaust Fluid), не случайно пришелся на 2008 г., предшествующий введению новых нормативов выбросов вредных веществ для двигателей автомобильной и внедорожной техники. В настоящее время рыночная цена AdBlue стабилизировалась на уровне 270 EUR/т, то есть почти в два раза выше, чем указано в табл. 2, при этом нет никаких гарантий, что накануне введения стандарта IMO Tier 3 не возникнет очередного повышения рыночной цены на мочевину.

Ожидаемый полный срок службы оборудования SCR, определенный HELCOM периодом 12,5 лет, оказался вдвое меньше полного срока службы судна, который в Европе обычно составляет около 25 лет. При этом трудно предположить, какие экономические стимулы могут заставить судовладельца заменить или модернизировать оборудование SCR и интегрировать его в единый силовой агрегат с двигателем старой постройки.

Однако как уже было показано, самым проблемным и дискуссионным вопросом является оценка ресурса и срока службы катализатора. В настоящее время производители декларируют ресурс работы катализаторов, превышающий 12 тыс. часов, только при условии безаварийной работы дизеля на малосернистом топливе. При этом во внимание не принимаются различные технологические и эксплуатационные риски, возникающие при работе дизеля совместно с SCR-реактором, которые, как показали результаты выполненного исследования, необратимо снижают активность катализатора и сокращают ресурс его работы в несколько раз.

В разделе, посвященном исследованию эксплуатационной эффективности SCR-процесса, было показано, что главный судовой (двухтактный или четырехтактный) дизель с SCR-реактором обеспечивает требования стандарта IMO Tier 3 по выбросам NO_x при двух условиях:

➢ дизель без системы очистки газов должен соответствовать требованиям стандарта IMO Tier 2;

➢ эффективность процесса очистки газов в поле совместных режимов работы двигателя и SCR-реактора должна быть не ниже 80 %.

Предельная эксплуатационная эффективность SCR-процесса превышает 80 % в достаточно ограниченном диапазоне температуры отработавших газов (от 330 до 420 °С), поэтому даже незначительного снижения первоначальной эффективности катализатора (всего на 15 %) будет достаточно, чтобы выбросы NO_x превысили норму.

В условиях безаварийной работы судового дизеля на малосернистом топливе (что в эксплуатации бывает крайне редко), при годовой наработке главных судовых дизелей в 6000 часов, ожидаемый ресурс работы катализаторов, по нашим данным, составит не более двух лет, вместо пяти, указанных в табл. 2. Здесь необходимо еще раз подчеркнуть, что под ресурсом работы катализатора следует считать время, в течение которого выбросы NO_x, измеренные за реактором, продолжают соответствовать требованиям IMO Tier 3. Катализатор при этом продолжает сохранять свою работоспособность, но при снижении его эффективности (например до 70 %) соответствие двигателя требованиям стандарта IMO Tier 3 уже не обеспечивается.

Таким образом, ресурс работы катализаторов, по нашему мнению, значительно завышен, а удельные затраты на замену катализатора соответственно занижены в 2,5 раза. Удельные затраты на замену катализатора с учетом уточненного определения ресурса, составят ориентировочно (0,85–1,75 EUR/МВт·ч). Именно при этих скорректированных значениях удельных затрат на замену катализатора результирующая средняя величина эксплуатационных затрат составит указанные в таблице значения (5,0–7,5 EUR/МВт·ч).

В табл. 2 отсутствуют данные по стоимости приема на утилизацию отработавших ресурс катализаторов. Стоимость сбора и утилизации катализаторов пока не определена из-за неизвест-

ных объемов предстоящей переработки старых катализаторов, которые относятся к классу токсичных отходов. Пока SCR-реакторов, находящихся в опытной эксплуатации, достаточно мало, производители принимают отработавшие ресурс катализаторы на утилизацию бесплатно, поскольку их объемы невелики, а стоимость переработки скорее всего включена в цену катализатора при продаже. Однако с ростом объемов переработки отходов этот процесс, скорее всего, будет платным и достаточно дорогим.

В соответствии с данными оценок, выполненных изготовителями двигателей, дополнительные эксплуатационные затраты, возникающие у судовладельца при установке на борту судна главного дизеля мощностью 10 МВт с SCR-реактором, за каждый год работы ориентировочно составят:

$$6{,}5\ [\text{EUR/МВт·ч}] \cdot 10\ [\text{МВт}] \cdot 6000\ [\text{ч}] = 390\ 000\ \text{EUR}.$$

Для оценки общих дополнительных затрат к этой сумме необходимо добавить амортизацию от вложенных инвестиций (1 000 000 EUR), что при нормативном сроке окупаемости оборудования, равном 10 лет, составит еще 100 000 EUR, то есть общие дополнительные годовые затраты составят 490 000 EUR.

Наиболее наглядна для судовладельцев сравнительная оценка затрат, выполненная для случая работы условного судна с мощностью главного двигателя 10 МВт в зоне ECA (например, Балтийское море) и вне зоны ECA (например, Черное море). Указанная оценка выполнена с коррекцией изменения действующих цен на топливо и реагенты, необходимые для работы системы SCR, при следующих исходных данных (табл. 3).

Таблица 3

Исходные данные для расчета годовых затрат при эксплуатации судна с главным двигателем мощностью 10 МВт в зоне ECA

Наименование показателей	Значение
Цена тяжелого топлива HFO, EUR/т	320
Цена малосернистого топлива MGO ($S = 0{,}1$ %), EUR/т	440
Цена реагента AdBlue (32,5% мочевины), EUR/т	270
Годовая наработка главного двигателя, ч	6000
Мощность главного двигателя, МВт	10,0
Расход топлива главным двигателем, т/год	5400
Расход реагента AdBlue (10 % от расхода топлива), т/год	540
Инвестиции на установку SCR на судне, EUR	1 000 000
Стоимость катализаторов на замену, EUR	600 000

Таблица 4

Сравнение годовых затрат при эксплуатации судна с главным двигателем мощностью 10 МВт в зоне ECA и за ее пределами

Наименование статей затрат (в расчете на один год)	Значение затрат, EUR/год	
	в зоне ECA (Балтийское море)	вне зоны ECA (Черное море)
Расходы на топливо HFO (S = 0,5 %)	—	1 728 000
Расходы на топливо MGO ($S \le 0{,}1$ %)	2 376 000	—
Расходы на реагент AdBlue (32,5 % мочевины)	145 800	—
Амортизация инвестиций на установку SCR на судне (при сроке окупаемости 10 лет)	100 000	—
Амортизация стоимости катализаторов (при сохранении эффективности более 80% в течение 2 лет)	300 000	—
Годовые затраты всего	**2 921 800**	**1 728 000**

Результаты расчетов в форме, удобной для сравнения при работе судна в зоне ECA (Балтийское море) и вне зоны ECA (Черное море) приведены в табл. 4. Расчеты выполнены при допущении, что расход топлива и годовая наработка главным двигателем в сравниваемых вариантах примерно одинаковы.

Результаты расчета показали, что в структуре годовых затрат при использовании технологии SCR доминирует статья, предусматривающая перевод двигателя на малосернистое топливо (40 % в общих затратах). Это, как показали результаты исследования, вынужденная мера, которая не столько обеспечивает приемлемый ресурс работы катализаторов, сколько определяет саму возможность использования технологии SCR на судах.

Вопреки всеобщему мнению основу эксплуатационных расходов составляют вовсе не затраты на восстанавливающий реагент (12 % в общих затратах), а расходы на амортизацию (отчисление средств) для приобретения катализаторов на замену отработавших ресурс (25% в общих затратах).

Следует отметить, что суммарные годовые эксплуатационные затраты по оценке производителей двигателей (без учета затрат на малосернистое топливо) составили 490 000 EUR, что достаточно близко к результатам приведенного выше расчета (545 800 EUR). Исходя из этого, можно предположить, что общие удельные эксплуатационные затраты (5,0–7,5 EUR/МВт·ч) определены достаточно корректно, в то время как статья затрат на замену катализатора (случайно или намеренно) в значительной мере занижена.

При всей условности и простоте выполненного экономического анализа, а именно эта задача ставилась для выявления наиболее существенных статей затрат применения технологии SCR на судах, совершенно очевидно, что введение зон ECA в отдельных морях или портах ставит судовладельцев в несопоставимые конкурентные условия. При этом инициаторам выбранной технической политики и природоохранной стратегии предстоит осознать экономические последствия для коммерческого судоходства в морях и портах, где уже введены зоны ECA.

Заключение

Современные требования к радикальному сокращению уровня выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей позволяют определить приоритетные потребительские свойства перспективного судового дизеля. Это дизель, который имеет приемлемый эффективный КПД (не менее 48 %) и низкий уровень выбросов, прежде всего окислов азота и частиц, соответствующий требованиям перспективных экологических стандартов, таких как IMO Tier 3 и EPA Marine Tier 4. Эти приоритетные потребительские свойства определяют конфигурацию перспективного судового двигателя, которая усложняется пропорционально снижению уровня вредных выбросов, что значительно повышает стоимость его эксплуатации.

Современный уровень развития технологий управления кинетикой горения топлива и образования вредных веществ в цилиндре дизеля (то есть воздействия на внутрицилиндровые процессы), при всем энтузиазме их сторонников, недостаточен для обеспечения требований перспективных экологических стандартов, прежде всего выбросов NO_x и частиц, поэтому наличие системы очистки газов в конфигурации перспективного двигателя неизбежно.

При выполнении настоящего исследования ставилась задача дать оценку экологическим, техническим и экономическим последствиям придания статуса NECA Балтийскому морю. Оценка дополнительных затрат судовладельцев показала, что они достаточно высоки и решающим образом могут повлиять на экономику коммерческого судоходства.

Для адаптации технологии и оборудования, работающего по SCR-процессу в судовых условиях, необходимо продолжить научные исследования по совершенствованию этой технологии в следующих направлениях:

- совершенствование рецептуры и химического состава катализаторов для повышения их ресурса и стойкости к химическому отравлению продуктами горения серы и других каталитических ядов;
- разработка и внедрение эффективных средств защиты катализаторов от загрязнения сажей и аэрозолями топлива и смазочного масла, а также средств их эффективной регенерации в условиях эксплуатации;
- разработка технологии регенерации катализаторов, отработавших ресурс;
- расширение температурного окна реакции восстановления NO_x в область температуры отработавших газов, меньшей 300 °C, для обеспечения эффективной работы реактора на режимах малых нагрузок двигателя.

Литература

1. Revised MARPOL 73/78 ANNEX VI. Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ships. Resolution MEPC 176(58). IMO, London, October 10, year 2008.
2.. DIRECTIVE 91/68/EC of the European Parliament and of the Council. Regulations for the Emission of gaseous and particulate pollutants from internal combustion engines to be installed in non-road mobile machinery. Official journal of the European Union. L 146 of 30 April 2004.
3. HELCOM 32/2011. Proposal to designate the Baltic Sea as an Emission Control Area for Nitrogen Oxides. Report of the NECA correspondence group, Document 4/4, Helsinki, Finland, March 2011, 88 p.
4. *Новиков Л.А.* Ограничение выбросов NO_x на уровне IMO Tier 3 для судовых дизелей отложено до 2021 года // Двигателестроение. — 2013. — № 2 (252). — С. 26–32.
5. *J. Briggs, J. Mc'Carney* (IACCSEA, UK). "Field experience of Marine SCR". CIMAC Congress 2013, Shanghai, China, Paper Nr. 220, 7 p.
6. *N. Kyrtatos*, *L. Hellberg*, *C. Poensgen*. Ten Years After: Results from the Major Program HERCULES A-B-C on Marine Engine R&D. CIMAC Congress 2013, Shanghai, China, Paper Nr. 18, 8 p.
7. Технологии снижения вредных выбросов дизелей. Состояние и перспективы развития (обзор материалов конгресса CIMAC 2010) // Двигателестроение. — 2011. — № 4 (246). — С. 48–56.
8. *G. Tinschmann, D. Thum and others.* Sailing towards IMO Tier III - Exhaust Aftertreatment versus Engine-Internal Technologies for Medium Speed Diesel Engines. MAN Diesel & Turbo SE, Germany. CIMAC Congress 2010, Bergen, Norway, Paper Nr. 274, 9 p.
9. Here Comes IMO Tier 3. Interview EUROMOT "Diesel & Gas Turbine Worldwide", July-August, 2014, p. 46–50.
10. *Y. Izumi, H. Ohara*, *M. Irie, K. Moriyama*. Urea-SCR system for pollution control in marine diesel engines. CIMAC Congress 2013, Shanghai, China, Paper Nr. 172, 7 p.

УДК 621.43

РАЗВИТИЕ МОДЕЛЬНОГО РЯДА ДВИГАТЕЛЕЙ ПАО «ЗВЕЗДА» И ООО УДМЗ (материалы конгресса CIMAC 2016)

В материалах, представленных на 28 Конгрессе CIMAC, проходившем в июне с. г. в Хельсинки, значительное место было отведено вопросам создания новых двигателей в свете текущей экономической ситуации и современного состояния экологического законодательства в мире. Впервые на секции 1.1 «Создание дизельных двигателей — Высокооборотные двигатели», было представлено два доклада специалистов из России ПАО «Звезда» (Санкт-Петербург) и ООО УДМЗ (Екатеринбург) совместно с западными консультантами.

Обе работы выполнены в рамках Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база», частью которой является подпрограмма «Создание и организация производства в Российской Федерации на 2011–2015 гг. дизельных двигателей и их компонентов нового поколения». Реализация программы завершена созданием двух семейств многоцелевых дизелей, по своим показателям соответствующих лучшим мировым образцам. Созданные опытные образцы двигателей предназначены для применения в стационарной энергетике, судостроении, на транспорте (тепловозы, большегрузные самосвалы) и т. п.

В этом выпуске публикуются полные тексты докладов российских специалистов.

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

НОВОЕ СЕМЕЙСТВО УНИВЕРСАЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ «ПУЛЬСАР-150» ЗАВОДА «ЗВЕЗДА»

Wolfgang Kling, AVL List GmbH
С. Хильченко, А.Архипов, ПАО «Звезда», Россия
Attila Toth, Christian Fuchs, Michael Ronchetti, AVL List GmbH, Австрия

Реферат

Одним из наиболее заметных достижений в области создания мощных двигателей в России явилась последняя разработка ПАО «Звезда» — семейство дизелей «Пульсар». Это — новая платформа, которая призвана удовлетворить потребности страны в транспортных и промышленных двигателях, а в дальнейшем – стать основой для экспортных поставок предприятия.

Техническое задание на разработку нового семейства универсальных двигателей для судов, тепловозов, большегрузных (карьерных) самосвалов и стационарных электростанций, предусматривало необходимость соответствия требованиям национальных и международных стандартов по ограничению предельно допустимых выбросов вредных веществ, в частности, IMO Tier 3, US EPA Tier 4 interim, а также обеспечить возможность адаптации к новым видам топлива, которые могут появиться в будущем.

Особое внимание было уделено тщательному выбору основных геометрических параметров ряда, в результате чего был создан двигатель с рабочим объемом цилиндра 3,1 л, отличающийся модульным принципом построения и возможностью адаптации для различных применений. Новое семейство двигателей «Пульсар» отличают выбор цилиндровой мощности — 138 кВт, оптимальный, с точки зрения надежности и ресурса, в базовой судовой модификации, и одновременно широкий мощностной диапазон для других применений при частоте вращения от 1500 до 2250 об/мин, новейшие технологии и конструкторские решения, направленные на выполнение экологических требований, существенно отличающиеся в зависимости от назначения двигателя, а также наличие базы поставщиков первоклассных комплектующих изделий.

В настоящем докладе описаны процессы проектирования и доводки двигателя, выполненные совместными усилиями специалистов «AVL List GmbH» и ПАО «Звезда». Названы целевые показатели, такие как вес, габариты, КПД, ресурс, архитектура двигателя, а также основные технические решения, положенные в основу нового семейства дизелей. Приведено описание основных компонентов и систем двигателя, в частности компактный картер, материал для изготовления которого может зависеть от максимального давления в цилиндре, кожух маховика и рубашка охлаждения из алюминия, для снижения веса машины, впускные каналы для организации газовых потоков в цилиндре, а также схема охлаждения головки нисходящим потоком теплоносителя. Рассмотрены возможные методы достижения заданных целевых показателей, в том числе оптимизация турбонаддува, применение современных систем топливоподачи и технологий снижения вредных выбросов. В докладе подчеркивается важность всестороннего расширения базы знаний до начала разработки и широкое использование компьютерного проектирования, что существенно облегчает процессы унификации компонентов и выработки сбалансированных технических решений с учетом разнообразия применений изделия и действующих экологиче-

ских нормативов. И наконец, в докладе затронуты такие моменты, как логистические аспекты комплектации первого опытного образца, состояние проекта на сегодняшний день и обзор ближайших задач.

