

# ДВИГАТЕЛЕ СТРОЕНИЕ

**№ 1 (275)**  
**январь–март 2019**

**Санкт-Петербург**

| ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЕ В РОССИИ                                                                                                                                            |  | ENGINE BUILDING IN RUSSIA                                                                                                                                                 |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <i>Столяров С.П.</i><br><b>Системные проблемы Российского дизелестроения<br/>(взгляд из морского технического университета)</b>                                       |  | <i>Stolyarov S.P.</i><br><b>3 Core problems of engine building in this country<br/>(as seen from the Marine Technical University)</b>                                     |  |
| РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ.<br>ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ                                                                                                                  |  | ANALYSES, DEVELOPMENT<br>AND CONSTRUCTION OF ENGINES                                                                                                                      |  |
| <i>Мягков Л.Л., Сивачев В.М.</i><br><b>Математическое моделирование сопряженного<br/>тепломассобмена в системе охлаждения<br/>среднеоборотного дизеля</b>             |  | <i>Myagkov L.L. and Sivachev V.M.</i><br><b>9 Mathematical modelling of combined heat/mass<br/>transfer in cooling system of a middle-speed<br/>diesel engine</b>         |  |
| <i>Миляев С.Б.</i><br><b>Оптимизация фазовых показателей сгорания<br/>в дизельных и газовых двигателях<br/>для снижения выбросов оксидов азота</b>                    |  | <i>Milyaev S.B.</i><br><b>14 Optimal phasing of fuel burning as a means<br/>to reduce NO<sub>x</sub> emissions from diesel and gas engines</b>                            |  |
| КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ                                                                                                                                             |  | CONSTRUCTION MATERIALS                                                                                                                                                    |  |
| <i>Иванов Д.А., Зюкин В.С., Колосков А.А.</i><br><b>Снятие остаточных напряжений в деталях<br/>авиадвигателей газоимпульсной обработкой</b>                           |  | <i>Ivanov D.A., Zyukin V.S. and Koloskov A.A.</i><br><b>20 Gas-impulsive treatment as a means<br/>of stress-relieving in aircraft engine parts</b>                        |  |
| ТОПЛИВО. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ                                                                                                                                          |  | FUEL. LUBRICANTS                                                                                                                                                          |  |
| <i>Плотников С.А., Смольников М.В.,<br/>Шишкин Г.П.</i><br><b>Расчет стабильности этанола-топливной эмульсии<br/>для применения в дизелях</b>                         |  | <i>Plotnikov S.A., Smolnikov M.V.,<br/>Shishkin G.P.</i><br><b>24 Calculated stability of ethanol-fuel emulsion<br/>as combustible for diesel engine</b>                  |  |
| ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ                                                                                                                                         |  | POWER PLANTS                                                                                                                                                              |  |
| <i>Прутчиков И.О., Михайлов В.И., Камлюк В.В.</i><br><b>Модули энергетической безопасности автономных<br/>объектов на базе комбинированных энергоустановок</b>        |  | <i>Prutchikov I.O., Mikhailov V.I. and Kamlyuk V.V.</i><br><b>28 Uninterrupted power supply modules for stand-alone<br/>energy consumers based on hybrid power plants</b> |  |
| <i>Бондарев А.В.</i><br><b>Экспериментальные исследования переходных<br/>процессов в котлах высокотемпературного кипящего<br/>слоя с рециркуляцией уходящих газов</b> |  | <i>Bondarev A.V.</i><br><b>33 Experimental research on transients in boilers<br/>featuring high-temperature fluidized bed<br/>and off-gas recirculation</b>               |  |
| НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ                                                                                                                                             |  | ENGINE BUILDING NEWS                                                                                                                                                      |  |
| <b>Системы автоматизации и диагностирования<br/>дизелей и газовых двигателей<br/>(материалы конгресса CIMAC-2016)</b>                                                 |  | <b>39 Control &amp; automation systems<br/>for diesel and gas engines<br/>(based on CIMAC -2016 papers)</b>                                                               |  |
| ИНФОРМАЦИЯ                                                                                                                                                            |  | INFORMATION                                                                                                                                                               |  |
| <b>Рефераты статей</b>                                                                                                                                                |  | <b>58 Synopsis</b>                                                                                                                                                        |  |
| <b>Вниманию авторов</b>                                                                                                                                               |  | <b>60 The authors' attention</b>                                                                                                                                          |  |

