

# ДВИГАТЕЛЕ СТРОЕНИЕ

№ 3 (253)  
июль–сентябрь 2013

Санкт-Петербург

## РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

## ANALYSES, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF ENGINES

*В.А. Сорокин*  
Производство современных среднеоборотных  
судовых дизелей

**3** *Sorokin V.A.*  
Modern Medium Speed Marine Diesel Engines

*Камалтдинов В.Г., Драгунов Г.Д., Марков В.А.*  
Прогнозирование показателей рабочего цикла HCCI  
двигателя с наддувом при различных нагрузках  
и частотах вращения коленчатого вала

**9** *Kamaltdinov V.G., Dragunov G.D. and Markov V.A.*  
Supercharged HCCI Engine: Prediction of Combustion  
Parameters at Varying Load and Speed

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

## AUTOMATION AND DIAGNOSTICS

*Обозов А.А., Таричко В.И.*  
Совершенствование технического диагностирования  
автомобильных двигателей на основе применения  
методов статистической теории распознавания образов

**16** *Obozov A.A. and Tarichko V.I.*  
Stochastic Image Recognition Theory as a Means to  
Improve Technical Diagnosis of Car Engines

## КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

## CONSTRUCTION MATERIALS

*Марукович Е.И., Бевза В.Ф., Груша В.П.,  
Богданов Б.И., Красный В.А.*  
Литье полых цилиндрических заготовок из чугуна  
методом пристеночной кристаллизации

**23** *Marukovich E.I., Bevza V.F., Grusha V.P.,  
Bogdanov B.I. and Krasny V.A.*  
Moulding of Hollow Cast Iron Bars with Wall Crystal-  
lization Method

## ИПИ-ТЕХНОЛОГИИ

## GALS TECHNOLOGIES

*Терегулов Т.И., Черноусов А.А.*  
Программный пакет ALLBEA: расчетный анализ  
и синтез характеристик газообмена  
дизеля с турбонаддувом

**28** *Teregulov T.I. and Chernousov A.A.*  
ALLBEA Program Package: Analysis and Synthesis  
of Gas Exchange Characteristics in Turbocharged Engine

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ДВИГАТЕЛЕЙ

## MAINTENANCE AND REPAIR ISSUES

*Ефремов Б.Д., Рок Д.М.*  
Система управления двигателем при питании  
сжиженным газом

**33** *Efremov B.D. and Rock D.M.*  
Control System for Engine Firing Liquefied Gas

## ИСТОРИЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ. ЛИЧНОСТИ И СОБЫТИЯ

## ENGINE BUILDING HISTORY. PERSONALITIES AND EVENTS

*Андрусенко О.Е., Матвеев Ю.И.*  
Необычный автограф Рудольфа Дизеля  
(социальное мировоззрение изобретателя)

**36** *Andrusenko O.E. and Matveyev Yu.I.*  
Rudolf Diesel's Unusual Autograph  
(Inventor's Social Weltanschauung)

## НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

## ENGINE BUILDING NEWS

*Мельник Г.В.*  
Развитие двигателестроения за рубежом  
(по материалам конгресса CIMAC 2013)

**39** *Melnik G.V.*  
Engine Building Worldwide  
(Based On Papers Presented at CIMAC 2013)

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

## ПРЕДПРИЯТИЯ

В.А. Шелеметьев	<i>техн. директор</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
В.А. Рыжов	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
Е.С. Васюков	<i>техн. директор</i>	<i>ЗАО УК БМЗ, г. Брянск</i>
В.А. Егоров	<i>ген. директор</i>	<i>ОАО РУМО, Н. Новгород</i>
А.К. Лимонов	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО РУМО, Н. Новгород</i>
М.В. Бояркин	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО ХК «Барнаултрансмаш», г. Барнаул</i>
В.М. Гребнев	<i>техн. директор</i>	<i>ОАО «Волжский дизель им. Маминых», г. Балаково</i>
Р.Х. Хафизов	<i>зам. гл. констр. по двиг.</i>	<i>ОАО КАМАЗ, г. Набережные Челны</i>
А.А. Матюшин	<i>генеральный директор</i>	<i>ОАО ЗМЗ, г. Заволжье</i>
В.И. Федышин	<i>директор</i>	<i>МАН Ферросталь, Санкт-Петербургский филиал</i>
В.В. Коновалов	<i>1-й зам. ген.директора</i>	<i>ОАО «Звезда», Санкт-Петербург</i>
В.С. Мурзин	<i>дир.-гл. конструктор</i>	<i>ООО ГСКБ «Трансдизель», г. Челябинск</i>
А.П. Маслов	<i>вед. инж.-конструктор</i>	<i>ООО ГСКБ «Трансдизель», г. Челябинск</i>
А.С. Калюнов	<i>начальник ИКЦ</i>	<i>ООО НЗТА, г. Ногинск</i>