Введение

Новый многоцелевой дизель семейства «Пульсар-М150», разработанный ПАО «Звезда» в сотрудничестве с AVL, может считаться одним из главных за последнее время российских достижений в области развития двигателестроения. Создана новая платформа для удовлетворения потребности страны в двигателях судового транспортного и промышленного назначения, а также для экспортных поставок ПАО «Звезда» в будущем.

Для этого новый дизель (в судовом варианте) должен соответствовать требованиям экологических нормативов IMO Tier 3.

Что касается других применений, то предельно допустимый уровень вредных выбросов будет зависеть от конкретного рынка, однако должна быть предусмотрена возможность доработки двигателя (оставаясь в пределах заданных весогабаритных ограничений) до уровня EPA Tier 4 или European Stage IIIB в данном мощностном диапазоне.

Кроме того, должна быть предусмотрена возможность будущей адаптации двигателя для работы на других видах топлива, например, на газе.

Новые двигатели, в зависимости от числа цилиндров, должны покрывать мощностной диапазон от 400 до 1800 кВт. Двигатель должен войти в серию в ближайшем будущем, причем первой будет поставлена на производство версия V12. Следовательно, помимо вопросов проектирования и доводки, неизбежно пришлось решать проблему поставок компонентов для опытного и серийного образцов.

Работа выполнена объединенным коллективом специалистов «AVL List GmbH» и ПАО «Звезда» с использованием самых современных методик, направленных на удовлетворение требований заказчиков, снижение продолжительности и стоимости периода коммерциализации изделий.

Приведено описание проектной концепции, основных технических решений и наиболее существенные аспекты текущего процесса разработки.

При формировании целевых показателей нового семейства двигателей, включая диапазон мощности, показатели надежности, КПД и уровень вредных выбросов, с самого начала были приняты следующие положения.

➢ Для достижения заданной удельной мощности должен быть создан высокооборотный дизель с частотой вращения 1500–2250 об/мин. Для заданного диапазона мощности принят рабочий объем цилиндра порядка 3 л.

➢ Удельный вес не должен превышать 2,5 – 4 кг/кВт.

➢ Требования простоты обслуживания и надежности являются обязательными.

➢ Гибкость конфигурации должна быть обеспечена за счет модульной конструкции.

➢ Должна быть обеспечена максимальная степень унификации основных компонентов.

➢ Базовая конфигурация должна предусматривать возможность модернизации и расширения типоразмерного ряда.

➢ Необходимо обеспечить максимально быстрое внедрение в производство V-образной версии двигателя в качестве базовой платформы для всех остальных модификаций.

Выбор области применения и технологий

AVL и «Звезда» начали работу с изучения рыночной ситуации с тем, чтобы принимаемые технические и технологические решения соответствовали требованиям рынка. С учетом различных режимов нагружения, характерных для каждого применения, семейство двигателей разбито на три класса — M1, M2, M3.

Главные судовые двигатели

Целью является создание компактной пропульсивной силовой установки для судов с неограниченным районом плавания, которая вследствие этого должна соответствовать требованиям IMO Tier 3 по вредным выбросам.

Наиболее существенными требованиями для таких установок являются: высокая удельная мощность, минимум занимаемого места, хорошая приемистость, высокий крутящий момент в широком диапазоне частот вращения, низкий уровень шума и большой межремонтный интервал. С точки зрения предъявляемых требований создаваемый ряд главных судовых двигателей был разбит на три класса:

➢ M1 — двигатели мощностью 1650 кВт при 2250 об/мин для прогулочных и патрульных судов, для которых характерны относительно низкий коэффициент загрузки и малое время работы;

➢ M2 — двигатели мощностью 1440 кВт при 2100 об/мин для пассажирских судов и паромов, для которых характерны более высокий коэффициент загрузки и длительное время работы;

➢ M3 — двигатели мощностью 1080 кВт при 1900 об/мин для вспомогательных судов и судов снабжения.

В комплект поставки входит все вспомогательное оборудование, необходимое для установки дизеля в машинном отделении судна.

Для соответствия жестким нормативам предельно допустимых вредных выбросов, при сохранении (по возможности) расхода топлива,

были рассмотрены возможности оборудования двигателя следующими системами (более подробно описаны ниже):

➢ система рециркуляции ОГ (EGR) с охлаждением;

➢ система двухступенчатого наддува с промежуточным охлаждением воздуха и перепуском ОГ перед турбиной высокого давления;

➢ система впрыска топлива common rail высокого давления, для снижения выбросов твердых частиц и дымления.

Дизель-генераторные установки

Двигатель должен стать частью компактного энергоагрегата контейнерного типа для питания потребителей электроэнергией частотой 50 Гц. Что касается вредных выбросов, то изначально двигатель должен соответствовать нормам EPA Tier 2, однако в проекте заложена возможность выхода в дальнейшем на более высокий уровень требований (TA Luft, EPA Tier 4).

Для дизель-генератора расход топлива является одним из важнейших показателей, определяющих стоимость полного жизненного цикла. Не менее важными являются такие показатели, как время пуска и приема нагрузки. Должна быть обеспечена возможность пуска и работы в условиях экстремальных температур.

Применение EGR для снижения выбросов NO_x на момент постановки изделия на производство не рассматривается. Предлагаемая конфигурация дизеля включает:

➢ систему одноступенчатого наддува для ускорения пуска;

➢ систему впрыска топлива common rail высокого давления.

Двигатели для карьерных самосвалов

Двигатель для карьерного самосвала должен работать в тяжелых условиях (большая высота, высокие температуры, запыленность атмосферы), а также развивать высокий крутящий момент и обладать способностью к динамическому торможению. По вредным выбросам двигатель должен соответствовать требованиям EPA Tier 2 для внедорожного оборудования с возможностью дальнейшей модернизации.

С учетом указанных требований двигатель конфигурации V12 должен развивать номинальную мощность 800 кВт при 1900 об/мин.

Конструкция двигателя должна быть приспособлена для подключения вспомогательного оборудования, характерного для карьерных самосвалов, такого как, например, компрессор с приводом от электродвигателя переменного тока, вентилятор регулируемой производительности, управляемый микропроцессорным контроллером и т. п., а также иметь дополнительный отбор мощности.

Рекомендуемые к применению системы — те же, что и для дизель-генераторов, а именно:

➢ система одноступенчатого наддува с перепуском газов перед турбиной;

➢ как вариант (для работы на большой высоте) система двухступенчатого наддува;

➢ система впрыска топлива common rail высокого давления.

Тепловозные двигатели

Двигатель «Пульсар» в тепловозном варианте может быть установлен на легких локомотивах или дрезинах, предназначенных для перевозки пассажиров и грузов, а также для маневровой работы. К моменту постановки на производство он должен соответствовать требованиям EC Stage IIIA по уровню вредных выбросов.

Учитывая специфику рабочих режимов тепловозного двигателя, для которого характерна длительная работа с часто меняющейся нагрузкой, для конфигурации V12, выбраны следующие варианты:

➢ класс М2 мощностью 1440 кВт при 2100 об/мин;

➢ класс М3 мощностью 1080 кВт при 1900 об/мин;

➢ класс М4 мощностью 895 кВт при 1800 об/мин.

В число рекомендуемых технологий входят:

➢ система одноступенчатого наддува для класса М3;

➢ система двухступенчатого наддува с промежуточным охлаждением воздуха и перепуском газов перед турбиной высокого давления для класса М2;

➢ система впрыска топлива common rail высокого давления.

Компоновка и архитектура двигателя

Семейство высокооборотных двигателей Пульсар-М150 включает конфигурации L6, V12 и V16. Основные параметры семейства двигателей представлены в табл. 1.

Выбранные значения среднего эффективного давления и средней скорости поршня отражают характеристики лучших на сегодняшний день мировых аналогов, оцениваемых по критериям КПД–надежность — уровень вредных выбросов. Архитектура двигателя (поперечный разрез) представлена на рис. 1. Продольный разрез двигателя в судовом исполнении, укомплектованного вспомогательными системами, представлен рис. 2.

➢ Для компоновки выбран угол развала блоков 90 градусов, который обеспечивает достаточную компактность агрегата и одновременно легкий доступ к оборудованию, размещенному в развале блоков.

➢ Высокое давление сгорания позволяет выйти на уровень не только сегодняшних, но и

Таблица 1

Основные параметры семейства двигателей

Параметр	Значение
Тактность	4-тактный
Топливо	Дизельное
Число цилиндров	(L6) V12 (V16)
Диаметр цилиндра / Ход поршня, мм	150/175
Рабочий объем цилиндра, л	3,1
Частота вращения, об/мин	1500–2250
Средняя скорость поршня, м/с	8,75–13,1
Цилиндровая мощность, кВт	66,7–137,5
Среднее эффективное давление (BMEP), бар	15,3–23,7

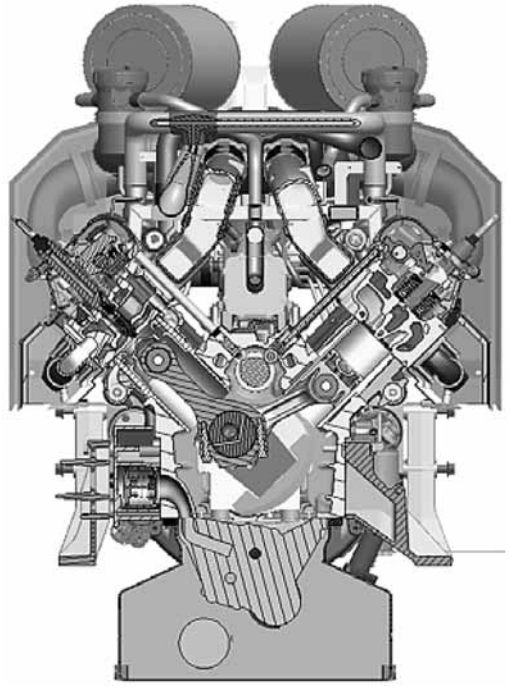


Рис. 1. Поперечный разрез двигателя (генераторный вариант)

перспективных мировых показателей удельной мощности и вредных выбросов.

➢ В развале блоков размещен ряд важных компонентов, в том числе общий кулачковый вал, насос высокого давления для системы common rail, впускные воздушные ресиверы.

➢ Выпускные коллекторы размещены снаружи и снабжены мощной теплоизоляцией.

➢ В соответствии с современными тенденциями развития высокооборотных дизелей, а также для снижения гидравлических потерь головка цилиндра выполнена с двумя впускными и двумя выпускными клапанами, а воздушные и газовые коллектора разнесены по разные стороны блока.

➢ Ряд систем двигателя построен по модульному принципу, что позволит более гибко адаптировать его конфигурацию к каждому конкретному применению.

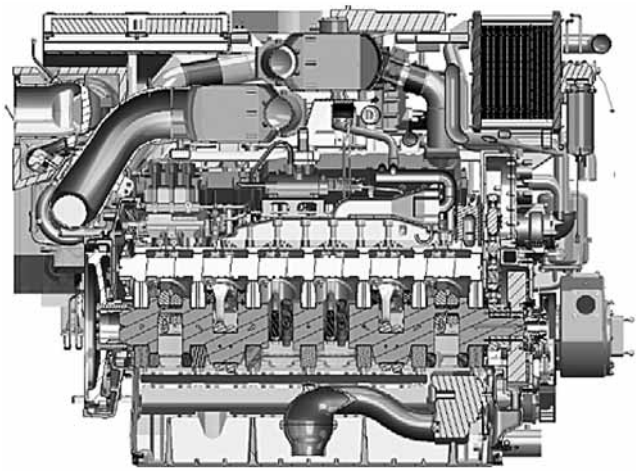


Рис. 2. Продольный разрез двигателя (судовой вариант)

Особо необходимо отметить важность модульного принципа построения следующих систем:

➢ система турбонаддува (с устройством EGR или без него);

➢ картер и система смазки;

➢ вспомогательные устройства, расположенные на свободном конце двигателя, в том числе водяные насосы, воздушные компрессоры, охладители, и т. п.

Конструктивные особенности двигателей серии Пульсар-М150

Простая и надежная конструкция

Конструкция рассчитана на высокое среднее эффективное давление, характерное для современных двигателей. Кроме того, наличие разных версий двигателя и выбора конструкционных материалов открывает широкие возможности для будущей модернизации. Высокие значения BMEP в сочетании с высокой скоростью поршня, определили выбор жесткой конструкции с подвесным картером из обычного чугуна, который в дальнейшем для некоторых применений может заменяться на чугун с шаровидным графитом. Крышки коренных подшипников фиксируются двумя вертикальными и четырьмя горизонтальными шпильками, способными выдерживать значительные поперечные усилия, свойственные для V-образных двигателей с углом развала блока 90 градусов. Конструкция с «сухим» картером максимально упрощает процесс литья и способствует снижению веса машины, а также предотвращает кавитацию в водяных полостях. В конструкции применены жесткие цилиндровые втулки с упором посредине и охлаждаемой верхней частью. При этом охлаждающая жидкость циркулирует в алюминиевых рубашках, не несущих механической нагрузки, которые объединены общими внутренними водяными магистралями (рис. 3).

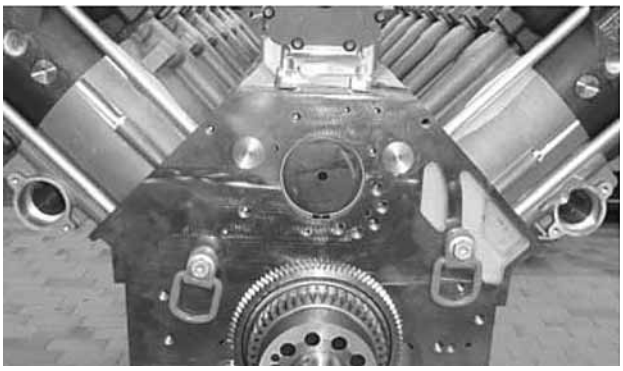


Рис. 3. Картер и рубашка охлаждения

Механизм движения

Коленвал (рис. 4) изготовлен из легированной стали методом ковки, контактные поверхности и галтели проходят закалку. Динамические характеристики системы, снабженной противовесами и демпфером крутильных колебаний типа Geislinger, гарантируют надежную работу при высоких нагрузках.

Шатуны (рис. 5) изготавливаются методом ковки из высокопрочной стали. Шатун имеет косой разъем, крышка шатунного подшипника фиксируется двумя болтами.

Ковано-сварной поршень моноблочного типа (рис. 5) имеет три кольца — два уплотнительных и одно маслосъемное.



Рис. 4. Коленвал



Рис. 5. Шатун и поршень

Головка цилиндра

Четырехклапанная головка цилиндра с центральным расположением форсунки (рис. 6) характеризуется однонаправленным движением потока рабочего тела, что позволяет значительно уменьшить гидравлические потери при высоких скоростях поршня, снизив турбулизацию потока почти до нуля. Головка крепится к блоку четырьмя болтами с гидравлической затяжкой. Жесткая конструкция из серого чугуна с вермикулярным графитом позволяет выдерживать высокие механические нагрузки.

Минимизация тепловых нагрузок достигается за счет интенсивного охлаждения нисходящим потоком теплоносителя, который проходит через межклапанные перегородки, где термические напряжения особенно велики.

Многоцикловая усталостная прочность и устойчивость к циклическим тепловым нагрузкам (Thermo Mechanical Fatigue — TMF) подтверждены моделированием с помощью МКЭ. Как видно из рис. 7, анализ по критерию TMF определен выбор чугуна с шаровидным графитом в качестве конструкционного материала, способного выдержать большое количество тепловых циклов без разрушения.

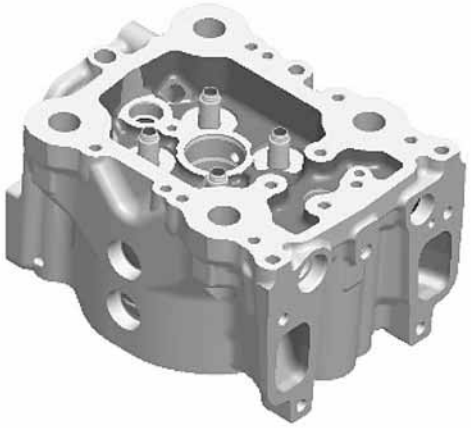


Рис. 6. Головка цилиндра

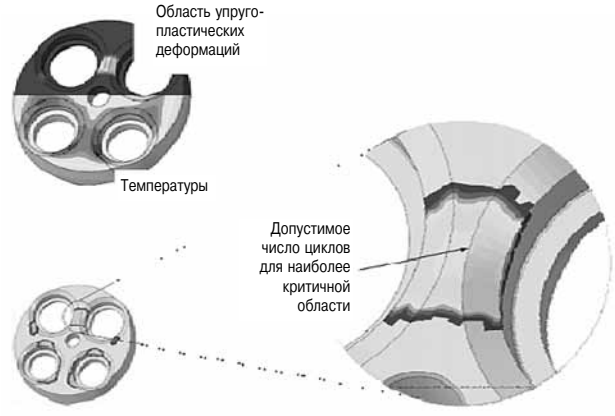


Рис. 7. Результаты моделирования TMF: число циклов до начала растрескивания

Привод клапанов
с внутренним кулачковым валом

Кулачковый вал расположен в туннеле картера. Сдвоенные впускные и выпускные клапаны приводятся в действие жесткими толкателями с гидравлическими компенсаторами зазоров.