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

## ПРЕДПРИЯТИЯ

|                 |                       |                                               |
|-----------------|-----------------------|-----------------------------------------------|
| В.А. Шелеметьев | зам. техн. директора  | ОАО «Коломенский завод», г. Коломна           |
| А.Н. Кострыгин  | гл. конструктор       | ОАО «Коломенский завод», г. Коломна           |
| С.В. Хильченко  | техн. директор        | ПАО «Звезда», Санкт-Петербург                 |
| А.К. Лимонов    | гл. конструктор       | АО РУМО, Нижний Новгород                      |
| Е.И. Бирюков    | гл. конструктор       | АО «Барнаултрансмаши», г. Барнаул             |
| А.В. Попов      | зам. ген. директора   | АО «Волжский дизель им. Маминых», г. Балаково |
| А.С. Куликов    | гл. констр. по двиг.  | ПАО КамАЗ, г. Набережные Челны                |
| В.И. Федышин    | директор              | ООО МПЦ «Марине», Санкт-Петербург             |
| А.П. Маслов     | вед. инж.-конструктор | ООО «ЧТЗ-Уралтрак», г. Челябинск              |
| А.С. Калюнов    | начальник ИКЦ         | ООО НЗТА, г. Ногинск                          |

## НИИ

|                       |                        |                                        |
|-----------------------|------------------------|----------------------------------------|
| Д.П. Ильющенко-Крылов | гл. инженер            | ЦНИИМФ, Санкт-Петербург                |
| В.А. Сорокин          | зав. отделом           | ЦНИИМФ, Санкт-Петербург                |
| В.И. Ерофеев          | нач. отдела            | И ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург          |
| В.В. Альт             | рук. науч. направления | ГНУ СибФТИ, г. Новосибирск             |
| Ю.А. Микутенок        | президент              | НПХЦ «Миакрон-Нортон», Санкт-Петербург |

## ВУЗЫ

|                |                          |                                             |
|----------------|--------------------------|---------------------------------------------|
| В.А. Марков    | зав. кафедрой Э-2        | МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва               |
| Н.Д. Чайнов    | проф. кафедры Э-2        | МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва               |
| В.А. Рыжов     | проф. кафедры ТМС и САПР | КИ фил. МПУ, г. Коломна                     |
| Ю.В. Галышев   | зав. кафедрой ИСУ и ТС   | СПбПУ Петра Великого, ИЭТС, Санкт-Петербург |
| М.И. Куколев   | проф. кафедры гидравлики | СПбПУ Петра Великого, ИСИ, Санкт-Петербург  |
| О.К. Безюков   | проф. кафедры ТК СДВС    | ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург    |
| А.А. Иванченко | зав. кафедрой ДВС и АСЭУ | 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 и АСЭУ | ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург    |
| В.К. Румб      | проф. кафедры ДВС и АСЭУ | ГМТУ, Санкт-Петербург                       |
| А.В. Смирнов   | проф. кафедры Д и ТУ     | ВИ(ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург              |
| В.О. Сайданов  | проф. кафедры Д и ТУ     | ВИ(ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург              |
| А.А. Обозов    | проф. кафедры ТД         | БГТУ, г. Брянск                             |
| А.В. Разуваев  | проф. кафедры ЯЭ         | БИТИ фил. ФГАОУ МИФИ г. Балаково            |

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

Журнал издается при поддержке Военного института (инженерно-технического) Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева, Санкт-Петербург.

Журнал «Двигателестроение» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Дата включения в обновленный перечень ВАК — 29.05.2017.

### Группы научных специальностей:

05.02.00 — Машиностроение и машиноведение

05.04.00 — Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

05.14.00 — Энергетика

Электронные версии журнала (2005–2019 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 03.03.2019  
Подписано в печать 22.03.2019  
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7  
Зак. 41. 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](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». 2019. № 1 (275)

## СИСТЕМНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РОССИЙСКОГО ДИЗЕЛЕСТРОЕНИЯ. (ВЗГЛЯД ИЗ МОРСКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА)

*С.П. Столяров, к.т.н, доцент, зав. кафедрой  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет*

Рассматриваются системные проблемы российского судового дизелестроения, ставшие причиной стагнации отрасли. Для возрождения отечественного дизелестроения предлагается ввести жесткий контроль реализации программ импортозамещения, ограничить типаж двигателей, применяемых на флоте; обеспечить дизелестроительные заводы заказами в объеме, достаточном для устойчивого развития; организовать производство комплектующих; повысить статус главных конструкторов на ведущих дизелестроительных заводах; обеспечить эффективный экспертный контроль за выполнением программ, финансируемых государством; реформировать систему подготовки инженерных кадров в области энергетического машиностроения.