## НИИ

В.С. Папонов	<i>ген. директор</i>	<i>ОАО НИКТИД, г. Владимир</i>
Д.П. Ильющенко-Крылов	<i>гл. инженер</i>	<i>ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.А. Сорокин	<i>зав. отделом</i>	<i>ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.И. Ерофеев	<i>нач. отдела</i>	<i>1 ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург</i>
В.В. Альт	<i>директор</i>	<i>ГНУ СибФТИ, г. Новосибирск</i>
Ю.А. Микутенко	<i>президент</i>	<i>ООО НПХЦ «Миакрон-Нортон»</i>
Б.А. Зеленев	<i>директор</i>	<i>НТЦ ПМТ ФГУП ЦНИИМ, Санкт-Петербург</i>
А.М. Махмудов	<i>с.н.с.</i>	<i>ФГУП ГНЦ РФ «ЦНИИ им. А.Н. Крылова», Санкт-Петербург</i>

## ВУЗЫ

Ю.В. Галышев	<i>зав. кафедрой ДВС</i>	<i>СПбГПУ, Санкт-Петербург</i>
Н.Д. Чайнов	<i>проф. кафедры Э-2</i>	<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва</i>
О.К. Безюков	<i>зав. кафедрой ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
А.А. Иванченко	<i>зав. кафедрой СЭУ</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
Л.В. Тузов	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
А.С. Пунда	<i>проф. кафедры ДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
В.К. Румб	<i>проф. кафедры ДВС и АСЭУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
А.В. Смирнов	<i>нач. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ФГОУ ВПО ВИТИ, Санкт-Петербург</i>
В.О. Сайданов	<i>проф. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ФГОУ ВПО ВИТИ, Санкт-Петербург</i>
А.А. Обозов	<i>профессор кафедры ТД</i>	<i>ФГБОУ ВПО БГТУ, г. Брянск</i>
С.П. Косырев	<i>профессор кафедры ТАМ</i>	<i>БИТТУ фил. ГОУ ВПО СГТУ г. Балаково</i>
А.В. Разуваев	<i>профессор кафедры ТАМ</i>	<i>БИТТУ фил. ГОУ ВПО СГТУ г. Балаково</i>

Издатель журнала — ООО «ЦНИДИ-Экосервис», Санкт-Петербург.

Журнал издается при поддержке ФГОУ ВПО «Военный инженерно-технический институт» (ВИТИ), филиал «Военной академии тыла и транспорта», Санкт-Петербург.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук ([www.vak.ed.gov.ru](http://www.vak.ed.gov.ru)).

Электронные версии журнала (2005–2013 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» ([www.elibrary.ru](http://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 03.09.2013  
Подписано в печать 20.09.13  
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7  
Зак. 203. Тираж 1000 экз.  
Цена договорная

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

Тел.: (812) 719-73-30  
Факс: (812) 719-73-16

E-mail: [ecology@rdiesel.ru](mailto:ecology@rdiesel.ru)  
[www.rdiesel.ru](http://www.rdiesel.ru)

**ДВИГАТЕЛЕ  
СТРОЕНИЕ**

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

© Журнал «Двигателестроение». 2013. № 3 (253)

## ПРОИЗВОДСТВО СОВРЕМЕННЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

*В.А. Сорокин, к.т.н, доц., зав.лаб.*

*ЗАО «Центральный научно-исследовательский институт морского флота»*

Приведены результаты сравнительного анализа технического уровня современных среднеоборотных судовых дизелей зарубежного производства. На основе анализа технико-эксплуатационных характеристик СОД обозначены основные проблемы конструирования, производства и модернизации перспективных моделей двигателей. Даны предложения по созданию, совершенствованию и выпуску новых конкурентоспособных судовых дизелей отечественного производства.