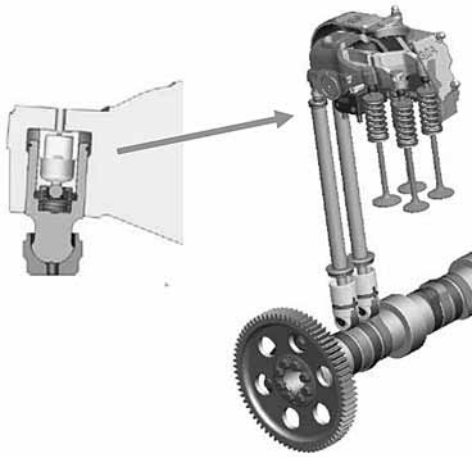


Рис. 8. Привод клапанов
с гидравлическими компенсаторами зазоров

Вспомогательные системы —
модульный принцип построения

Вспомогательные устройства могут размещаться как со стороны маховика, так и со стороны свободного конца коленвала (рис. 9).

Со стороны маховика приводятся кулачковый вал и топливные насосы, а также электро- или пневмостартер.

Возможности конфигурации приводов со стороны свободного конца коленвала более разнообразны. Стандартная конфигурация включает привод насосов холодной и горячей охлаждающей воды, масляный насос и генератор постоянного тока с ременным приводом. Для судовых модификаций добавляются валы дополнительных отборов мощности привода насосов забортной воды для охлаждения и гидронасосов. На двигателях карьерных самосвалов или тепловозов вместо насоса забортной воды может быть установлен воздушный компрессор. Компрессор с электродвигателем постоянного тока может также иметь ременной привод.

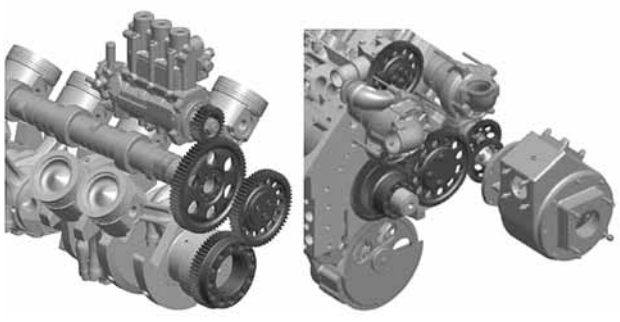


Рис. 9. Отборы мощности на переднем
и заднем концах коленвала

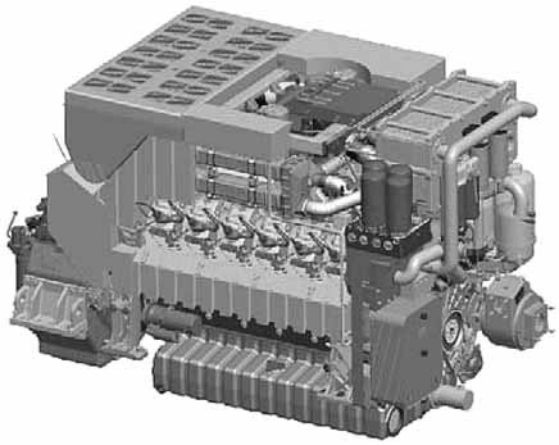


Рис. 10. Компоновочная схема
главного судового двигателя
со вспомогательными системами

Для некоторых применений, например для самосвалов и дизель-генераторов, на свободном конце вала добавляется дополнительный отбор мощности с ременным приводом вентилятора.

На рис. 10 приведена схема компоновки главного судового двигателя со вспомогательными системами.

Системы смазки и охлаждения

При выборе компоновки двигателя и вспомогательных систем ставилась задача обеспечения удобства сборки и установки агрегата в машинном отделении. Например, масляные холодильники, фильтры и центрифуги устанавливаются на переднем торце двигателя (рис. 11). Устройство маслосборника гарантирует наличие достаточного количества смазки при любых условиях. Разработано несколько вариантов маслосборника для различных применений двигателя с учетом типовых требований конечных пользователей.

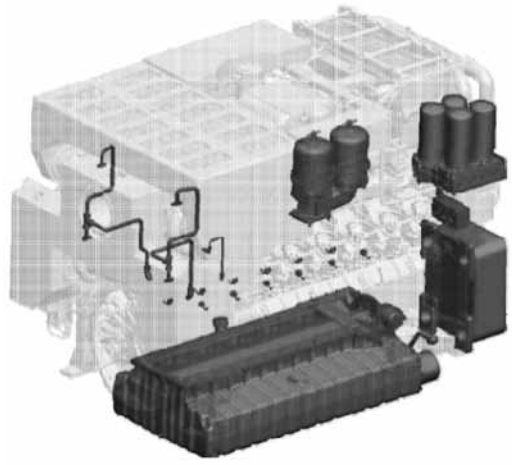


Рис. 11. Система смазки

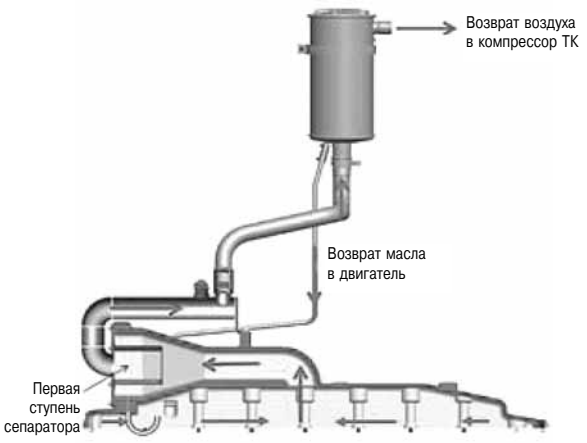


Рис. 12. Система вентиляции картера

Для сокращения потерь масла фирма AVL разработала специальную систему вентиляции картера (запатентована). Система представляет собой двухступенчатый сепаратор, состоящий из предварительной и основной ступеней, откуда масло возвращается в картер (рис. 12).

Система охлаждения состоит из двух контуров: высокотемпературного — для охлаждения двигателя, масла и EGR-тракта, и низкотемпературного — для охлаждения сливной магистрали топлива, ECU и наддувочного воздуха. Насосы и теплообменники составляют неотъемлемую часть поставляемого агрегата.

Объем поставки главного судового двигателя дополняется насосом забортной воды и главным холодильником, установленным на двигателе (рис. 13). Все вспомогательные устройства достаточно компактны и легко монтируются на двигателе.

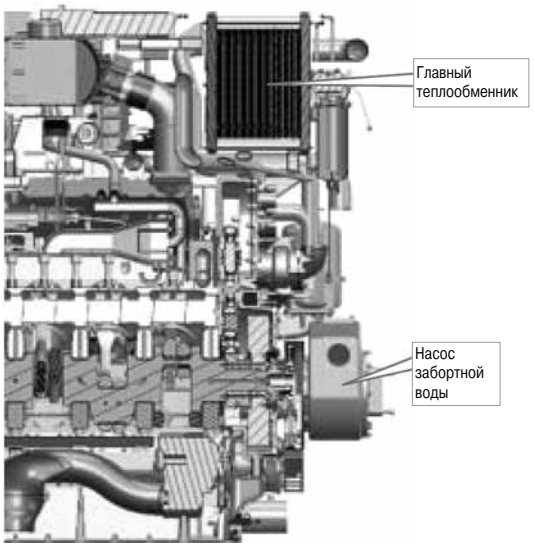


Рис. 13. Насос забортной воды и главный холодильник

Система управления двигателем

На двигателе установлен охлаждаемый блок управления (Electronic Control Unit — ECU), . В него заложены все необходимые функции управления нагрузкой и работой дизеля, в том числе управление впрыском топлива, клапанами системы EGR, клапанами перепуска газов перед турбиной, и т. д. (рис. 14).

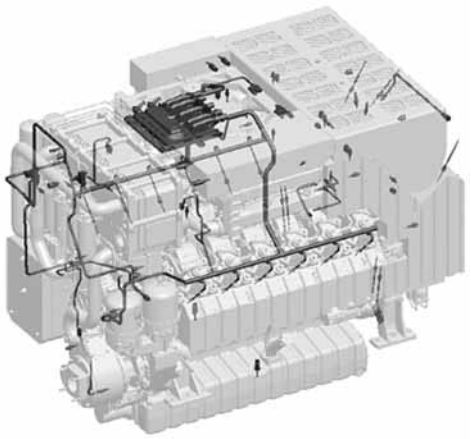


Рис. 14. ECU главного судового двигателя с соединениями

Кроме того, в ECU поступают сигналы всех датчиков, необходимые для реализации функций аварийно-предупредительной сигнализации и защиты. Совместными усилиями AVL, ПАО «Звезда» и производителя топливной аппаратуры была разработана система управления и мониторинга, сертифицированная Германским Ллойдом и Российским Морским Регистром.

Технологии снижения вредных выбросов в зависимости от применения двигателей

Нормы предельно допустимых выбросов и технологии для их достижения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Нормы вредных выбросов и используемые методы их снижения

	Применение	Нормы	NO_x (г/кВт·ч)	Частицы (г/кВт·ч)	Используемый метод
Исходный вариант	Дизель-генераторы	EPA Tier 2	6,4*)	0,2	Оптимизация рабочего процесса
	Самосвалы	EPA Tier 2	6,4*)	0,2	
	Тепловозные	EU Stage 3A	6,0	0,2	
	Судовые	IMO Tier 3	1,9	–	EGR и двухступенчатый наддув
Апгрейд	Дизель-генераторы	EPA Tier 4	0,67	0,03	SCR
	Самосвалы	EPA Tier 4	3,5	0,04	EGR + DOC + DPF
	Тепловозные	EU Stage 3B	4,0	0,025	

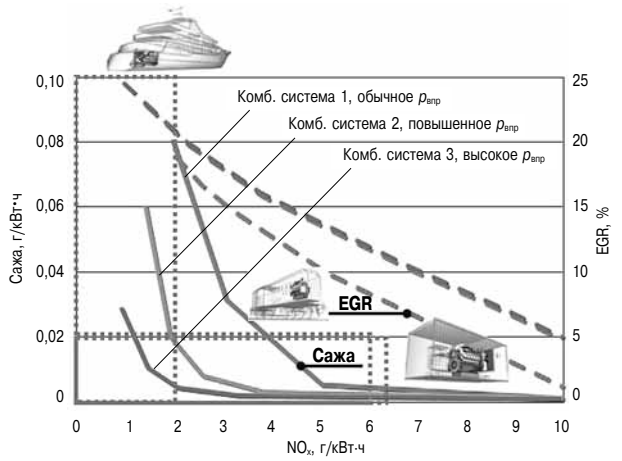


Рис. 15. Снижение выбросов NO_x и PM

Для достижения уровня действующих норм было решено ограничиться оптимизацией рабочего процесса в сочетании с современной системой впрыска топлива common rail с высоким давлением впрыска. Такой вариант достаточен для соблюдения действующих норм выбросов NO_x и частиц, для дизель-генераторов, двигателей тепловозов и карьерных самосвалов, сохраняя в то же время все преимущества простейшего решения. Он, однако, недостаточен для достижения действующих в зонах контроля выбросов норм IMO Tier 3 по NO_x, поэтому для работы в этих зонах двигатель должен быть дополнен системой EGR в сочетании с двухступенчатым наддувом. Такое решение было принято с учетом опыта AVL в области создания высокооборотных двигателей (рис. 15).

В главном судовом двигателе давление впрыска топлива должно быть повышено для достижения оптимального компромисса при соблюдении норм выбросов NO_x и PM. Как видно из графика на рис. 15, для снижения уровня выбросов NO_x до 2 г/кВт·ч и менее необходима степень рециркуляции EGR > 20 %.

Уже действующие, чрезвычайно жесткие нормы предельно допустимых выбросов NO_x для дизель-генераторов делают неизбежным использование технологии SCR. По той же причине обязательным является использование фильтров частиц (DPF) в двигателях тепловозов и карьерных самосвалов, если при этом выбросы NO_x жестко лимитированы.

Рабочий процесс и система впрыска топлива

Оптимизации геометрии системы «камера в поршне–форсунка» по удельному расходу топлива была выполнена с помощью моделирования, с использованием методов вычислительной гидромеханики (CFD) (рис. 16).

Одновременно CFD-моделирование позволило построить точную модель температурных полей

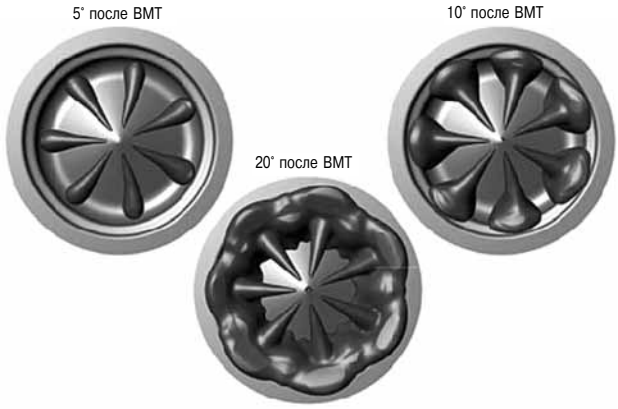


Рис. 16. Моделирование топливного факела

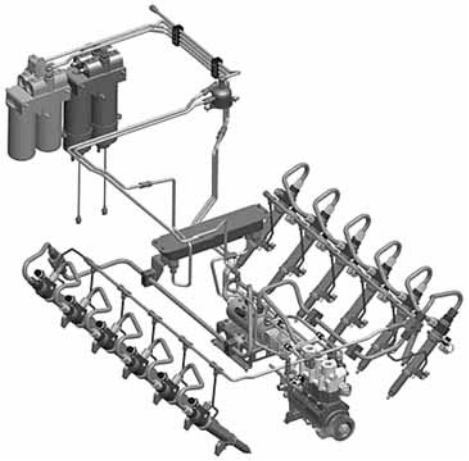


Рис. 17. Система common rail фирмы «F.Heinzmann»

в головке цилиндра, чтобы максимально снизить риск ее растрескивания (см. рис. 7).

Полное (бездымное) сгорание во всем диапазоне нагрузок обеспечивается системой common rail высокого давления фирмы «F.Heinzmann» (рис. 17). ТНВД, размещен в развале блоков, где температура относительно невелика. Там же находятся ограничитель давления и топливные трубки с двойными стенками.

Форсунки оборудованы индивидуальными аккумуляторами для более точного дозирования подачи топлива.

Турбонаддув

Для различных применений двигателя были разработаны две системы наддува.

В главном судовом двигателе используется двухступенчатый наддув, что обеспечивает соответствие наиболее жестким нормам выбросов (IMO Tier 3) при значении BMEP свыше 23 бар на номинальном режиме. Такая же система наддува предназначена для модификации двигателя M2 тепловозов и карьерных самосвалов, работающих на больших высотах.

Для указанных применений в целях ограничения выбросов NO_x используется система EGR, которая исключает необходимость в очистке

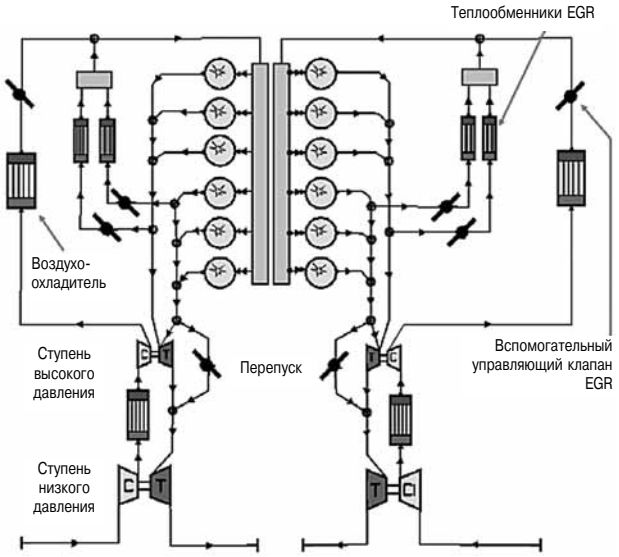


Рис. 18. Система турбонаддува для главных судовых двигателей, тепловозных дизелей класса М2 и двигателей карьерных самосвалов, работающих на большой высоте

отработавших газов. Охлаждение отработавших газов в системе рециркуляции осуществляется двухпоточными теплообменниками (по одному на каждый ряд цилиндров) с управляемым расходом теплоносителя. Компактная система EGR использует принцип «кратчайшего пути», широко применяемый в автомобильных двигателях. Преимущество такого подхода заключается в том, что он обеспечивает не только высокий КПД во всем диапазоне нагрузок, но и хорошую динамику на неустановившихся режимах работы. Положительный перепад давления отработавших газов при низких нагрузках обеспечивается с помощью вспомогательного регулирующего клапана. Степень рециркуляции может быть повышена за счет установки пластинчатых клапанов в газовом тракте системы EGR после воздухоохладителя (рис. 19).