Возрождение отечественного морского и военного флотов следует отнести к важнейшим задачам для промышленности России на ближайшие десятилетия. Как показала практика судостроения, создавать современные проекты, строить корпуса, монтировать системы кораблей и судов современные предприятия судостроительной отрасли России в состоянии. Что же касается насыщения кораблей и судов энергетическим оборудованием, то здесь есть серьезные проблемы. Российское судовое машиностроение стало главным сдерживающим фактором в строительстве отечественного флота, а расхожее словосочетание «двигатель — сердце корабля» приобрело реальный смысл с болевым ощущением.

Ситуация с производством судовых энергетических установок различных типов существенно различна. Наиболее благополучно дела обстоят с созданием ядерных энергетических установок: для военного флота строятся подводные лодки, для гражданского — ледоколы. По-видимому, такие факторы, как жесткий государственный контроль, высокие стандарты безопасности, ответственность в сфере контроля при производстве и эксплуатации в годы развала энергетического машиностроения позволили сохранить компетенции в области ядерной энергетики.

Проблемы производства газотурбинных энергетических установок связаны с развалом Советского Союза и обострились после 2014 г. в связи с прекращением сотрудничества с

украинскими предприятиями. ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» поставлял газотурбинные двигатели в комплектации с редукторами для кораблей и судов всех типов. На базе этих двигателей были созданы энергетические установки ракетных крейсеров проекта 1164 и кораблей комплексного снабжения проекта 1833, больших противолодочных кораблей (проекты 61, 1134Б, 1155), сторожевых кораблей проекта 1135 и ракетных катеров проекта 12411Т с газотурбинными установками типа COGAG и других типов судов.

К настоящему времени ПАО «Сатурн» приблизилось к реальному импортозамещению по газотурбинным двигателям, но остаются проблемы с комплектацией энергетических установок редукторами, производство которых было анонсировано на ПАО «Звезда». Трудно рассчитывать на быстрое решение всех проблем по созданию корабельных газотурбинных энергетических установок, но есть уверенность в том, что они будут решены.

Наиболее сложная ситуация сложилась в отечественном судовом дизелестроении. В гражданском флоте на морских судах практически всех типов преобладают дизели зарубежного производства. В результате отсутствия заказов после 1991 г. Россия потеряла дизелестроительные заводы: БМЗ, «Дальдизель», «Русский дизель», только что построенный «Ленинградский дизельный завод». Нет полной ясности с восстановлением производства после завершения внешнего управления на заводах ОАО «РУМО» и ОАО «Волжский дизель имени Маминых». До опасного минимума сократились заказы на АО «Коломенский завод» и ПАО «Звезда».

Периодически предпринимаются попытки обосновать допустимость регресса в отечественном дизелестроении мировыми тенденциями развития структуры государственной экономики и энергетики, в частности переходом к экономике постиндустриального общества. Многие годы дизель находится под мощным дестабилизирующим прессингом идеи ниспровержения с позиции самого успешного и самого распространенного источника механической энергии. В разное время с различных позиций дизелям предрекали быстрое отставание от других типов энергетических установок практически по всем основным параметрам: агрегатной мощности,

топливной экономичности, экологическим показателям. Это базировалось на прогнозе быстрого истощения запасов жидких углеводородов, прогрессе других типов двигателей, в основном газовых турбин, и альтернативных источников энергии.

Однако мировой опыт свидетельствует об обратном. Например, при создании боевых кораблей среднего водоизмещения (от 2000 до 6000 т) в течение последних 30 лет можно проследить следующие тенденции. Полностью исчезли из употребления котлотурбинные энергетические установки. Значительно сократилось применение газотурбинных установок и дизель-газотурбинных энергетических установок, работающих по схеме CODOG, не обеспечивающих ожидаемую эффективную совместную работу главных турбин и дизелей. В последние годы наибольшее количество кораблей оснащается дизель-газотурбинными энергетическими установками по схеме CODAG и дизельными многомашинными установками по схеме CODAD. Количество комбинированных установок на базе газовых турбин и дизель-генераторов весь этот период остается незначительным. Вследствие совершенствования рабочих параметров судовых дизелей, определяющих их конкурентоспособность, общая доля дизелей на кораблях среднего водоизмещения возросла примерно с 70 до 90%.