На крупных специализированных судах типа ро-ро, паромов, контейнеровозов, круизных лайнерах, ледоколах и др., где накладываются ограничения на габариты машинного отделения либо предъявляются особые требования к моментным характеристикам гребного винта, в качестве пропульсивных (главных) и вспомогательных (в основном дизель-генераторов) применяются преимущественно среднеоборотные дизели (СОД).

К безусловным преимуществам рассматриваемого класса дизелей по сравнению с малооборотными дизелями (МОД) относятся их меньшие габариты (особенно по высоте) из-за отсутствия в конструкции штока поршня и крейцкопфа, а также за счет более высокой частоты вращения. Преимущества по удельной массе СОД не так очевидны из-за необходимости применения достаточно массивных редукторов или электрогенераторов и гребных электродвигателей. К существенным недостаткам СОД можно отнести более низкий ресурс до списания (по опыту эксплуатации 60–90 тыс. ч), а также повышенные трудозатраты на техническое обслуживание из-за большей сложности конструкции и большого количества цилиндров у двигателей большой агрегатной мощности [1].

Механическая передача мощности включает, как правило, редуктор, муфты, усложняющие установку и имеющие более высокие потери энергии по сравнению с прямой передачей. СОД имеют также повышенный уровень шума и большую трудоемкость технического обслуживания и ремонта.

Несмотря на отмеченные недостатки среднеоборотные дизели незаменимы для рассмат-

риваемой группы судов. Дополнительное преимущество — возможность их использования в составе многомашинных установок, обладающих большей живучестью и маневренными качествами, что особенно важно, например, для круизных лайнеров, ледоколов и др.

В то же время, как было отмечено, СОД обладают лучшими массо-габаритными показателями, что для определенных типов судов является решающим фактором. По экономичности СОД практически не уступают МОД. Все СОД могут работать на тяжелых сортах топлива, а более высокая температура отработавших газов позволяет эффективнее утилизировать теплоту, чем в установках с 2-тактными МОД [1].

Направления развития среднеоборотных дизелей связаны с совершенствованием их конструкции и технологии изготовления для повышения надежности, экономичности и мощностных характеристик. Ведущие производители дизелей применяют электронные системы управления топливоподачей и газораспределением, проводят работу по использованию более дешевого тяжелого и газообразного топлива.

В табл. 1–5 представлен типаж современных СОД, производимых ведущими зарубежными дизелестроительными фирмами.

Типаж современных СОД обширен и разнообразен, что позволяет выбрать оптимальную модель из числа производимых. Следует отметить, что лидирующее положение в производстве СОД занимают фирмы «Wartsila Corporation» и «MAN Diesel & Turbo», а также еще 3–4 производителя, модели которых представлены в таблицах.

Представленные СОД — четырехтактные, тронковые, как правило, нереверсивные с газотурбинным наддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха с непосредственным впрыском топлива, приспособленные для работы на тяжелом топливе. Передача крутящего момента на винт осуществляется через механический или иной редуктор. Реверс осуществляется применением винта регулируемого шага либо реверс-редуктором, либо через систему электропередачи (электрогенератор с приводом от дизеля — гребной электродвигатель). Типаж современных СОД характеризуется следующими основными показателями (см. табл. 1–5):