При этом во избежание превышения максимального давления в цилиндре на высоких нагрузках степень сжатия была слегка понижена по сравнению с двигателями, оборудованными

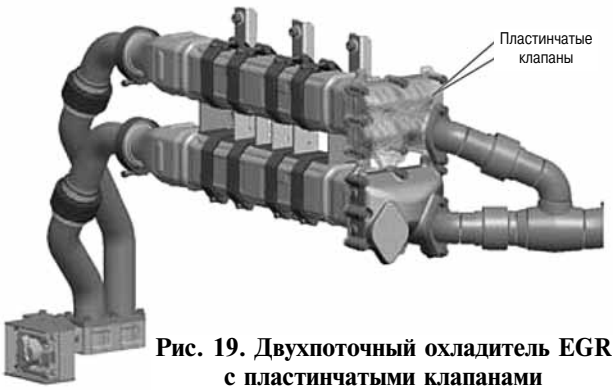


Рис. 19. Двухпоточный охладитель EGR с пластинчатыми клапанами

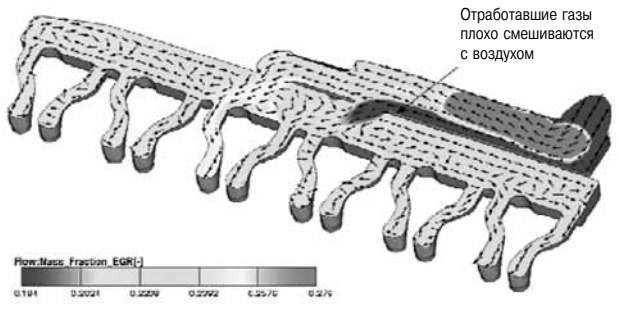


Рис. 20. Распределение EGR по цилиндрам при перегрузке (2170 об/мин)

одноступенчатой системой наддува. Еще одним средством защиты от перегрузки является клапан перепуска газов перед турбиной высокого давления.

Важнейшим условием правильной организации рабочего процесса двигателя с системой EGR является равномерность распределения EGR по цилиндрам. Для оценки максимально достижимой равномерности распределения EGR по цилиндрам на стадии проектирования было выполнено CFD-моделирование, результаты которого (рис. 20) показали, что лишь один цилиндр не укладывается в приемлемый допуск по данному параметру (±5 %), что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации системы EGR.

Для всех остальных применений (дизель-генераторы, карьерные самосвалы, работающие на обычной высоте, и тепловозные двигатели класса М3) достаточно системы одноступенчатого наддува, чтобы двигатель развивал заданную мощность и выполнял требования по вредным выбросам, соответствующие нормативам EPA Tier 2.

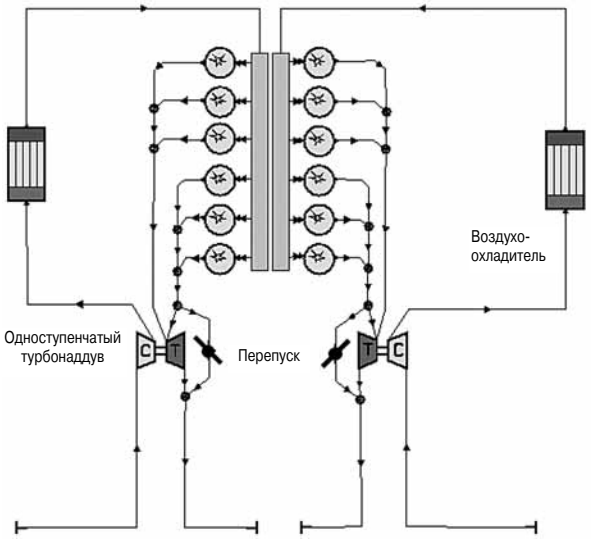


Рис. 21. Система турбонаддува для дизель-генераторов, карьерных самосвалов, работающих на обычной высоте, и тепловозных двигателей класса М3

Моделирование термодинамических процессов

На стадии разработки проекта широко использовались программы AVL для предварительного моделирования термодинамических процессов, чтобы свести к минимуму риски и лишнюю работу, связанную с корректировками на более поздних этапах.

В частности, было проведено моделирование термодинамических процессов по программе AVL BOOST. Для определения граничных условий использован опыт работ AVL при проектировании аналогичных двигателей. На рис. 22 приведены расчетные скоростные характеристики главного судового двигателя класса М2 по результатам моделирования.

Из графиков видно, что расход топлива соответствует расчетному, при ограничении максимального давления в цилиндре величиной 190 бар за счет перепуска газов на больших нагрузках.

Параметры турбокомпрессора подобраны таким образом, чтобы двигатель развивал постоянный крутящий момент (и среднее эффективное давление) в широком скоростном диапазоне — от номинала (2100 об/мин) до 1700 об/мин.

Высокое качество спроектированных систем подачи топлива и турбонаддува подтверждается тем, что номинальные рабочие показатели сохраняются при повышении температуры окружающей среды до 55°С.

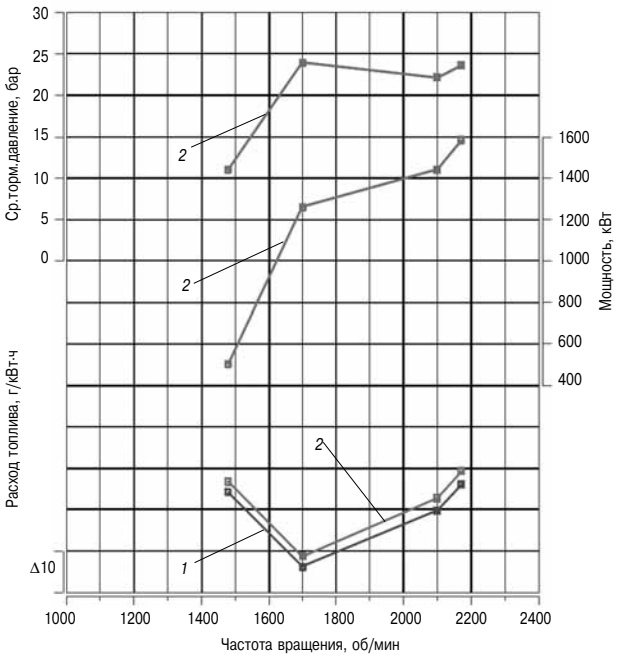


Рис. 22. Расчетная скоростная характеристика главного судового двигателя:

низшая теплотворная способность — 24 740 кДж/кг; стандартные условия окружающей среды: p = 1,0 бар, t = 25 °С; условия жаркого климата: p = 1,0 бар, t = 55 °С; температура окружающего воздуха: *1* — стандартная; *2* — жаркий климат

От концепции — к промышленному производству

Роль интеграции в процесс разработки на фирме AVL

При разработке модельного ряда двигателей Пульсар-М150 широко использовался опыт, накопленный AVL в ходе создания самых различных дизелей: от автомобильных до мощных стационарных двигателей промышленного назначения. Некоторые существенные аспекты работ на этапах эскизного проектирования и математического моделирования описаны выше. Значительное снижение длительности и стоимости работ было достигнуто за счет предварительного моделирования, выполненного с использованием самых современных инструментов в целях общей оценки конструкции, термодинамического анализа, расчетов показателей качества и детальных расчетов прочности.

Одновременно велась подготовка к экспериментальной проверке расчетных параметров двигателя.

Испытания SCE / MCE и концепция эксперимента

При разработке нового двигателя важную роль играют испытания, проводимые на одноцилиндровом отсеке (SCE). Такой отсек построен и введен в эксплуатацию. Он использован для:

- ➢ оптимизации рабочего процесса;
- ➢ механических испытаний агрегата;
- ➢ контроля состояния деталей, подвергнутых высоких тепловым нагрузкам, таким как поршень и головка цилиндра;
- ➢ гомологической оптимизации трущихся пар — поршень/поршневое кольцо/втулка цилиндра в целях снижения расхода масла и проверки на совместимость смазочных масел, которые будут использованы в двигателях Пульсар-М150

Одноцилиндровый отсек SCE (рис. 23) включает в себя силовой агрегат, аналогичный тому, который будет использован в многоцилиндровом двигателе (MCE); результаты испытаний SCE использованы на ранней стадии создания MCE.

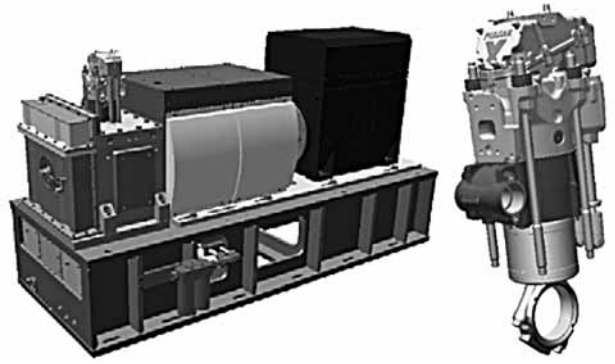


Рис. 23. Одноцилиндровый отсек и силовой агрегат «Пульсар»

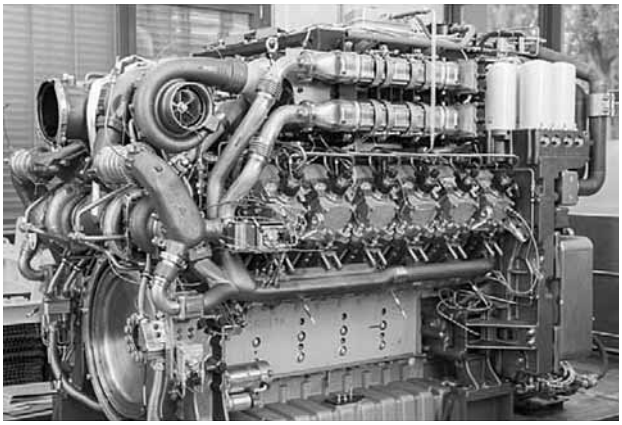


Рис. 24. Опытный образец двигателя с установленными на нем датчиками

Окончательные параметрические испытания, функциональная проверка и ресурсные испытания проводятся на многоцилиндровых опытных двигателях. К испытаниям уже подготовлены два главных судовых двигателя и два двигателя для дизель-генераторов. В настоящее время ведется предварительная отработка и оптимизация всех технологий сборки систем и агрегатов с расчетом на их последующее промышленное внедрение. Подготовлена контрольно-измерительная аппаратура для записи всех необходимых параметров (рис. 24).

Организация комплексных поставок

ПАО «Звезда» поручило AVL обеспечить комплектацию одноцилиндрового двигателя и четырех многоцилиндровых двигателей, включая поставку всех вспомогательных материалов и деталей. Всего ведомость поставки включает 51 000 позиций. Такое решение объясняется тем, что вопросы комплектации, планирования и управления качеством должны стать неотъемлемыми компонентами процесса разработки продукта, чтобы обеспечить максимально эффективную коммерциализацию в минимальные сроки.

Начальная стадия проекта, синхронизированная с выбором концепции и эскизным проектированием, включает в себя выбор и назначение поставщиков.

При выборе поставщиков на данном этапе ставилась задача быстрее начать изготовление и испытания опытного образца, не оттягивая при этом начало серийного выпуска на производственных мощностях изготовителя двигателей.

Поставщики «стратегических» компонентов, таких как системы топливоподачи, турбокомпрессоры и т. п., выбирались на основе совместного опыта AVL и ПАО «Звезда».

При этом поставщики, специализирующиеся, в основном, на быстром создании опытных образцов тех или иных компонентов, выбирались таким образом, чтобы в дельнейшем можно было передать изготовление компонентов производителю, способному освоить их серийное производство. Коллектив разработчиков в процессе отбора поставщиков уделял особое внимание таким аспектам, как себестоимость, качество, состояние подготовки и обеспечения производства у данного поставщика.

В общей сложности в процессе комплектации было отобрано и изучено более 100 поставщиков, включая характеристику их деятельности с учетом наличия действующих систем управления качеством.

Заключение

Создание современного высокооборотного многоцелевого двигателя на уровне лучших мировых образцов, соответствующего требованиям действующих и ожидаемых нормативов, является серьезным вызовом.

➢ Решение подобной задачи связано с поиском разумного компромисса между требованиями унификации, с одной стороны, и индивидуализации для каждого конкретного применения, с другой стороны. Отсюда следует необходимость модульного построения основных систем.

➢ Современный подход к разработке сложных изделий заключается в том, чтобы «попасть в цель с первой попытки». Это требует оптимизации проектирования, предварительного моделирования («front loading»), использования современных методов испытаний на одноцилиндровом отсеке и многоцилиндровых опытных образцах.

➢ Детальная проработка вопросов поставок и комплектации на ранней стадии проекта позволяет приступить к поиску и привлечению поставщиков опытных и серийных изделий, что сокращает время для начала серийного выпуска.

НОВОЕ СЕМЕЙСТВО ДИЗЕЛЕЙ УДМЗ ДМ-185

Martin Muether.
FEV GmbH,
В. Фурзиков, В. Мальцев, И. Ночвин, А. Боженов,
ООО «Уральский дизель-моторный завод»
Olaf Bruning, Ralf Rauschen, Michael Meessen,
Peter Heuser,
FEV GmbH

Реферат

ООО «Уральский дизель-моторный завод» (УДМЗ) ведет разработку принципиально нового семейства дизелей, начало серийного выпуска которых запланировано на 2016 г. Двигатели нового семейства ДМ-185 должны найти самое широкое применение, включая такие объекты, как карьерные самосвалы, судовые силовые установки и дизель-генераторы. Всего в семейство ДМ-185 входят шестнадцать типов двигателей мощностью от 840 до 3800 кВт с возможностью дальнейшего расширения мощностного ряда до 6000 кВт. Число цилиндров двигателя — от шести до двадцати. Характерными чертами новой машины являются высокая цилиндровая мощность (до 234 кВт), низкий удельный расход топлива, а также низкие значения вредных выбросов (EU IIIA / IMO2), достигнутые без применения рециркуляции отработавших газов и газоочистки.

Первые опытные образцы уже проходят испытания на УДМЗ (Екатеринбург), предварительные результаты которых подтверждают правильность принятых конструктивных решений.

Введение

УДМЗ является одним из ведущих дизелестроительных предприятий России. Завод специализируется на создании дизелей и дизель-генераторов семейства ДМ-21 мощностью от 500 до 1600 кВт для судов, тепловозов и карьерных самосвалов, а также для нужд малой энергетики. На предприятии заняты 670 человек, его производительность составляет 150 дизелей и дизель-генераторов в год.

В 2012 году УДМЗ подписал два государственных контракта с Минпромторгом Российской Федерации на разработку нового семейства многоцелевых дизелей мощностью 1000–4000 кВт:

➢ шифр «Дизельстрой», задачей которого является разработка специализированных стендов для испытаний двигателей с номинальной частотой вращения 1500–3000 об/мин (контракт успешно завершен в 2014 г.).

➢ шифр «Энергодизель», задачей которого является создание опытных образцов современных высокооборотных дизелей и дизель-генераторов, соответствующих мировому уровню, и конкурентоспособных на внешних рынках (контракт успешно завершен в 2015 г.).

Работа по контрактам выполняется в рамках Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» (подпрограмма «Разработка и организация производства в Российской Федерации в 2011–2015 гг. дизельных двигателей и их компонентов нового поколения)». Для выполнения контракта «Энергодизель» УДМЗ заключил контрагентский договор с FEV GmbH (Германия).

Область применения дизелей и дизель-генераторов семейства ДМ-185 включает:

➢ магистральные тепловозы;

➢ пропульсивные установки морских и океанских судов;

➢ сухопутные транспортные средства и дорожно-строительные машины;

➢ установки малой энергетики мощностью 1000–4000 кВт.

Семейство дизелей DM-185. Варианты исполнения и целевые показатели

Универсальность применения нового двигателя потребовала проведения детального анализа, который позволил сформулировать специфические требования к конструкции, его рыночным перспективам и тенденциям развития. Семейство дизелей ДМ-185 включает V-образные 12-, 16- и 20-цилиндровые машины. В ближайшее время семейство будет дополнено 6- и 8-цилиндровыми рядными двигателями. Объекты применения V-образных двигателей и их целевые показатели сведены в табл. 1.

На основании изучения рынка в качестве нового целевого показателя была определена оптимальная цилиндровая мощность нового двигателя — 234 кВт. Кроме того, конструкция двигателя должна обеспечить резерв для дальнейшего его форсирования в будущем до 300 кВт/цилиндр. Обеспечение резерва для дальнейшего форсирования двигателя связано с некоторым его утяжелением, поскольку это касается возможности повышения максимального давления сгорания до 260 бар, что необходимо учитывать при определении диаметра цилиндра, межосевого расстояния, размеров коренных подшипников и поршней, а также поперечного сечения картера. Основные параметры двигателей семейства ДМ-185 приведены в табл. 2.