Как видим, тенденции развития мирового и отечественного судового дизелестроения явно не совпадают. В профессиональном сообществе состояние отечественного судового дизелестроения уже давно вызывает серьезные опасения. Заводы не имеют минимального объема заказов, достаточного для обеспечения возможности развития; новые разработки декларируются, выполняются на начальных стадиях, но не доходят до серийного производства. При этом качественный уровень отечественных дизелей продолжает отставать от лучших зарубежных образцов, прежде всего, по экологическим показателям и эффективности.

Такое положение дел явно не соответствует заявленному вектору развития России. Производственные корпорации, предприятия среднего и малого бизнеса, научные, образовательные и общественные организации и даже инициативные группы специалистов многократно предпринимали попытки инициировать решение проблемы возрождения отечественного дизелестроения.

В декабре 2018 г. состоялось очередное мероприятие, — в рамках Форума «Двигатель России» предпринята попытка сформировать дорожную карту реализации стратегии развития поршневого двигателестроения и интеграции данной стратегии в существующие и разрабатываемые отраслевые стратегии. Нет уверенности в том, что это ме-

роприятие окажется результативным или хотя бы даст какой-нибудь положительный эффект. Скептические мысли имеют объективные и субъективные основания. Объективные — некомпетентность и недалекость чиновников разных уровней, принимающих решения, и руководителей предприятий. Субъективные — заметное снижение уровня компетентности инженерных кадров в проектных работах, личные интересы, связанные с перетягиванием контрактов на себя, занижение ожидаемых результатов контрактных работ с целью избежать рисков и получения сверхприбылей.

#### **Проблема 1. Большое количество импортных дизелей различного типа в энергетических установках кораблей и судов военно-морского флота**

В отличие от недавнего планового прошлого, когда в ВМФ подавляющее преимущество составляли отечественные дизели, в настоящее время на кораблях и судах флота установлены разнотипные дизели большого числа фирм, в том числе иностранных. Если рассматривать проблему выбора главных двигателей для каждого из кораблей в отрыве от сложившихся на флоте условий материально-технического снабжения, взаимосвязей с дизелестроительными заводами, состояния ремонтной базы, внедренных методик обучения личного состава, обосновать можно многое, в том числе и принятые решения. Но если рассматривать проблему на системном уровне, сложившаяся ситуация представляется явно ошибочной.

По экспертным оценкам в отечественном флоте с известной долей достоверности на конец 2016 г. насчитывалось не менее 3391 главных дизелей, из которых доля импортных двигателей составляла около 37 %. Отечественное двигателестроение представлено следующими статистическими данными: ПАО «Звезда» — 1038 двигателей, ОАО «Барнаултрансмаш» — 503 двигателя, «Дагдизель» — 178 двигателей, ПАО «Автодизель» (ЯМЗ) — 97 двигателей, ОАО «Коломенский завод» — 94 двигателя, «Дальдизель» — 73 двигателя, завод «Русский дизель» — 51.

По иностранным фирмам распределение представлено в таблице.

На кораблях и катерах встречаются также двигатели фирм «Юждизельмаш», «Yanmar», «Yamaha» и другие.

Приведенные сведения дают основания утверждать, что во многих случаях проектанты были выбраны двигатели, которые размерностью цилиндров практически дублировали дизели, выпускаемые четырьмя российскими заводами. Здесь необходимо отметить, что по уровню среднего эффективного давления зарубежные дизели в среднем превосходят российские на 3–6 бар,