## Среднеоборотные дизели «Wartsila Corporation»

Модель двигателя	W20	W20DF	W26	W32	W34DF	W38	W46	W46F	W50DF	W64
Агрегатная мощность, кВт	800–1800	876–1314	2040–5440	3000–9280	2700–7200	4350–11 600	12 600–16 800	7200–19 200	5700–17 100	12 900–17 200
Частота вращения, об/мин	1000	1000/1200	1000	750	750	600	500/514	600	500/514	327/333
Число цилиндров	4, 6, 8, 9 L	6, 8, 9 L	6, 8, 9 L 12, 16 V	6–9 L 12, 16, 18 V	6, 9 L 12, 16 V	6, 8, 9 L 12, 16 V	12, 16 V	6–9 L 12, 14, 16 V	6, 8, 9 L 12, 16, 18 V	6–8 L
Цилиндровая мощность, кВт	200	146/176	340	500/580	450	725	1000	1200	950/975	2150
Среднее эффективное давление, бар	27,3	20,0	25,5	24,9–25,9	19,8	26,9	24,2/24,9	24,9	20,0	25,5/25,0
Диаметр цилиндра/ход поршня, см	20/28	20/28	26/32	32/40	34/40	38/47,5	46/58	46/58	50/58	64/90
Средняя скорость поршня, м/с	9,3	9,3/11,2	10,7	10,0	10,0	9,5	9,7/9,9	11,6	9,7/9,9	9,8/10
Удельный расход топлива, г/кВт·ч	185	194/199	185	185	8910 кДж/кВт·ч	176	173	171	8910 кДж/кВт·ч	164
Вид топлива	MDO, HFO	Газ, MDO, HFO	MDO, HFO	MDO, HFO	Газ, MDO, HFO	MDO, HFO	MDO, HFO	MDO, HFO	Газ, MDO, HFO	MDO, HFO
Удельная масса, кг/кВт	6,4–9,0	8,8–10,8	6,1–8,9	9,0–11,1	10,4–12,6	9,6–11,7	13,1–14	12,1–13,5	14,0–16,8	17,2–18,1

Комментарии. 1. Все модели дизелей могут использоваться в качестве пропульсивных в составе дизель-редукторных установок, а также для привода электрогенераторов в составе дизель-электрических установок и судовых электростанций.

2. Как альтернатива вместо традиционной системы топливоподачи может устанавливаться система common rail.

Таблица 2

## Среднеоборотные дизели «MAN Diesel &amp; Turbo»

Модель двигателя	L21/31	L27/38	L28/33 D STC	L+V32/40	L+ V32/40 CR	L+ V48/60	L+ V48/60CR	L+ V51/60DF	L58/64
Агрегатная мощность, кВт	1290–1935	2040–3060	5460–9100	3000–9000	3360–11 200	6900–20 700	7200–21 600	6000–18 000	8400–12 600
Частота вращения, об/мин	1000	800	1000	750/720	750/720	514/500	514/500	514/500	428
Число цилиндров	6–9L	6–9L	12, 16, 20 V	6–9 L 12, 14, 16, 18 V	6–10 L 12, 14, 16, 18, 20 V	6–9 L 12, 14, 16, 18 V	6–9 L 12, 14, 16, 18 V	6–9 L 12, 14, 16, 18 V	6–9 L
Цилиндровая мощность, кВт	215	340	455	500	560	1150	1200	1000/975	1400
Среднее эффективное давление, бар	24,0	23,5	26,9	24,9–25,9	25,3–26,4	24,7–25,4	25,8–26,5	19,1	23,2
Диаметр цилиндра/ход поршня, см	21/31	27/38	28/33	32/40	32/40	48/60	48/60	51/60	58/64
Средняя скорость поршня, м/с	10,3	10,1	11,0	10,0/9,6	11,0/10,6	10,3/10,0	10,3/10,0	10,3/10,0	9,1
Удельный расход топлива, г/кВт·ч	189–195	185–188	188–190	182–185	177–178	176–180	175–179	183–184	181–185
Вид топлива	MDO, HFO	MDO, HFO	MDO	MDO, HFO	MDO, HFO	MDO, HFO	MDO, HFO	Газ, MDO, HFO	MDO, HFO
Удельная масса, кг/кВт	9,8–12,4	12,9–14,2	5,44–6,2	9,4–12,7	9,3–11,8	12,5–15,1	12,3–14,7	14,7–17,8	16,5–17,7

Комментарии. Аббревиатура в модели дизеля: L, V — рядный или V-образный двигатель; CR — двигатель с электронным управлением топливоподачей и газораспределением (common rail); DF — двигатель, работающий на газе (метане) и жидком топливе; D — двигатель, работающий на дизельном (легком) топливе; STC — двигатель с двухступенчатым турбонаддувом.

1. Агрегатная мощность — 625–17 200 кВт.
2. Частота вращения — 327–1200 об/мин.
3. Число цилиндров — 6–9 L; 12, 14, 16, 18, 20 V.
4. Цилиндровая мощность — 175–2150 кВт.

5. Среднее эффективное давление — 23,2–27,1 бар (при работе на газе — 19,1–20,0 бар).
6. Диаметр цилиндра — 20,0–64,0 см.
7. Отношение хода поршня к диаметру цилиндра — 1,16–1,57.