Конструкция и технические решения

Чтобы создаваемый двигатель соответствовал существующим и перспективным требованиям рынка, на стадии эскизного проектирования рассматривалась возможность реализации в его конструкции следующих технических решений:

➢ система впрыска топлива common rail;

➢ двухступенчатый турбонаддув с промежуточным охлаждением — для высокофорсированных модификаций двигателя;

Таблица 1

Целевые показатели для семейства дизелей ДМ-185

	V12R	V12M	V12C	V12G	V16G	V16R	V20
Применение	Тепловозный	Судовой	Дорожно-стр. машины	Д/Г	Д/Г	Тепловозный	Все предыдущие
Максимальная мощность, кВт	1500	2416	1998	1907	2543 (3051)	3745	3179 (3814)
Номинальная скорость, об/мин	1500	1900	1900	1500	1500 (1800)	1800	1500 (1800)
Удельная мощность, кВт/л	21,6	34,9	28,8	27,5	27,5 (33,0)	40,5	27,5 (33,0)
Среднее эффективное тормозное давление, бар	17,3	22,0	18,2	22,0	22,0	27,0	22,0
Уровень вредных выбросов	(EU III A; IMO II(+); Tier 3 Готовность для: EU III B; IMO III(+); Tier 4)*						
BSFC, г/кВт·ч	<196						
Число цилиндров	12	12	12	12	16	16	20
Рабочий объем, л	69,3	69,3	69,3	69,3	92,4	92,4	115,5
Турбонаддув, число ступеней	1	1	1	1	1	2	1
Высота, мм	2330	2330	2330	2330	2330	2319	2330
Ширина, мм	1430	1430	1430	1430	1430	1472	1430
Длина, мм	3122	3132	3132	3132	3760	4200	4388
Полный вес, кг	11 000	11 000	11 000	11 000	14 500	14 500	18 000

* Примечание. Названия стандартов приведены в авторском обозначении

Таблица 2

Основные конструктивные параметры V-образных двигателей

	Семейство двигателей ДМ-185 (V-образных)
Угол развала блоков (для V-образных двигателей), град	60
Диаметр цилиндра, мм	185
Ход поршня, мм	215
Отношение хода поршня к диаметру цилиндра	1,16
Соотношение *r*/l	0,26
Рабочий объем цилиндра, см^3	5776,3
Степень сжатия	17
Максимальное давление сгорания, бар	230

17V

➢ блок цилиндров из стального литья, длинная юбка поршня, большие окна картера с крышками на болтах;

➢ угол развала блока 60°;

➢ головки цилиндра из стального литья с одним U-образным каналом охлаждения;

➢ кованый стальной коленвал с противовесами на болтах;

➢ два кулачковых вала, размещаемых снаружи блока для облегчения доступа к ним;

➢ модульный (сборный) кулачковый вал;

➢ размещение впускного и выпускного коллекторов в развале блока цилиндров;

➢ размещение вспомогательных узлов по бокам двигателя так, чтобы они не выступали за пределы его базовой длины;

➢ одинаковое конструктивное исполнение переднего и заднего торцов двигателя;

➢ кожух маховика по SAE00/размеры маховика по SAE21;

➢ возможность дополнения конструкции системой EGR в будущем.

Конструктивное исполнение

При создании семейства ДМ-185 основное внимание уделялось обеспечению универсальности применения двигателя. Одним из важнейших требований к типоразмерному ряду двигателей является максимальная степень унификации узлов и деталей. В особенности это касается мелкосерийных изделий, к которым относятся двигатели большой размерности. Окончательная стоимость изделий этой категории существенно зависит от того, насколько удастся сократить номенклатуру используемых компонентов. Реализация данной концепции позволяет снизить не только производственные расходы, но и стоимость последующей транспортировки и хранения изделий.

Еще один путь снижения себестоимости — максимально возможное использование существующих узлов и деталей, получаемых от специализированных поставщиков. Там, где из-за габаритных ограничений агрегата использование существующих узлов и деталей невозможно, ставится

задача найти возможность переноса «функциональных блоков» из существующих компонентов, легко присоединяемых на месте установки (например, с помощью монтажных фланцев). Такими компонентами, в частности, являются:

➢ система топливоподачи;

➢ система мониторинга технического состояния двигателя;

➢ турбокомпрессор;

➢ масляные и водяные насосы.

Агрегат

На рис. 1 показаны допустимые габариты двигателя семейства ДМ-185, которые в данном случае (тепловозный двигатель) равны 1540 мм по ширине и 2250 мм по высоте. Поставленная

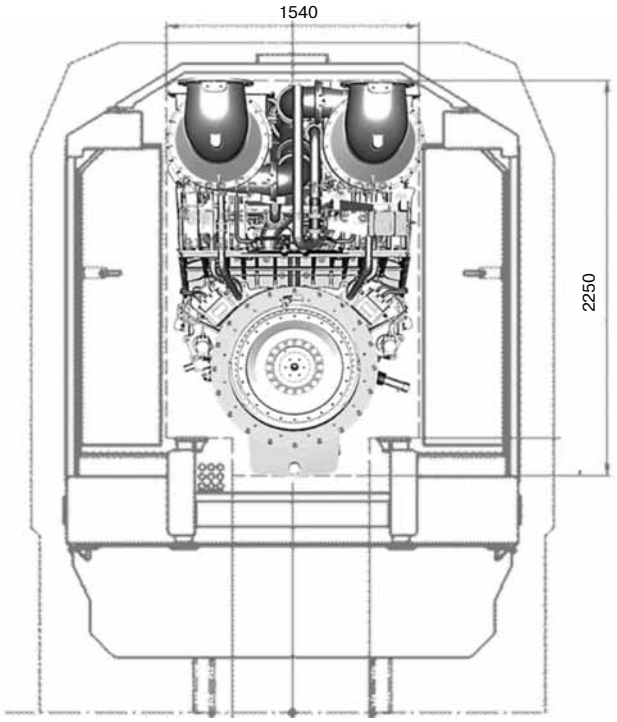


Рис. 1. Предельные габариты (на примере тепловозного двигателя)

цель — вписаться в заданные габариты — достигается выбором оптимального угла развала блока (60°) и соответствующей конфигурацией головки цилиндра (с подачей воздуха изнутри развала блока).

Основные узлы дизеля

Картер — была выбрана конструкция картера из высокопрочного чугуна (GJS-500). Картер несет на себе все остальные главные узлы машины. Он состоит из одинаковых секций, число которых зависит от числа цилиндров двигателя, а именно:

– V12 — 6 секций;

– V16 — 8 секций;

– V20 — 10 секций.

Межосевое расстояние (расстояние между осями соседних цилиндров в одном ряду) равно

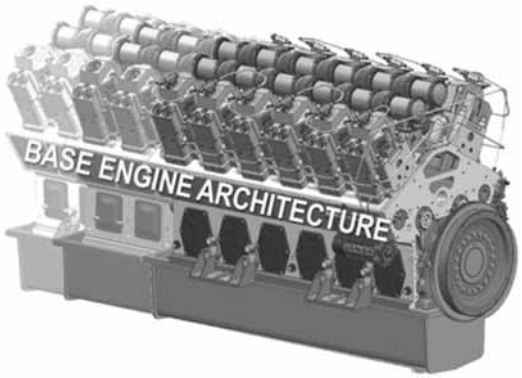


Рис. 2. Архитектура двигателя (схема)

314 мм. Межосевой сдвиг (расстояние между осями цилиндров одной и той же секции правого и левого блоков) равен 62,5 мм. Чтобы вписаться в заданные весогабаритные показатели, было решено разместить внутри развала блока следующие магистрали для рабочих сред (рис. 3):

1 — воздушный коллектор;

2 — водяной коллектор (соединен с рубашкой охлаждения);

3— главная масляная магистраль для подвода масла к главным подшипникам и деталям шатунно-поршневой группы через форсунку охлаждения поршня.

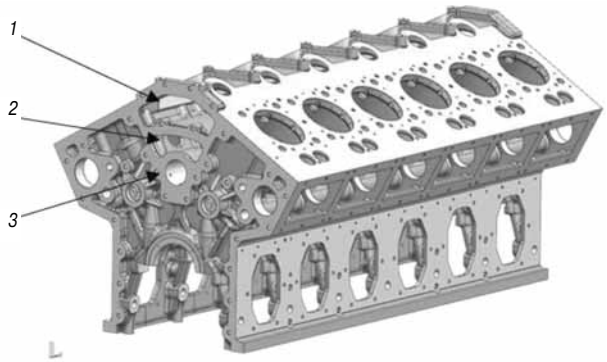


Рис. 3. Картер дизеля ДМ-185

Крышки коренных подшипников крепятся к блоку цилиндров шпильками (по вертикали) и стяжными болтами (по горизонтали). От осевого смещения коленвал удерживается упорными подшипниками, установленными со стороны маховика.

Коленвал выполнен из стали. Шейки коленвала с галтелями проходят ТВЧ-закалку.

Масло к коренным подшипникам подается непосредственно из главного масляного канала, проходящего внутри цилиндрового блока; к шатунным подшипникам масло подается через отверстия коленвала, ведущие от коренных подшипников к шатунным. Положение отверстий подвода масла к шатунным шейкам выбирается таким образом, чтобы каждая шейка получала масло от коренного подшипника, расположенного по отношению к ней с наружной стороны. Это

делается для того, чтобы центральный коренной подшипник, наиболее чувствительный к уменьшению толщины масляной пленки, был освобожден от снабжения маслом еще одного шатунного подшипника.

Шатун — в V-образном двигателе на каждую шатунную шейку работают два шатуна. Шатун штампуется из заготовки, выполненной из высококачественной легированной стали, с последующей механической обработкой. Конструкция шатуна с косым (шлицевым) разъемом обеспечивает возможность выемки поршня вместе с шатуном через втулку цилиндра.

Поршень состоит из двух стальных частей — днища и юбки, изготавливаемых механической обработкой и соединяемых между собой центральным болтом. Оптимальная геометрия камеры в поршне с клапанными карманами была определена моделированием и прошла проверку на одноцилиндровом отсеке. Двухкомпонентная конструкция поршня позволяет упростить геометрию внутреннего канала охлаждения днища, куда масло поступает из форсунки охлаждения. Масло из поршня поступает в канал для смазки подшипника верхней головки шатуна.

Втулка цилиндра сверху упирается в ограничитель, что позволяет уменьшить деформации втулки и упростить механическую обработку картера.

Головка цилиндра выполняется из высокопрочного чугуна (CGI-450). Для ее конструкции характерны центральное расположение форсунки и U-образный поток охлаждающей жидкости. Разработчики ставили своей целью сокращение габаритов двигателя (кулачковые валы вынесены наружу блока), усиление его конструкции и гидродинамическую оптимизацию потока в газовых/воздушных патрубках. На рис. 4 схематически показано устройство и расположение впускного (левый) и выпускного (правый) патрубков.

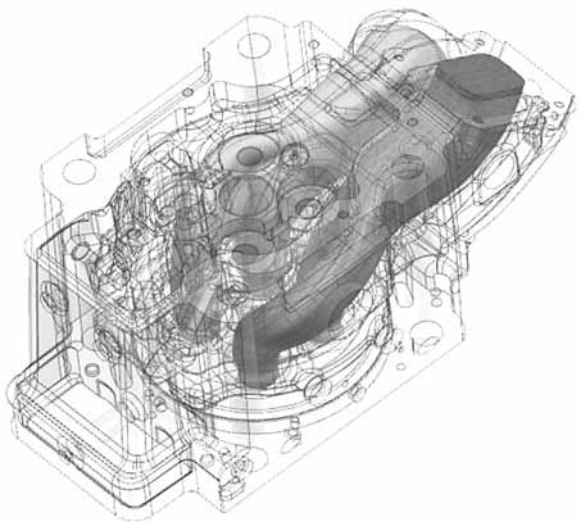


Рис. 4. Схема устройства и расположения газовых/воздушных патрубков двигателя ДМ-185

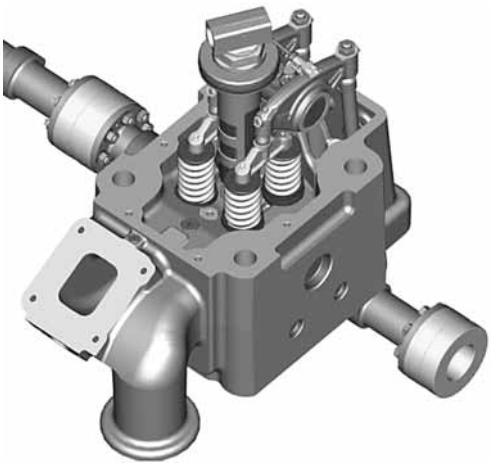


Рис. 5. Размещение форсунки и клапанного механизма



Рис. 6. Рубашка охлаждения головки цилиндра

Привод клапанов осуществляется попарно через общие траверсы и коромысла на оси, размещенной на головке цилиндра (рис. 5).

Концепция двухканального контура охлаждения выбрана из условий наиболее эффективного охлаждения выпускных портов и самых напряженных деталей привода клапанов, а также сохранения максимальной прочности и жесткости головки цилиндра. Для охлаждения форсунки предусмотрен специальный патрубок (рис. 6).

Головка цилиндра крепится к блоку на четырех болтах. Шпильки вворачиваются глубоко в тело картера, чтобы уменьшить растягивающие напряжения в области контакта со шпильками.

Кулачковые валы размещаются снаружи блока, чтобы облегчить к ним доступ для техобслуживания и ремонта. Каждый кулачковый вал собирается из нескольких одинаковых сегментов, что упрощает задачу изготовления кулачкового вала для определенного числа цилиндров.

Топливная система — на рис. 7 показаны компоненты контуров высокого и низкого дав-

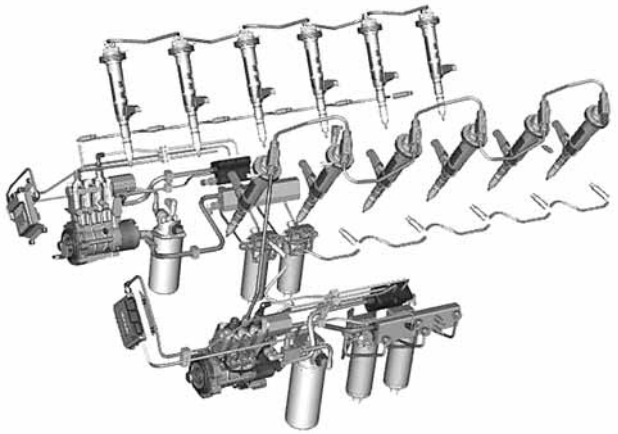


Рис. 7. Компоненты системы топливоподачи высокого и низкого давления двигателя V12R

ления, относящиеся к системе впрыска топлива двигателя V12R. В двигателе применена система common rail модульного типа (MCRS-22 — Modular Common Rail System) фирмы Bosch [1], поддерживающая давление в топливной магистрали до 2200 бар. В соответствии с требованиями классификационных обществ, каждый ряд цилиндров получает питание от отдельной топливной системы.

Топливоподкачивающий насос приводится от насоса высокого давления. Топливо в топливоподкачивающий насос поступает из расходного бака через фильтр предварительной очистки с водяным сепаратором. Между топливоподкачивающим насосом и ТНВД установлен фильтр тонкой очистки, отсеивающий 99,8 % частиц размером 4 мкм и более.

ТНВД существует в 3-, 4- и 5-плунжерных вариантах. Это позволяет максимально гибко адаптировать размер ТНВД к различным версиям двигателя. Объем цикловой подачи задается дозирующим клапаном.

Перед форсунками имеется общая буферная емкость, размер которой примерно в 70 раз превышает максимальный объем цикловой подачи. Все форсунки на стороне высокого давления связаны между собой перемычками через тройники, что позволяет легко приспосабливать систему топливоподачи для любого числа цилиндров. Высокая герметичность системы обеспечивается полным отсутствием статических утечек.

Моделирование для расчетов прочности

Опыт FEV свидетельствует о том, что моделирование прочности имеет решающее значение при создании нового двигателя, и оказывает неоценимую поддержку для команды разработчиков.

При разработке концепции первого прототипа был применен ряд новых и неординарных приемов моделирования, позволивших обеспечить заданные запасы прочности двигателя начиная с первого экспериментального образца. При создании головного образца высоконапряженного двигателя V20 (цилиндровая мощность 300 кВт) была поставлена цель обеспечить:

- необходимую прочность коленвала с диаметром шатунных шеек, оставляющим возможность выемки шатуна через цилиндровую втулку;
- охлаждение, достаточное для работы форсированного двигателя;
- необходимую прочность и жесткость головки цилиндра, с выполнением требований по шуму и вибрации.