**Зарубежные дизели,  
установленные на кораблях и судах ВМФ**

| Фирма (страна) /<br>общее количество двигателей                  | Типоразмер<br>двигателя<br>D/S | Количество<br>двигателей |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| MAN SE (Германия) /<br>всего 79 двигателей                       | 20/27                          | 15                       |
|                                                                  | 12,8/14,2                      | 34                       |
|                                                                  | 12,8/15,5                      | 4                        |
|                                                                  | 12,8/16,6                      | 26                       |
| «Zgoda-Sulzer» (Польша) /<br>всего 226 двигателей                | 40/48                          | 106                      |
|                                                                  | 25/30                          | 120                      |
| MTU Friedrichshafen GmbH<br>(Германия) /<br>всего 208 двигателей | 17/19                          | 58                       |
|                                                                  | 17/21                          | 48                       |
|                                                                  | 16,5/19                        | 40                       |
|                                                                  | 13,5/15,6                      | 62                       |
| «Wartsila Oyj Abp» (Финляндия) /<br>всего 35 двигателей          | 32/40                          | 20                       |
|                                                                  | 20/28                          | 15                       |
| «Scania AB» (Швеция) /<br>всего 32 двигателя                     | 13/15,4                        | 32                       |
| «Caterpillar Inc.» (США) /<br>всего 76 двигателей                | 28/30                          | 8                        |
|                                                                  | 14,5/16,2                      | 24                       |
|                                                                  | 17/21,5                        | 36                       |
|                                                                  | 13/15,7                        | 8                        |
| «Deutz AG» (Германия) /<br>всего 120 двигателей                  | 17/19,5                        | 88                       |
|                                                                  | 13,2/14,5                      | 32                       |
| «SKL Motor GmbH» (Германия) /<br>всего 7 двигателей              | 32/48                          | 5                        |
|                                                                  | 16/18                          | 2                        |
| «Cummins Inc.» (США) /<br>всего 58 двигателей                    | 15,9/15,9                      | 50                       |
|                                                                  | 12,5/14,7                      | 6                        |
|                                                                  | 11,4/13,5                      | 2                        |
| «Volvo-Penta» (Швеция) /<br>всего 217 двигателей                 | 10,3/11                        | 132                      |
|                                                                  | 9/9,2                          | 20                       |
|                                                                  | 8,1/9,32                       | 62                       |
|                                                                  | 8,4/10                         | 2                        |
|                                                                  | 8,4/8,9                        | 1                        |
|                                                                  |                                |                          |

что является существенным доводом в обоснование применения импортных дизелей. Довод серьезный, вызывающий необходимость обсуждения уже выполненных и планируемых программ создания дизелей новых поколений и развития предприятий, производящих дизели и комплектующие к ним.

По удельной массе среди судовых дизелей до сих пор лидируют дизели ПАО «Звезда». Однако в последние десятилетия зарубежные фирмы значительно повысили уровень форсирования судовых двигателей и уже близки по этому показателю к уровню дизелей ПАО «Звезда».

Можно сказать, что разнотипица дизелей на флоте отражает факт состоявшегося «импортонезависимости». Естественным ответом должно стать, а точнее должно было стать полноценное импортозамещение. При реализации мер импортозамещения вызывают опасения два возможных (автору представляется ожидаемых) сценария развития событий, которые, по сути, являются профанацией реального импортозамещения.

Первый негативный сценарий состоит в том, что один импорт подменяется другим. В относительно приемлемом варианте, например, немецкие дизели заменяются китайскими. Конкретно, немецкие двигатели MTU16V4000M90, которые перестали поставляться из-за введенных санкций, были замещены китайскими двигателями корпорации HND модели CHD622V20, производимыми по лицензии фирмы «Deutz», а затем еще раз замещены такими же «отечественными», сборка которых была организована в ООО МПС. Здесь принципиальны два вопроса: допустимо ли сформировать список государств, продукция которых не обязательна к импортозамещению (но это не о реальном импортозамещении, а о некой политической перспективе), и какова может быть доля импортных комплектующих, чтобы локализованная сборка удовлетворяла принятым правилам в отношении импортозамещения.

Второй негативный сценарий состоит в комплектации новых отечественных разработок чрезвычайно большим количеством импортных компонентов.

#### *Предложение 1*

*Разрешения на применение импортных дизелей и комплектующих в составе энергетических установок судов и кораблей ВМФ согласовывать с руководством ВМФ.*

Возражение, базирующееся на том, что флот в недавнем прошлом пошел на одобрение импортных закупок оказалось несостоятельным, поскольку прежде не осознавалась государственная важность импортозамещения и, соответственно, принятые решения оказались ошибочными. Уверенность в том, что поставленные задачи военные специалисты решают успешно, не потеряна.