Таблица 3

**Среднеоборотные дизели «Caterpillar–MaK» (M – серия MaK, C – серия Caterpillar)**

Модель двигателя	M20C	M25C	M32C	VM32C	M43C	VM43C	C280
Агрегатная мощность, кВт	1020–1710	1800–3000	2880–4500	5760–8000	5400–9000	10 800–16 000	1900–5420
Частота вращения, об/мин	900/1000	720/750	600	720/750	500/514	500/514	900/1000
Число цилиндров	6,8,9L	6,8,9L	6,8,9L	12,16V	6, 7, 8, 9L	12, 16V	6, 8L 12, 16V
Цилиндровая мощность, кВт	170/190	300/333	480/500	480/500	900/1000	900/1000	316/339
Среднее эффективное давление, бар	24,1–24,2	23,5–26,1	24,9–25,9	23,7	23,7–27,1	23,7–27,1	20–23,9
Диаметр цилиндра/ход поршня, см	20/30	25,5/40	32/48	32/42	43/61	43/61	28/30
Средняя скорость поршня, м/с	9,0/10,0	9,6/10,0	9,6	10,1/10,5	10,2/10,5	10,2–10,5	9,0–10,0
Удельный расход топлива, г/кВт·ч	186–189	183–184	177–179	178–179	175–179	175–178	—
Вид топлива	MDO, HFO	MDO, HFO	MDO, HFO	MDO, HFO	MDO, HFO	MDO, HFO	MDO
Удельная масса, кг/кВт	9,5–11,3	9,9–11,7	11,0–13,0	10,2–11,2	14,0–17,2	13,4–15,0	5,3–8,25

Комментарии. 1. На всех двигателях устанавливается электронная система управления топливоподачей и газораспределением.  
2. Фирма MaK входит в Корпорацию Caterpillar

Таблица 5

**Среднеоборотные дизели «Hyundai»**

Модель двигателя	H17/28	H21/32	H25/33	H32/40
Агрегатная мощность, кВт	625–1040	825–1980	1560–6800	3000–10 000
Частота вращения, об/мин	900–1000	720–1000	720–1000	720–750
Число цилиндров	5–8 L	5, 6, 8, 9 L	6, 8, 9 L	6–9 L 12, 14, 16, 18, 20 V
Цилиндровая мощность, кВт	125–130	175–220	260–330	500
Среднее эффективное давление, бар	24,5–26,2	23,8–26,4	24,4–27,1	24,9–25,9
Диаметр цилиндра/ход поршня, см	17/28	21/32	25/33	32/40
Средняя скорость поршня, м/с	8,4–9,3	7,7–10,7	7,9–11,0	9,6–10,0
Удельный расход топлива, г/кВт·ч	195	188–191	186–187	183–185
Вид топлива	MDO, HFO	MDO, HFO	MDO, HFO	MDO, HFO
Удельная масса, кг/кВт	10,4–12,3	15,5–16,0	11,7–19,1	15,4–22,9

Таблица 4

**Среднеоборотные дизели «Roll-Royce»**

Модель двигателя	C25/33	B32/40	B35/40
Агрегатная мощность, кВт	1440–2880	3000–8000	5040–7000
Частота вращения, об/мин	900/1000	750	720/750
Число цилиндров	6, 8, 9 L	6, 8, 9 L 12, 16 V	12, 16 V
Цилиндровая мощность, кВт	240–320	500	420–437
Среднее эффективное давление, бар	22,6–26,4	24,9	18,2
Диаметр цилиндра/ход поршня, см	25/33	32/40	35/40
Средняя скорость поршня, м/с	7,9–11,0	10,0	10,0
Удельный расход топлива, г/кВт·ч	182–190	185	—
Вид топлива	MDO, HFO	MDO, HFO	Газ CNG, LNG

8. Средняя скорость поршня — 9,1–11,6 м/с.

9. Удельный расход топлива при стандартных внешних условиях по ISO 3046/1 — 164–191 г/кВт·ч.

10. Вид топлива — GO, MDO, HFO (до 780 сСт при 50 °С), газ.

11. Удельная масса — 9,0–22,9 кг/кВт.