Методами численного моделирования решались следующие задачи (более подробное описание решений некоторых из них см. ниже):

- выбор параметров и динамический расчет коленвала с демпфером;
- расчет маховика на разрыв;
- гидродинамический расчет подшипников;
- расчет шатуна методом конечных элементов (МКЭ);
- расчет системы охлаждения двигателя методами трехмерной вычислительной гидродинамики;
- расчет контура охлаждения, в том числе параметров водяного насоса, по одномерной модели;
- расчет контура смазки, включая параметры масляного насоса, по одномерной модели;
- структурный анализ головки цилиндра и блока;
- термомеханический расчет головки цилиндра на прочность;
- расчеты кинематики и динамики привода клапанов;
- расчеты кинематики и динамики зубчатой передачи;
- общий расчет динамики и прочности двигателя.

В качестве исходных параметров для проектирования задаются:

- диаметр втулки цилиндра;
- расстояние между осями соседних цилиндров;
- угол развала блока;
- взаимное смещение правого и левого блоков.

Выполнен анализ вариантов порядка вспышек для нахождения оптимального порядка вспышек (FO), при котором запас прочности коленвала был бы максимальным, а реакции подшипников — минимальными. На рис. 8 показаны шесть разных конфигураций коленвала двигателя V16 (эта версия двигателя наиболее чувствительна с

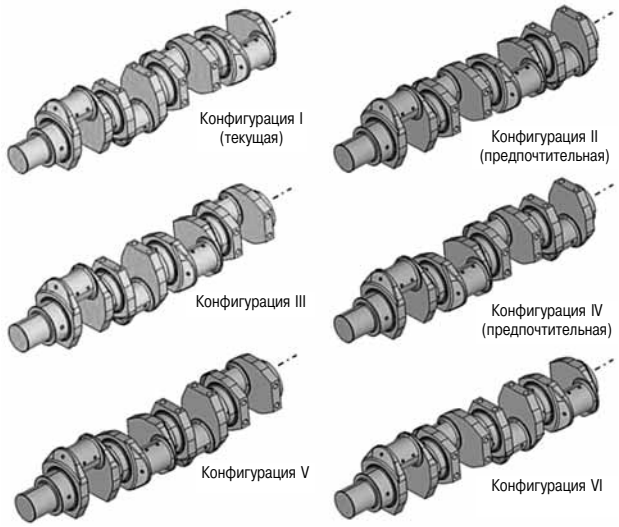


Рис. 8. Возможные конфигурации коленвала двигателя V16

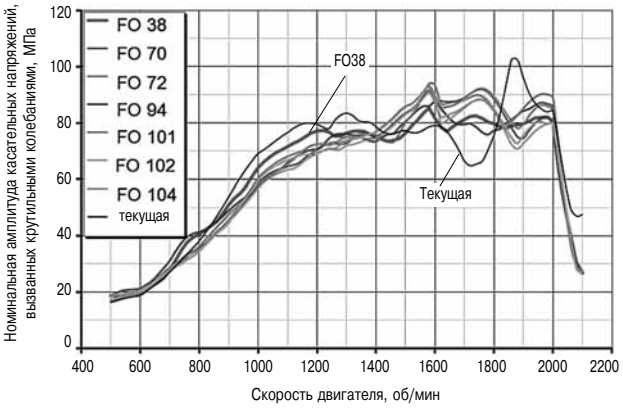


Рис. 9. Номинальные амплитуды напряжений, вызванных крутильными колебаниями (двигатели V16)

точки зрения вибрации), для которого теоретически возможны 768 вариантов FO (по 128 вариантов для каждой конфигурации).

В качестве примера на рис. 9 показаны результаты расчетов крутильных колебаний для различных вариантов порядка вспышек. Очевидно. что предпочтение должно быть отдано порядку вспышек № 38 (конфигурация коленвала II), поскольку он позволяет существенно снизить максимальные амплитуды напряжений, вызванных крутильными колебаниями, по сравнению со стандартным вариантом.

Максимальный диаметр шатунной шейки, который еще позволяет вынуть шатун с поршнем через втулку цилиндра, составляет, согласно расчету, 135 мм. Этот вариант был выбран в качестве окончательного. Гидродинамический расчет подшипников в сочетании с моделированием динамики коленвала позволил определить оптимальную ширину подшипника, обеспечивающую достаточную прочность коленвала.

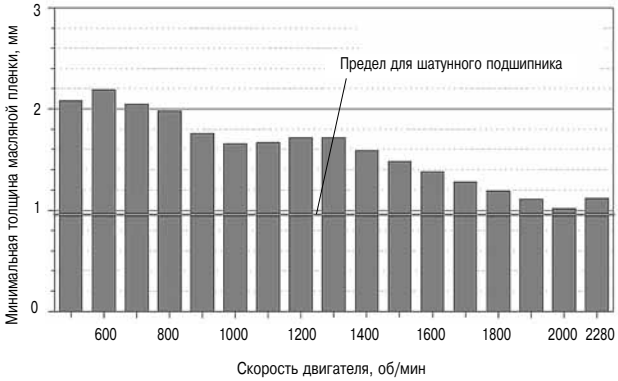


Рис. 10. Толщина масляного слоя в подшипнике большой головки шатуна в функции от скорости двигателя согласно результатам моделирования



Рис. 11. Выбор оптимального положения маслонапорных отверстий в коренных подшипниках:
1 — выбранное положение масляного сверления; *2* — большая длительность подачи при высоком эксцентриситете; *3* — возможные положения масляного сверления при меньших значениях эксцентриситета и длительности подачи

Оптимальная ширина подшипника выбирается из условия, при котором толщина масляного слоя в подшипниках на всех режимах будет больше минимально допустимой (рис. 10).

Режим смазки шатунных подшипников определен гидродинамическим расчетом с учетом оптимального положения маслонапорных отверстий в шейках коренных подшипников на основе оценки эксцентриситета и длительности подачи масла (рис. 11).

Охлаждение двигателя

На стадии рабочего проектирования предстояло выбрать схему охлаждения двигателя, которая бы позволила поддерживать в заданных пределах локальные значения температуры в определенных точках. Наиболее критичными в этом смысле

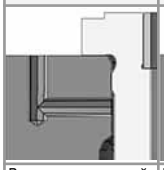
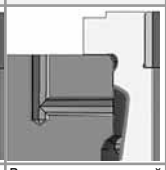
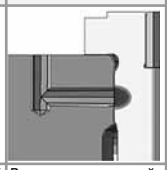
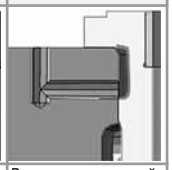
Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
			
Втулка с радиальной опорой уменьшенной высоты	Втулка с радиальной опорой уменьшенными высотой и толщиной верхней рубашки	Втулка с повышенной скоростью циркуляции в районе радиальной опоры	Втулка с повышенной скоростью циркуляции выше радиальной опоры
Охлаждение в районе 1-го поршневого кольца, поршень в ВМТ	Охлаждение в районе 1-го поршневого кольца лучше	Охлаждение в районе 1-го поршневого кольца еще лучше	Охлаждение в районе 1-го поршневого кольца наилучшее

Рис. 12. Рассматриваемые варианты охлаждения цилиндровой втулки

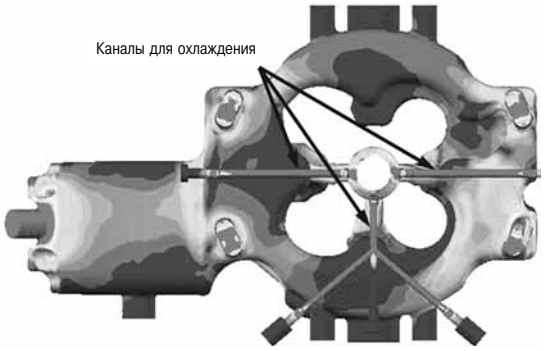


Рис. 13. Рубашка охлаждения головки цилиндра (вид снизу)

деталями форсированного двигателя являются втулка цилиндра и огневое днище поршня. Предельно допустимая температура втулки цилиндра в районе первого поршневого кольца при нахождении поршня в ВМТ составляет 220 °С. Были рассчитаны четыре варианта схемы охлаждения втулки цилиндра в поисках оптимального решения, обеспечивающего соответствие данному критерию.

В итоге был выбран вариант 4 (рис. 12) с максимальной скоростью теплоносителя.

Рубашка охлаждения головки цилиндра делится на две части — верхнюю и нижнюю, что позволяет обеспечить максимально возможную скорость потока, охлаждающего огневое днище поршня. Кроме того, предусмотрены сверления для прохода воды между седлами впускных и выпускных клапанов (рис. 13).



Рис. 14. Рубашка охлаждения головки цилиндра (вертикальный разрез)

Поток теплоносителя из нижней рубашки охлаждения, огибая форсунку, попадает в верхнюю рубашку охлаждения, что позволяет поддерживать температуру головки цилиндра в районе форсунки в допустимых пределах (рис. 14).

Термомеханический расчет

Полученные в результате моделирования тепловые и механические нагрузки используются в расчетах многоцикловой (HCF) и малоцикловой

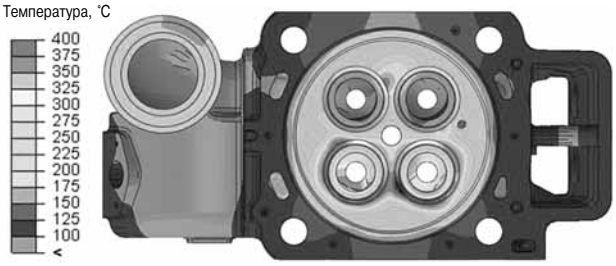


Рис. 15. Распределение температур в головке цилиндра по результатам моделирования

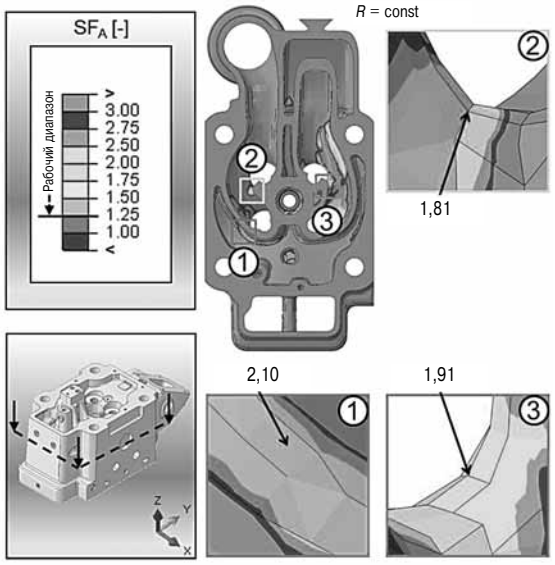


Рис. 16. Моделирование малоцикловой усталости

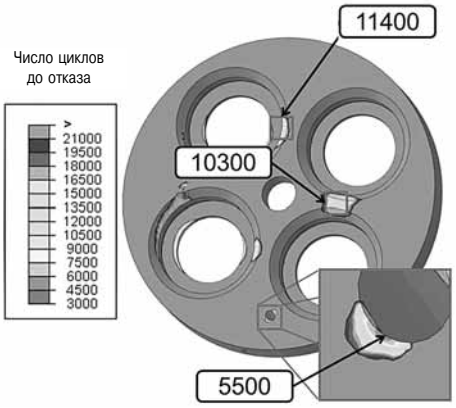


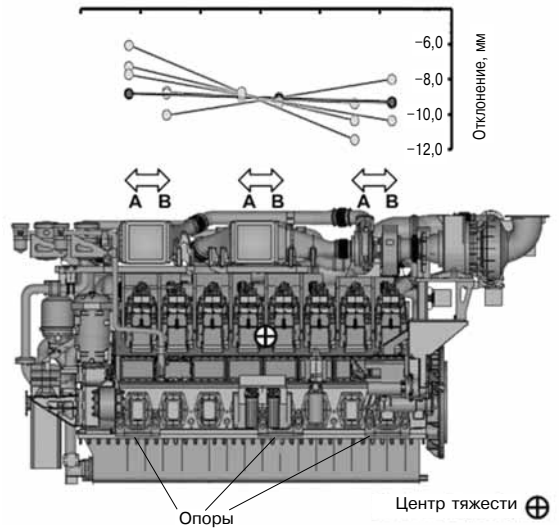
Рис. 17. Моделирование многоцикловой усталости

(LCF) усталости. На рис. 15 показано распределение температур в головке цилиндра. Температура достигает своего максимума — 420 °С в районе выпускных клапанов.

Чугун CGI-450, из которого выполнена головка, позволяет обеспечить заданный коэффициент запаса усталостной прочности для HCF 1,25 (из условия постоянства коэффициента асимметрии цикла напряжений R = const), а также заданное число циклов LCF – 5000 циклов (рис. 16 и 17).

Динамический расчет

В завершение был проведен расчет динамики двигателя, чтобы с учетом расположения и характеристик опор убедиться в том, что параметры вибрации соответствуют самым жестким требованиям классификационных обществ. На основании анализа изгибных напряжений в статике было определено оптимальное расположение опор двигателя из условия минимизации параметров смещения и наклона (рис. 18).



- Деформация опор в мм, измеряемая для каждых из возможных вариантов установки двигателя.
- Влияние схемы расположения опор на относительные отклонения центров главных подшипников и на изменения зазора в подшипниках оказалось незначительным.
- Отмечено существенное влияние схемы расположения опор на абсолютные смещения двигателя.
- Схема размещения опор двигателя:
  Опора 1 в положении А
  Опора 2 в положении В
  Опора 3 в положении В
  оказались оптимальной с точки зрения смещения всего двигателя

Рис. 18. Расположение опор двигателя

По результатам моделирования динамики двигателя как многомассовой системы (MBS) определены скорости перемещения элементов поверхности в критических точках (рис. 19). Эти скорости находятся в пределах норм, установленных Российским морским регистром.

Моделирование термодинамики

В процессе проектирования методами термодинамического моделирования определялись:

- геометрия камеры сгорания (3D KIVA);
- характеристики турбокомпрессора;
- характеристики воздухоохладителя.

Было проведено детальное моделирование для определения закона движения клапанов и для выбора параметров турбокомпрессора двигателей V12R, V16R и V12M, которые станут первыми опытными образцами семейства ДМ-185. В целях максимальной унификации была также поставлена задача спроектировать стандартный сегмент кулачкового вала, общий для всех версий двигателя. Для того чтобы уложиться в предельные значения выбросов NO_x, был выбран цикл Миллера с фиксированными фазами газораспределения. При использовании одноступенчатого наддува глубина цикла Миллера будет зависеть от скорости двигателя, поскольку ее увеличение при фиксированных фазах газораспределения будет сопровождаться падением коэффициента наполнения цилиндра. Отсюда следует, что при заданном значении коэффициента избытка воздуха при полной нагрузке $\lambda = 2{,}0$ в двигателях с меньшей номинальной частотой вращения может быть использован более глубокий цикл Миллера, тогда как в двигателях с большей номинальной частотой вращения следует использовать умеренный цикл Миллера, поскольку возможности повышения давления воздушного заряда при одноступенчатом наддуве ограничены. Кроме того, по мере снижения нагрузки глубина цикла Миллера также должна снижаться по сравнению с номиналом (т. е. при полной нагрузке). Поэтому были исследованы возможности применения легкого, среднего и усиленного вариантов цикла Миллера для оптимизации рабочего процесса.

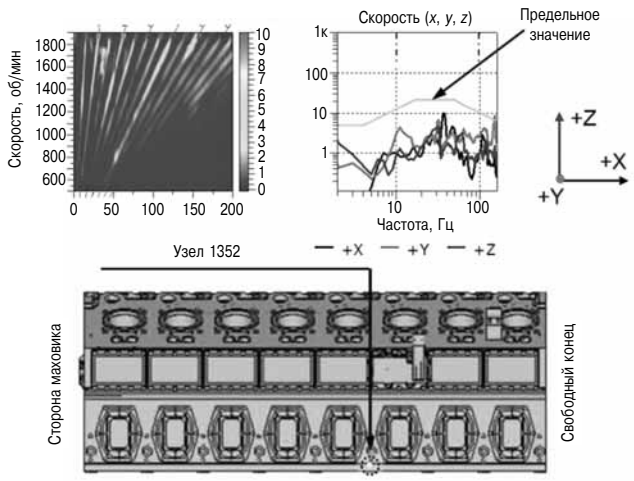


Рис. 19. Моделирование динамики двигателя как многомассовой системы (MBS)

В качестве базового для всех вариантов двигателя был принят «средний цикл Миллера», при котором закрытие впускного клапана происходит при угле 537 град ПКВ после ВМТ. Для ограничения температуры отработавших газов на входе в турбину было введено перекрытие клапанов, равное 1,5 мм. Были также исследованы

«усиленный цикл Миллера» (угол закрытия впускного клапана 527 град ПКВ после ВМТ) и «легкий цикл Миллера» (угол закрытия впускного клапана 547 град ПКВ после ВМТ). Соответствующие настройки турбокомпрессора были определены с помощью 1-D модели газообмена.