#### **Проблема 2. Постепенная утрата навыков проектирования**

Близкой по смыслу к импортозамещению является и проблема заказа инженерных разработок зарубежным фирмам. Проектирование дизеля — это многогранный процесс. В нем конкретные вопросы решаются не только в соответствии с пунктами технического задания, но и с учетом возможного расширения объектов применения или значительного изменения рабочих параметров; сложившихся или меняющихся отношений с поставщиками комплектующих; освоенных предприятиями технологий и применяемых материалов. В случаях, когда инженерные работы заказываются зарубежной инженеринговой фирме, надо иметь в виду, что проектант не будет учитывать возможность создания на базе создаваемого дизеля специальных агрегатов и боевых машин, ориентироваться на имеющееся технологическое оборудование и на сложившиеся кооперативные связи.

## *Предложение 2*

*Контракты на разработку дизелей и комплектующих к дизелям выполнять на российских предприятиях. Покупку проектов у иностранных фирм производить в исключительных случаях с разрешения Правительства России и только при наличии реализованных на практике проектов.*

Данное предложение не устанавливает ограничения на закупку лицензий на производство дизелей, закупку технологического оборудования и не вводит запрета предприятиям на заключение контрактов с зарубежными специалистами.

### **Проблема 3. Снижение статуса и постепенное исчезновение должности главного конструктора**

Проблема «исчезновения» на дизельных предприятиях главных конструкторов тесно связана с навязываемой собственниками системой управления предприятием руководителем-менеджером.

Доводов в защиту систем управления машиностроительными предприятиями, которые внедрены и внедряются по западному образцу, судя по реальному состоянию большинства предприятий отечественного машиностроения, практически нет. Но проблема организации управления предприятиями определяется многими факторами, в том числе на уровне государственного устройства, и выходит за рамки проблемы развития дизелестроения.

Однако на один из аспектов проблемы управления предприятием при оценке состояния дизелестроения следует обратить внимание. Характерный факт — руководители-менеджеры практически «извели» главных конструкторов. Даже если название должности сохраняется на предприятии, статус главного конструктора в настоящее время значительно понижен. Но...

Создание сложных технических систем без специалиста, балансирующего между законами природы и запросами общества, которые материализуются в виде конкретного технического задания на разработку, невозможно. Кто-то должен ограничивать волюнтаризм, профессионально определять направление и содержание инженерных работ и профессионально отвечать за принятые решения.

Поворот к возвращению главным конструкторам статуса значимых фигур уже наметился. Президент РФ ввел практику назначения генеральных конструкторов в оборонной промышленности (Указ Президента РФ от 19 января 2015 г. № 18 «О генеральном конструкторе по созданию вооружения, военной и специальной техники»). В частности, указом устанавливается, что генеральный конструктор является руководителем проекта по созданию новых технически сложных образцов ... военной и специальной техники, имеющих стратегическое значение для обеспечения

обороны страны и безопасности государства. Энергетическое машиностроение не проще, не дешевле и не доступнее, чем производство самолетов, ракет, танков, подводных лодок. Количество стран, которые в состоянии создавать такие объекты, так же, как корабельные дизели и газовые турбины, исчисляется десятком, редко несколько большим числом. Так что корабельные дизели соответствуют понятию «технически сложные образцы специальной техники».

И чтобы в России двигателестроение не было потеряно окончательно, необходимо, чтобы на ведущих предприятиях вновь появились инженеры-лидеры, — системно эрудированные, авторитетные в профессиональном сообществе, защищенные от капризов бюрократии, обладающие кредитом доверия в области научно-технических и кадровых решений, способные лично отвечать за результаты новых разработок, а в определенных условиях сказать «нет» руководящим менеджерам.

## *Предложение 3*

*Обратиться к Президенту России с предложением распространить действие Указа Президента РФ от 19 января 2015 г. № 18 на ведущие предприятия, производящие судовые дизели, в первую очередь на ОАО «Коломенский завод», ПАО «Звезда», ООО «Уральский дизель-моторный завод».*

### **Проблема 4. Отсутствие долговременного планирования в области дизелестроения**

Эта проблема трудноразрешима в сложившейся экономической ситуации, поскольку работа предприятий в основном опирается на проектный подход к организации коллективов и планированию производственной деятельности.