Создание новых моделей судовых дизелей целесообразно выполнять с учетом разработки унифицированных типоразмерных рядов, обеспечивающих широкий диапазон вырабатываемой мощности. При этом должна быть реализована

концепция серийного выпуска дизелей типоразмерного ряда с применением унифицированных модульных элементов.

Преимущества такого подхода доказаны практикой. Это даст возможность сократить номенклатуру специального технологического оборудования, снизить производственные затраты за счет унификации деталей и узлов внутри типоразмерного ряда, оперативно проводить модернизацию выпускаемых двигателей с применением последних достижений в области дизелестроения и расширить область применения дизелей.

Обеспечение устойчивого спроса на дизели в условиях жесткой конкурентной борьбы возможно только при непрерывном их совершенствовании, улучшении технико-экономических и экологических показателей.

Все производители судовых дизелей постоянно совершенствуют качество выпускаемой продукции в следующих направлениях:

- увеличение цилиндровой мощности;
- улучшение топливной экономичности;
- снижение расхода масла;
- оборудование дизелей системами электронного управления и топливоподачи;
- снижение вредных выбросов;
- конструктивное совершенствование;
- технологическое совершенствование.

Анализируя компоновочные и конструктивные решения современных зарубежных двигателей можно отметить, что конструкции дизелей не содержат каких-либо принципиально новых решений, которые были бы неизвестны или не применялись ранее. Как известно, конструирование нового судового дизеля является сложной и многофакторной задачей, связанной с нахождением (выбором) оптимального варианта, на основании результатов расчетов, оценки технико-экономических показателей и др. Выбор конструктивных решений сводится к решению многовариантной задачи, учитывающей комплекс требований, предъявляемых как к отдельным деталям и узлам, так и дизельной установке в целом.

Благодаря форсированию дизелей наддувом, совершенствованию конструкции и технологии производства, улучшению рабочего процесса и др. мероприятий среднее эффективное давление  $p_e$  дизелей достигло 2,5–3,0 МПа при максимальном давлении сгорания 20–24 МПа. Реализация современных конструктивных решений, позволила осуществить принцип независимого управления уровнями механических и тепловых напряжений. В результате получены низкие удельные расходы топлива ( $b_e = 165–170$  г/кВт·ч) при КПД двигателей 50 % и выше.

Достигнутый уровень эффективных показателей подтверждает, что дизельные двигатели, имея большие резервы дальнейшего совершенствования, остаются на обозримую перспективу самой экономичной энергетической установкой, определяющей развитие многих отраслей, включая судостроение.

За последние годы были разработаны и внедрены конструктивные и технологические решения, обеспечивающие максимальную надежность дизеля в эксплуатации: коленчатый вал с развитым диаметром шеек, отличающийся повышенной жесткостью и пониженным удельным давлением на подшипники; цилиндровая втулка

с внутриканальным охлаждением; турбонаддув при изобарном давлении; организация процесса сгорания с многофазным впрыском топлива; применении системы топливоподачи common rail и др.

Выполненный анализ конструкций современных зарубежных среднеоборотных дизелей мощностью 450–20 000 кВт показал, что в них, как правило, реализован модульный принцип построения, обеспечивающий улучшение технико-эксплуатационных свойств и потребительских качеств.

*Остов двигателя.* Изготавливается в виде блок-картера (литого или сварно-литого) либо фундаментной рамы и блок станины. Литые детали остова отливаются из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Детали остова имеют жесткую конструкцию, снизу закрытую масляным поддоном, который в некоторых исполнениях является мокрым картером. Внутри блока могут быть размещены: воздушный ресивер, распределительный вал и его привод. Продольные нижние балки блок-картера служат опорными полками, посредством которых двигатель крепится к судовому фундаменту (подмоторной раме).

*Цилиндровые втулки.* Вставные, мокрого типа с толстостенным фланцем-бандажом и каналами для циркуляции охлаждающей жидкости. Заготовки цилиндрических втулок получают центробежным литьем из модификационного серого (СЧ30, СЧ35) или высокопрочного (ВЧ45, ВЧ50) чугуна. Зеркало цилиндра для повышения износостойкости подвергают пористому хромированию, фосфатированию или хонингованию. Уплотнения втулки — резиновые кольца внизу, в верхней части — притирка или прокладки.