Двигатель V16R с номинальной частотой вращения 1800 об/мин и максимальным средним эффективным давлением 27 бар оборудован двухступенчатой системой наддува, что должно обеспечить заданное значение удельной мощности. В качестве примера на рис. 20 приведены соответствующие расчетные показатели рабочего процесса. «Средний цикл Миллера» позволяет достичь целевого показателя $\lambda = 2{,}0$ при 100 % нагрузки, и при этом обеспечить достаточный коэффициент избытка воздуха при частичных нагрузках. Управление турбиной высокого давления осуществляется с помощью перепуска, который защищает турбокомпрессор от превышения скорости. Предельно допустимые значения максимального давления сгорания (230 бар) и температуры перед турбиной (650 °С) также не были превышены. Для эффективной защиты от превышения скорости ступени высокого давления турбокомпрессора необходимо увеличить проходное сечение заслонки газового перепуска.

Как видно из рис. 20, «усиленный цикл Миллера» приводит к снижению выбросов NO_x, но коэффициент избытка воздуха на частичных нагрузках при этом падает, что увеличивает дымность отработавших газов. «Легкий цикл Миллера» увеличивает коэффициент избытка воздуха на частичных нагрузках, но выбросы NO_x при этом возрастают во всем диапазоне нагрузок. Таким образом, оптимальным выбором для двигателя V16R оказывается «средний цикл Миллера». Что касается двигателя V12M, то здесь эффективность «среднего цикла Миллера», согласно результатам моделирования, оказалась более заметной.

Номинальная частота вращения двигателя V12M — 1900 об/мин, BMEP = 24 бар, двигатель оборудован одноступенчатым турбокомпрессором с фиксированной геометрией соплового аппарата. Расчетные показатели данного варианта двигателя показаны на рис. 21. «Средний цикл Миллера» позволяет достичь целевого показателя $\lambda = 2{,}0$ при 100 % нагрузки, обеспечивая при этом достаточный коэффициент избытка воздуха при частичных нагрузках. Предельно допустимое давление сгорания 230 бар не превышено, но температура перед турбиной близка к 650 °С.

Как видно из рис. 21, «легкий цикл Миллера» дает увеличение выбросов NO_x на 25 %, но позволяет поднять коэффициент избытка воздуха как на полной, так и на частичных нагрузках, что ведет к снижению температуры газов перед турбиной и небольшому уменьшению расхода топлива на частичных нагрузках. Следовательно,

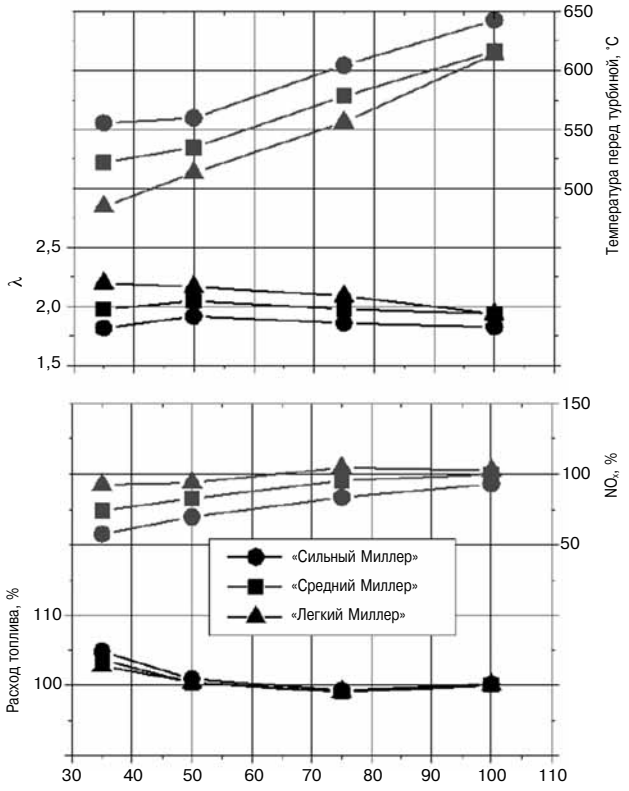


Рис. 20. Расчетные показатели двигателя V16R

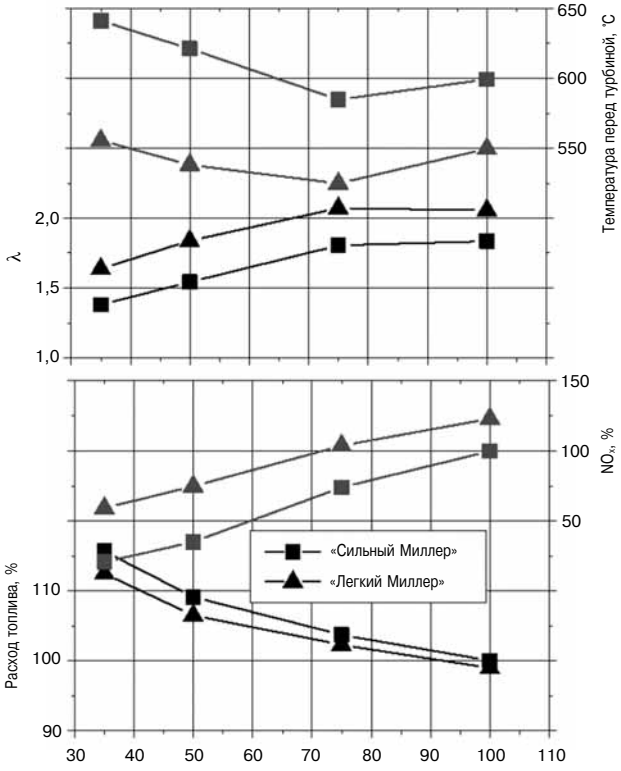


Рис. 21. Расчетные показатели двигателя V12M

для двигателя V12M «легкий цикл Миллера» является оптимальным.

В дальнейшем были проведены эксперименты на одноцилиндровом отсеке, показавшие, что целевые показатели по NO_x, коэффициенту избытка воздуха и температуре могут быть достигнуты путем применения «легкого цикла Миллера» для всех трех вариантов двигателя. Это позволило использовать для всех указанных вариантов одну и ту же конфигурацию деталей и узлов, непосредственно участвующих в рабочем процессе. Настройки турбокомпрессора также проверялись путем моделирования с использованием одномерной модели газообмена. Для варианта V12R сопловой аппарат турбины был перенастроен на больший массовый расход газов с тем, чтобы обеспечить достаточный запас для турбины по защите от разноса. Настройки турбокомпрессора для вариантов V16R и V12M не менялись.

Выбор поставщиков. Комплектация и сборка двигателя

Первыми были заказаны покупные изделия для опытных образцов V12R, V16R и V12M. Основными факторами при выборе поставщиков комплектующих являются стоимость изделий, их качество и сроки доставки. В качестве поставщиков комплектующих для опытных образцов выбирались только производители с безупречной репутацией, имеющие большой технический опыт в данной области. При необходимости для сокращения времени доставки выбирались местные поставщики. Все они входят в базу данных FEV и имеют большой опыт в качестве поставщиков узлов и деталей для опытных образцов двигателей всех типов. Таким образом, поставщики узлов и деталей для опытных образцов двигателей могут быть разделены на две группы: фирмы из Германии, специализирующиеся на поставках комплектующих для опытных образцов; и поставщики серийной продукции из России, стран Азии и ЕС (рис. 22).

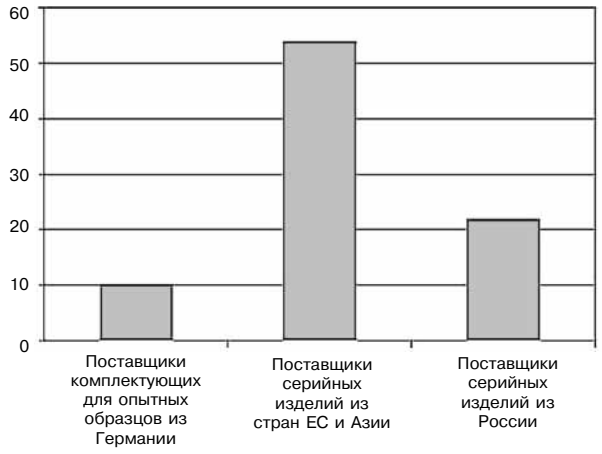


Рис. 22. Обзор поставщиков



Рис. 23. Двигатель V16R

На рис. 23 показан общий вид опытного образца двигателя V16R, представленного на выставке INNOPROM-2015 в Екатеринбурге.

Испытания двигателя

Для доводки рабочего процесса и проверки основных компонентов на прочность фирмой FEV был изготовлен одноцилиндровый отсек (single cylinder engine — SCE) создаваемого двигателя. После доводки рабочего процесса на одноцилиндровом отсеке SCE ее результаты были использованы при создании многоцилиндрового двигателя (MCE), использованного для дальнейшей отработки изделия.

Испытания одноцилиндрового отсека

Данные испытания проводились для уточнения параметров рабочего процесса перед началом изготовления первых полноразмерных машин. Для этого был создан отсек SCE с конструктивными параметрами семейства ДМ-185. Отсек был

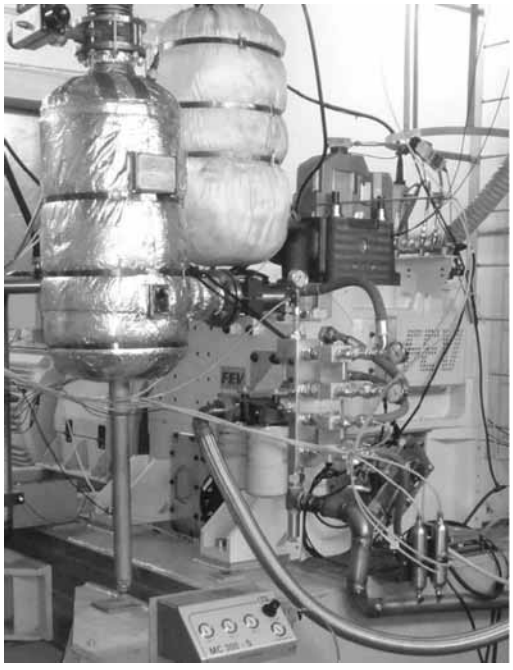


Рис. 24. Опытный одноцилиндровый отсек на стенде УДМЗ

Таблица 3

Предельно допустимые выбросы NO_x и PM для разных применений двигателя

	Варианты двигателя (применение)		
	V12R тепловозный	**V16R тепловозный**	**V12M судовой**
Цилиндровая мощность	125 кВт при 1500 об/мин	234 кВт при 1800 об/мин	201 кВт при 1900 об/мин
Выбросы NO_x в соответствующем испытательном цикле	< 6,0 г/кВт·ч (EC Stage III A)	< 7,4 г/кВт·ч (EC Stage III A)	< 7,75 г/кВт·ч (ИМО II)
Выбросы PM в соответствующем испытательном цикле	< 0,2 г/кВт·ч	< 0,2 г/кВт·ч	(невидимый дым)

установлен на новом испытательном стенде УДМЗ, поставленном фирмой FEV. Испытательное оборудование включало системы топливоподачи и кондиционирования, систему управления испытательным стендом и систему измерения вредных выбросов (рис. 24).

На основании результатов 3D-моделирования гидродинамики были разработаны три варианта кулачкового вала и несколько вариантов сопел распылителей, которые были заказаны и получены от поставщиков. По результатам моделирования и испытаний для каждого варианта двигателя подбиралась оптимальная конфигурация распылителя. К числу варьируемых параметров относились: количество сопловых отверстий, угол распыла и расход среды с отклонениями на один шаг в каждом направлении по отношению к базовой конфигурации. Все варианты форсунки были протестированы, при этом замерялись уровни вредных выбросов (главным образом, PM и NO_x) и расход топлива. Целевые показатели выбросов твердых частиц (PM) и NO_x приведены в табл. 3.

Форсунка

Пример оценки производительности форсунки показан на рис. 25. Сравнивались пять вариантов форсунки для двигателя V12R при номинальной мощности с расходом (HFR) от 2200 до 3800 см^3/30 с.

Варьировался угол начала впрыска (beginning of injection — BOI) при 1500 об/мин, IMEP=19,0 бар. При этом давление в системе топливоподачи (1600 бар) и давление наддува (3,9 бар) поддерживались постоянными. Наилучшие результаты показала форсунка с минимальным расходом (2200 см^3/30 с). Она позволила уложиться в нормы EC Stage IIIA по NO_x при минимальных выбросах PM и удовлетворительном расходе топлива. Форсунки с более высокими значениями расхода топлива оказались хуже с точки зрения баланса между выбросами NO_x и PM из-за менее благоприятных условий смесеобразования. Две форсунки с расходами соответственно 2600 и 2900 см^3/30 с показали приемлемый уровень выбросов PM, при этом выбросы NO_x не превышали 6 г/кВт·ч, а расход топлива оставался достаточно низким. Принимая во внимание результаты испытаний SCE с другими версиями двигателя, форсунка с расходом 2900 см^3/30 с была признана оптимальным вариантом.

Углы газораспределения (кулачковый вал)

На рис. 26 показаны результаты сравнения показателей двигателя V12M при работе по «среднему» и «легкому» вариантам цикла Миллера (1900 об/мин / IMEP=24,1 бар).

Как видим, при конфигурации кулачкового вала, соответствующего «среднему циклу Миллера», температура отработавших газов достигает

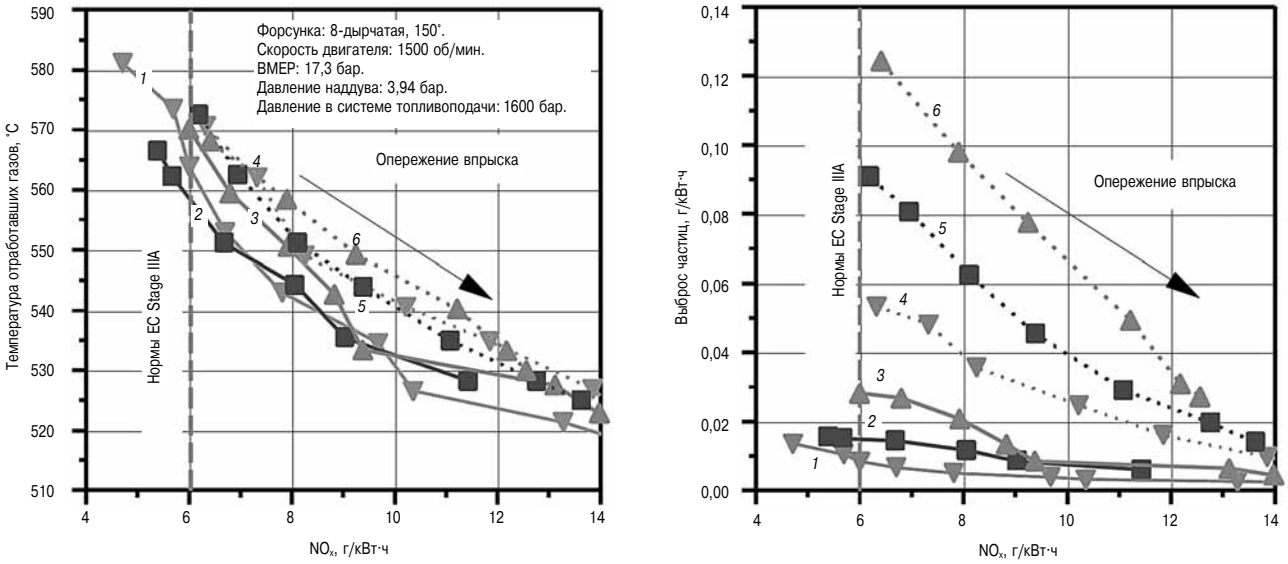


Рис. 25. Оценка параметров форсунки V12R на номинальной мощности:
1 — HFR 2200 см^3/30 с; *2* — HFR 2600 см^3/30 с; *3* — HFR 2900 см^3/30 с;
4 — HFR 3200 см^3/30 с; 5 — HFR 3500 см^3/30 с; 6— HFR 3800 см^3/30 с;