*Крышки цилиндра.* Индивидуальные на каждый цилиндр, как правило, четырехтактные. Крышки отливают из модифицированного чугуна марок СЧ20, СЧ25 или высокопрочного чугуна с каналами для циркуляции охлаждающей жидкости с охлаждаемыми седлами и межклапанными перемычками и форсуночным стаканом. Форма огневого днища соответствует конфигурации камеры сгорания для обеспечения качественного смесеобразования, воспламенения и горения топливовоздушной смеси.

*Поршни.* Составные. Головка (камера сгорания) изготавливается штамповкой или ковкой из жаропрочной стали типа 38ХМА, а тронк — чугуном для СОД и алюминиевый сплав для ВОД. Болты или шпильки крепления головки к тронку — стальные. Для повышения износостойкости канавок поршневых колец они хромируются или закаляются токами высокой частоты. Охлаждение головки поршня осуществляется маслом путем его циркуляции или взбалтывания.

*Поршневые кольца:* компрессорных — два-три, маслоъемных — одно-два. Материал колец — высокопрочный чугу́н с шаровидным графитом, легированный кремнием и марганцем. На рабочую поверхность компрессионных колец может наноситься молибденовое покрытие толщиной 0,2–0,3 мм газотермическим напылением.

*Коленчатый вал.* Изготавливается ковкой, штамповкой или гибкой с высадкой, материал — сталь, легированная хромом, никелем, марганцем, молибденом марок типа 40ХН2МА, 38Х2МЮА. Масло для смазки подшипников подается через сверления в блоке к рамовым подшипникам, а затем через сверления в шейках и щеках — к мотылевым подшипникам. Щеки прямоугольной, трапецеидальной или эллипсовидной формы, на которых крепятся противовесы. Коленчатый вал подвесного типа, подвески крепятся вертикальными и горизонтальными болтами.

*Подшипники* коленвала тонкостенные, многослойные, с заливкой антифрикционными сплавами, устанавливаются в постелях с натягом. Подшипники покрыты нанесенным гальваническим способом приработочным покрытием (как правило на основе олова).

*Шатуны* изготавливаются ковкой из среднеуглеродистых сталей типа 38Х2Н2МА, 40ХН, шатунные болты — из низкоуглеродистых сталей (18Х2Н4А, 20ХН3А и реже 38ХН3МА). Нижняя головка шатуна имеет прямой или косой зубчатый разъем.

*Газораспределительный механизм.* Один распределительный вал (р/в) с кулаками (шайбами) для привода клапанов и ТНВД со средним расположением. Клапанов четыре: два впускных и два выпускных. Кулаки, как правило, выполняют за одно целое с р/в из низкоуглеродистых сталей (15Х, 12ХН3А) или среднеуглеродистых (40, 45Х). Опорные поверхности вала и кулачных шайб закалены до твердости HRC = 52–56. Привод р/в шестеренчатый от коленчатого вала.

Проектирование нового дизеля — трудоемкий, длительный и затратный процесс, на который уходит от 4 до 6 лет работы и сотни миллионов долларов США. По этой причине двигателестроительные заводы редко проектируют совершенно новые дизели, чаще модернизируют существующие модели, создают на их базе унифицированное семейство двигателей, развернутое в типоразмерный ряд.

При проектировании нового дизеля достижение наилучших технико-эксплуатационных показателей неразрывно связано с использованием последних достижений в науке и технике, успехами в области машиностроения и металлургии, электроники и программирования с возможностями технологического процесса производства и ка-

чества оборудования. Свойства и характеристики двигателя полностью определяют эффективность функционирования конкретного судна, на котором он будет установлен, поэтому в конструкции двигателя должны быть учтены назначение и особенности объекта применения.

При решении проектной задачи необходимо пользоваться апробированными вычислительными программами, методиками и процедурами, которые учитывают специфические особенности проектируемого дизеля в составе объекта, что в конечном итоге позволит наилучшим образом реализовать его выходные параметры.

Математическим аспектом проектирования всегда уделяется повышенное внимание. Особую актуальность приобретают автоматизированные системы проектирования современных двигателей для достижения высоких уровней форсировки, пониженной металлоемкости при заданном значении моторесурса.

Результаты выполненных расчетов выступают в качестве количественной оценки допустимости принятых решений.

Как известно, большинство деталей дизеля испытывают действие циклически изменяющихся нагрузок, под действием которых развивается процесс постепенного накопления усталостных повреждений. Отдельные детали (прежде всего ЦПГ) работают при повышенных температурах (более 250 °С) в условиях нестационарного неравномерного нагрева. Температурные градиенты вызывают тепловые деформации и температурные напряжения, которые в сочетании с механическими напряжениями приводят к появлению трещин, износов и т. п. Значительные трудности при расчете напряжений связаны как со сложностью конфигурации деталей, так и сложным многофакторным их нагружением. В настоящее время при использовании конечно-элементных моделей удалось создать расчетные методики, адекватные реальным условиям работы и нагружения деталей [2].

Отечественные дизелестроители в ближайшие годы планируют создать конструкции СОД, по своему техническому уровню соответствующие лучшим мировым образцам. Методика проектирования и проблемы производства таких двигателей требуют решения сложнейших вопросов с использованием современных достижений в областях техники, в которых реализуются механические, физические, химические, технологические и другие процессы.

Разработка новых моделей двигателей вызвана текущими и перспективными потребностями в судовых дизелях, их востребованностью на рынках. Разрабатываемые двигатели должны сочетать в себе проверенные временем технические

решения и последние достижения высоких технологий. Проектируемый двигатель должен быть экологически безопасным и компактным, представлять новый технический уровень с возможностью дальнейшего совершенствования разрабатываемой модели с учетом перспективных требований рынка [3].

Разработчики в ходе конструирования и изготовления двигателей должны решать основные задачи:

- оптимизацию технико-эксплуатационных и экономических показателей двигателя;
- обеспечение высокой надежности двигателя, максимального моторесурса и длительных межремонтных периодов;
- экологическую безопасность;
- простоту конструкции, удобства обслуживания и эксплуатации;
- конструктивные усовершенствования с использованием новейших разработок;
- использование инновационных технологий;
- применение тяжелого топлива с вязкостью до 700 сСт при 50 °С;
- использование стандартного оборудования, систем, узлов, деталей;
- применение концепции модульного и унифицированного конструирования.

Основной задачей производителей является сохранение и дальнейшее развитие дизелестроения на базе освоенных видов продукции, а также разработка и производство новых перспективных моделей дизелей.

В конструктивном плане двигатели должны иметь: электронную систему управления топливоподачей; электронный регулятор частоты вращения; регулируемый турбокомпрессор (при необходимости); возможность использования альтернативных топлив; комплекс средств автоматизации и диагностирования.

Отечественные заводы, опираясь исключительно на собственные силы, вынуждены выполнять опытно-конструкторские и научно-исследовательские работы с реализацией неординарных

решений: проведение модернизации серийных дизелей; внедрение конструкторских и технологических мероприятий, позволяющих повысить технико-экономические показатели выпускаемых моделей. Варьирование частотой вращения, степенью форсировки рабочего процесса, различными вариантами комплектации дает возможность при минимальных затратах модернизировать модели и получить улучшенные характеристики. К сожалению, отечественные модели даже с улучшенными технико-экономическими показателями в настоящее время уступают лучшим современным зарубежным аналогам.

Необходимо подчеркнуть, что прогрессивные решения, заложенные в конструкцию и технологию вновь создаваемых дизелей, должны иметь возможность их дальнейшего совершенствования и поддержания технико-экономических показателей на необходимом уровне на ближайшую перспективу.

При проектировании двигателей их компоновка, сформированная по блочно-модульному принципу с максимальным агрегатированием конструкции и высокой унификацией узлов и деталей, должна обеспечить развертывание их в широкий мощностной ряд при минимальных затратах.

---

#### Литература

1. *Сорокин В.А.* Анализ производства современных судовых малооборотных дизелей // Сб. научн. трудов ЗАО «ЦНИИМФ». — Техническая эксплуатация морского флота. — СПб., 2012. — С. 84–94.
2. Судовые энергетические установки // В.К. Румб, Г.В. Яковлев, Г.И. Шаров и др. — СПб.: СПб ГМТУ, 2007. — 622 с.
3. *Сорокин В.А., Иванов М.Ю.* Сравнительный анализ технико-эксплуатационных характеристик отечественных и зарубежных судовых дизельных двигателей мощностью до 3 МВт // Науч.-техн. сб. Российского морского регистра судоходства. — 2011. — Вып. 34. — С. 111–131.