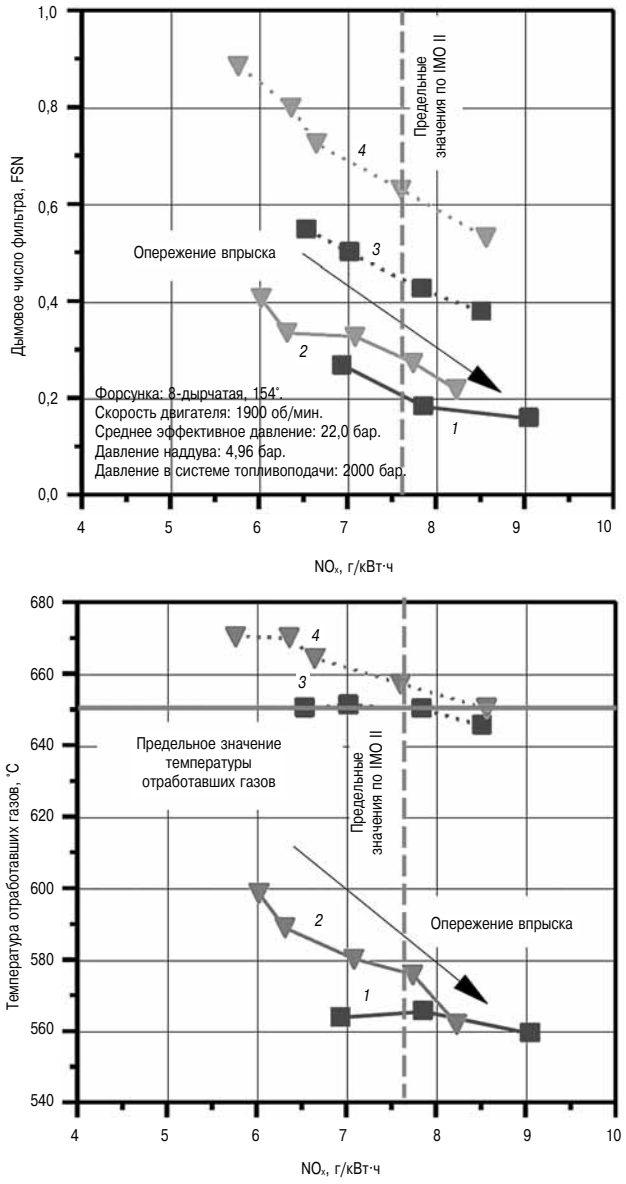


Рис. 26. Оценка кулачкового вала, двигатель V12M при номинальной мощности:

1 — кулачковый вал для «легкого цикла Миллера», давление в системе common rail 2000 бар; *2* — кулачковый вал для «легкого цикла Миллера», давление в системе common rail 1800 бар; *3* — кулачковый вал для «умеренного цикла Миллера», давление в системе common rail 2000 бар; *4* — кулачковый вал для «умеренного цикла Миллера», давление в системе common rail 1800 бар

предельно допустимого значения (650 °С). При работе по «легкому циклу Миллера» массовый расход воздуха при постоянном давлении наддува растет по мере увеличения подъема клапана и угла перекрытия, что способствует росту коэффициента избытка воздуха и значительному снижению температуры ОГ. При этом рост коэффициента избытка воздуха позволяет снизить температуру отработавших газов на 70–80 °С. Кроме того, уменьшаются выбросы PM. Сопутствующий рост выбросов NO_x может быть компенсирован более поздним началом впрыска или регулированием давления в системе common rail.

Систематические испытания на отсеке позволили выявить оптимальную конфигурацию, общую для всех трех вариантов двигателя, которая обеспечивает одновременное достижение целевых показателей по всем видам выбросов и расходу топлива. Параметры оптимальной конфигурации — «легкий цикл Миллера» с расходом через форсунку HFR = 2900 см^3/30 с. Использование общей конфигурации для всех вариантов двигателя является разумным компромиссом, позволяющим снизить производственные расходы, тогда как индивидуальная оптимизация по каждому двигателю оказывается менее эффективной.

Испытания многоцилиндрового двигателя

Первым на новый стенд УДМЗ для термодинамических испытаний был поставлен двигатель V12R (рис. 27). В разных точках двигателя было установлено большое количество датчиков температуры и давления, в том числе датчики давления газов во всех двенадцати цилиндрах.

На рис. 28 показаны скоростные характеристики для различных вариантов нагружения тепловозного двигателя в установившихся режимах, а также ограничительные кривые для переходных режимов. Определены три характерных режима (М1, М3) для испытательного цикла *F* по ИСО 8178/4 и соответствующим условиям измерения вредных выбросов. Первые результаты испытаний двигателя V12R свидетельствуют о том, что намеченные целевые показатели достигнуты.

Следующие шаги (планируемые)

Три первых варианта двигателя (V12R, V16R и V12M) будут подвергнуты тщательным и всесторонним испытаниям для подтверждения того, что достигнуты заданные целевые показатели по функциональности и надежности семейства двигателей ДМ-185, а также по вредным выбросам

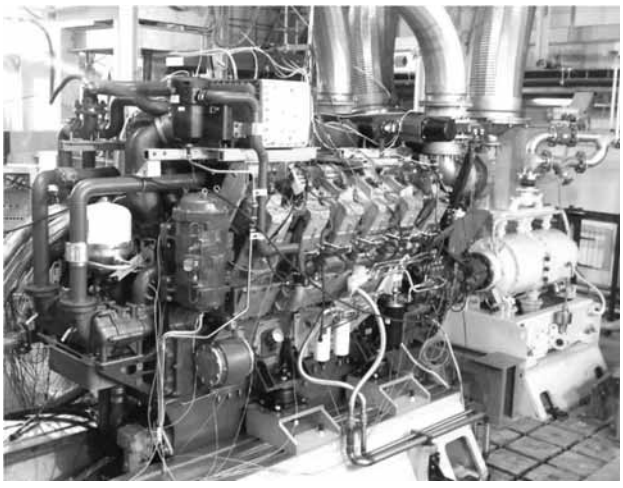


Рис. 27. Двигатель V12R на стенде для термодинамических испытаний

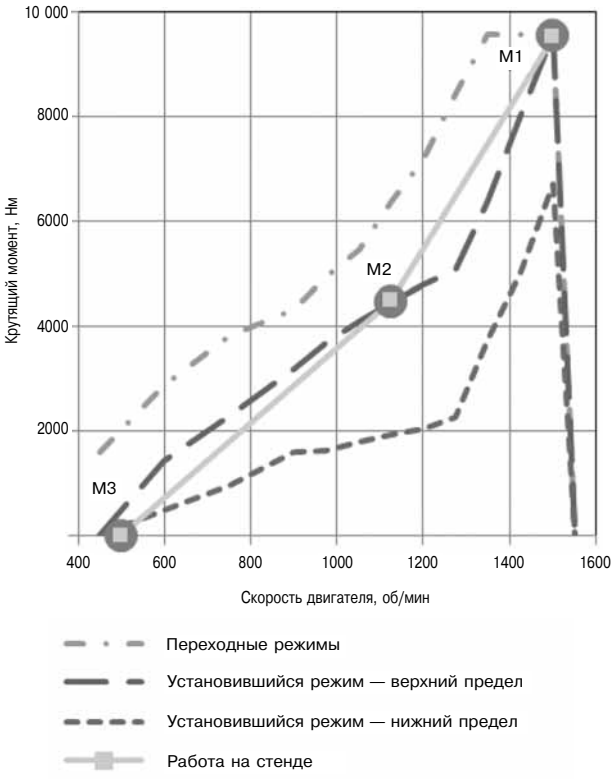


Рис. 28. Скоростные характеристики двигателя V12R при полной нагрузке

и расходу топлива. В частности, будут проведены следующие натурные испытания:

Испытания на отсеке:

➢ Измерения температур (головок цилиндров, клапанов, поршней).

➢ Испытания поршней на истирание.

➢ Испытания для оптимизации зазора между поршнем и втулкой.

Испытания на многоцилиндровом двигателе:

➢ Функциональные испытания демпфера крутильных колебаний.

➢ Функциональные испытания системы охлаждения.

➢ Функциональные испытания системы смазки.

➢ Испытания системы смазки на аэрацию масла.

➢ Измерения температуры в подшипниках.

➢ Снятие вибрационных характеристик двигателя в целом.

➢ Испытания на малой скорости холостого хода.

➢ Измерения расхода масла.

➢ Испытания системы вентиляции картера.

➢ Динамические испытания зубчатой передачи (гитары шестерен.)

➢ Динамические испытания привода клапанов.

➢ Ресурсные испытания.

Заключение

В 2013 г. между Уральским дизель-моторным заводом и FEV GmbH был подписан контракт на создание семейства современных двигателей для тепловозов, судов, карьерных самосвалов и дизель-генераторов. Всего в семейство ДМ-185 входят шестнадцать типов двигателей мощностью от 1500 до 3800 кВт с возможностью дальнейшей форсировки до 6000 кВт. Число цилиндров в двигателях — от шести до двадцати. Характерными чертами новой машины являются высокая цилиндровая мощность (до 234 кВт), низкий удельный расход топлива, а также низкие значения вредных выбросов (EU IIIA / IMO2), достигнутые без применения рециркуляции отработавших газов и газоочистки.

Семейство ДМ-185 изначально создавалось на единой платформе, что позволило существенно снизить себестоимость двигателей благодаря максимальной унификации.

Все принципиальные конструктивные решения были приняты по результатам моделирования рабочего процесса, проверены и оптимизированы на одноцилиндровом отсеке, что позволило достичь целевых показателей по удельной мощности, расходу топлива и вредным выбросам.

На FEV и УДМЗ были укомплектованы и построены три двигателя (тепловозный V12, тепловозный V16 и главный судовой V12), после чего начались испытания многоцилиндровых двигателей МСЕ на специально созданных для этого стендах УДМЗ. Первые результаты испытаний тепловозного дизеля V12 на стенде УДМЗ (Екатеринбург) подтвердили достижение целевых показателей для полной нагрузки. После окончательного подтверждения намеченных целевых показателей по вредным выбросам и расходу топлива все варианты двигателей будут поставлены на интенсивные механические и ресурсные испытания перед запуском в серийное производство, намеченным на конец 2016 г.

Литература

1. KENDLBACHER C. et al. The 2200 bar Modular Common Rail Injection System for Large Engines Diesel & HFO Engines. CIMAC Conference 2013.

УДК 621.43

Стратегия развития поршневого двигателестроения России на период до 2020 года (продолжение) // Двигателестроение. — 2016. — № 3. — С. 3—15.

Ключевые слова: поршневые ДВС, импортозамещение, развитие специализированных производств, компоненты литейного производства, топливная аппаратура, агрегаты наддува, детали цилиндро-поршневой группы, оборудование для снижения вредных выбросов.

Выполнен анализ текущего состояния и перспектив развития специализированных производств компонентов для поршневых ДВС в Российской Федерации. Показано, что для реализации программы импортозамещения необходима модернизация литейного производства, организация производства топливных систем с электронным управлением, эффективных агрегатов наддува со степенью повышения давления 5—6 в одной ступени, деталей ЦПГ, материалов и оборудования для снижения вредных выбросов. Определены потребности поршневого двигателестроения в производстве компонентов.
Табл. 8. Ил. 2.

УДК 621.436

Гаврилов В.В. Принципы организации и показатели качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле // Двигателестроение. — 2016. — № 3. — С. 16—22.

Ключевые слова: смесеобразование в дизеле, критерии качества смесеобразования, система критериев качества, параметры топливной системы, конструкция камер сгорания.

Показана ключевая роль смесеобразования в комплексе внутрицилиндровых процессов дизеля, включая процесс горения топлива. Выполнен анализ известных критериев оценки качества смесеобразования, показана их разрозненность и частный характер. Предложена иерархическая система критериев качества смесеобразования, в которой ключевым критерием является удельный индикаторный расход топлива. С использованием предложенной системы критериев выполнена постановка задачи, решение которой позволяет оптимизировать сочетание параметров топливной аппаратуры и формы камеры сгорания. Библ. 12.

УДК 621.436

Новиков Л.А. Корчинский В.С. Оценка дополнительных затрат судовладельцев при использовании SCR-технологии на судах // Двигателестроение. — 2016. — № 3. — С. 23—31.

Ключевые слова: судовые дизели, вредные выбросы, окислы азота, зоны контроля выбросов, каталитическое восстановление, эксплуатационные затраты судовладельцев.

Выполнен анализ причин повышения эксплуатационных затрат судовладельцев при использовании SCR-технологии на судах, которая рассматривается как основное техническое решение для снижения выбросов NO_x до уровня требований стандарта IMO Tier 3. Показано, что применение SCR-технологии в судовых условиях связано с возникновением технологических и эксплуатационных рисков, последствия которых почти в два раза повышают эксплуатационные затраты судовладельцев при работе судов в зонах контроля выбросов. Табл. 8. Ил. 2. Библ. 10.

УДК 621.436

Развитие модельного ряда двигателей ПАО «Звезда» и ООО УДМЗ (материалы конгресса CIMAC 2016)
// Двигателестроение. — 2016. — № 3. — С. 32—55.

Ключевые слова: семейство двигателей «Пульсар-150» производства ПАО «Звезда», семейство двигателей ДМ-185 производства ООО УДМЗ, типоразмеры и мощностные ряды, особенности конструкции, системы управления и самодиагностики, рабочие параметры, вредные выбросы с отработавшими газами, результаты испытаний опытных образцов.

В материалах 28-го Конгресса СИМАК, проходившем в июне 2016 г. в Хельсинки, российские заводы ПАО «Звезда» (Санкт-Петербург) и ООО УДМЗ (Екатеринбург) представили доклады с результатами разработки опытных образцов многоцелевых двигателей нового поколения. Двигатели предназначены для применения в стационарной энергетике, судостроении, на железнодорожном и технологическом транспорте (тепловозы, большегрузные самосвалы). Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база», подпрограмма «Создание и организация производства в Российской Федерации в 2011—2015 гг. дизельных двигателей и их компонентов нового поколения». Приведены описания особенностей конструкции, систем и агрегатов, значений рабочих параметров и вредных выбросов, полученных при проведении испытаний головных опытных образцов двигателей семейства «Пульсар-150» (ПАО «Звезда») и семейства ДМ-185 (ООО УДМЗ). Табл. 5. Ил. 52. Библ. 1.

UDK 621.43

Road Map for the Development of Reciprocating Engines in Russia up to Year 2020 (continued) // Dvigatelestroyeniye. — 2016. — № 3. — P. 3—15.

Keywords: Reciprocating engines, import replacement, development of dedicated industrial facilities for engine component production, foundry components, fuel injection systems, turbochargers, combustion system components, emission-abatement equipment.

The article presents review of dedicated industrial facilities for engine component production in Russian Federation, its current state and perspective. It is shown that modernization of existing foundry facilities, launching of new facilities for manufacturing electronically-controlled fuel injection systems, efficient turbochargers capable to provide $\pi_к$ = 5—6 per stage, combustion system components, new materials and emission-abatement equipment, are key prerequisites for import replacement program implementation. Furthermore, demand for particular engine components is evaluated.
2 ill., 8 tables.

UDK 621.436

Gavrilov V.V. Air-Fuel Mixing in Marine Diesel Engine: Concept and Quality Metrics // Dvigatelestroyeniye. — 2016. — № 3. — P. 16—22.

Keywords: air-fuel mixing in diesel engine, quality metrics, fuel injection system parameters, combustion chamber geometry.

Air-fuel mixing is shown as a key factor of combustion process. Known combustion quality criteria are shown as largely inadequate because of their insufficient generality and fragmentation. The author offers a hierarchical system of combustion quality criteria, wherein ISFC is considered as the key criterion. Based on the offered quality criteria system an optimization problem is stated, whose solution would allow selection of optimum parameters of fuel injection components and combustion chamber.
12 ref.

UDK 621.436

Novikov L.A. and Korchinsky V.S. Evaluation of Shipowner's Additional Expences Involved in SCR Technology Implementation // Dvigatelestroyeniye. — 2016. — № 3. — P. 23-31.

Keywords: marine diesel engines, emissions, nitrogen oxides, emission control areas, catalytic reduction, operating costs.

The article discusses causes of operating costs grow related to use of SCR, commonly considered to be the first choice technology for reducing NO_x emission to IMO Tier 3 requirements. Said technology in marine environment is shown as fraught with technical and operational risks, which might results in operating costs in ECA zones being twice as high as without SCR. 8 tables, 2 ill., 10 ref.

UDK 621.436

Development of New ZVEZDA and UDMZ Engine Families (based on CIMAC 2016 papers) // Dvigatelestroyeniye. — 2016. — № 3. — P. 32—55.

Keywords: ZVEZDA's diesel engine family «PULSAR-M150», UDMZ's DM-185 diesel engine family, engine size and power ranges, design features, control & self-test systems, performance targets, emission targets, operating parameters, prototype engine tests.

The agenda of 28th CIMAC Congress held on June 6—10, 2016 in Helsinki included two papers presented by Russian engine builders PAO ZVEZDA, Saint-Petersburg, and UDMZ, Yekaterinburg, disclosing the results of the development of respective new-generation multi-purpose diesel engine families. Scope of new engines' applications covers power generation, marine propulsion, raiway transport (locomotives) and off-road machinery (mine dump trucks etc.). Both engine families have been developed in the framework of federal special-purpose program, under which the government of the Russian Federation approved the subprogram «Development and producrion organization of a new diesel engine families and their components within 2011—2015». The papers presented at 28th CIMAC Congress cover engine design features, auxiliary systems and units, performance and emission targets, as well as the results of testing ZVEZDA's PULSAR-150 and UDMZ's DM-185 prototypes.
5 tables, 52 ill., 1 ref.