Универсальность инженерной деятельности и рыночная конкуренция породили уверенность в допустимости применения проектного подхода на предприятиях любого типа. Практически осуществилось это и в судостроении, и в двигателестроении. В результате за последнюю четверть века утрачены научные школы, исчезли главные конструкторы, сведено к минимуму число предприятий, способных развивать новые направления и выпускать дизели, соответствующие мировому уровню. Необходимо срочно вернуть в практику долговременное планирование деятельности предприятий с соответствующим финансовым обеспечением прикладных научных исследований и поисковых НИОКР. Только в этом случае будет создан типаж судовых дизелей, появится возможность планировать НИОКРы, направленные на улучшение их экономичности, экологичности, ресурса.

## *Предложение 4*

*Обратиться в Минпромторг России с предложением организовать плановое финансирование работ по разработке, доводке и модернизации*

дизелей, применяемых в составе энергетических установок кораблей и судов ВМФ.

#### **Проблема 5. Ориентация на логику примитивного менеджмента при принятии решений**

Проблема в значительной степени спровоцирована субъективными причинами и может быть сформулирована как «победа автомобилистов над судовиками» в конкурентной борьбе за рынок судовых энергетических установок. Это результат ориентации на логику примитивного менеджмента при принятии решений.

В последние два десятилетия наибольший прогресс в увеличении удельной мощности был достигнут в классе дизелей легковых автомобилей. В двигателях этого класса в период с 1985 по 2010 г. литровая мощность возросла с 35 до 70 кВт/л, а удельный крутящий момент — со 100 до 200 Н·м/л, что стало одной из причин активного продвижения автомобильных дизелей на рынок судовых двигателей.

Примеры этому — судовые дизели «Caterpillar Inc.», «Cummins Marine», MAN, DEUTZ, ЯМЗ. Как результат, одной из причин имевших место отказов и аварий кораблей и судов стало применение дизелей автотракторного типа в составе корабельных энергетических установок, в которых высока доля режимов большой мощности. Конструктивное различие между автотракторными и судовыми дизелями не ограничивается составом навешенного оборудования, комплектацией систем и стандартами приемочных испытаний. Судовые дизели — это коррозионная среда, большой ресурс, высокая надежность, требования Морского Регистра Судоходства, высокая экономичность, специфические характеристики нагружения. Корабельные дизели — это еще и удельная масса, маломанитность, виброакустика, специфические условия обслуживания и эксплуатации.

#### **Предложение 5**

*Внедрить в практику экспертизу технических проектов энергетических установок и дизелей для кораблей и судов ВМФ в нескольких независимых профильных организациях, в том числе в ВУНЦ ВМА ВМФ, КГНЦ, СПбГМТУ.*

#### **Проблема 6. Проблема комплектующих в условиях малосерийного производства**

Проблема комплектующих для малосерийного производства уже была затронута выше, где она анализировалась с позиций импортозамещения. Проблема известная и понятная. Вот только не понятно, почему на дизелестроительных предприятиях сформировалось и доминирует мнение, что какие-то другие предприятия, а не дизельные заводы, должны производить поршни, кольца, топливную аппаратуру, клапаны, коленвалы... для уникальных корабельных дизелей. Если требуется

иметь специализированное производство со сложными и дорогими технологиями, необходимо распределить эти работы между предприятиями отрасли. Россия в целом имеет достаточное количество производственных резервов и до недавнего времени успешно справлялась с этой проблемой. Если же эту проблему решать иначе, ориентируясь на мировых производителей, в определенных условиях отечественные предприятия могут остаться без критически важных комплектующих для корабельных дизелей и других объектов энергетики. Современная политическая ситуация демонстрирует именно такое развитие событий.

#### **Предложение 6**

*Обратиться в Минпромторг с предложением организовать кооперацию предприятий по производству компонентов для дизельных двигателей.*

#### **Проблема 7. Проблема повышения качества выпускников вузов**

Проблема подготовки кадров, несмотря на декларирование попыток ее решения, усугубилась вследствие старения ведущих специалистов в производственных и образовательных учреждениях. Не вникая во внутренние проблемы высшей школы, рассматривая вузы условно в качестве «черных ящиков», можно рекомендовать действенную меру повышения качества выпускников, а именно необходимо разрешить вузам отчислять неуспевающих студентов без действующих в настоящее время последствий в виде финансовых потерь. По оценкам, выполненным на базе анализа учебного процесса, в СПбГМТУ на факультете корабельной энергетики и автоматики для повышения качества выпускников достаточно разрешить отчисления в количестве не более 50 % от плана приема.

В качестве первого шага по возрождению качественного образования это мероприятие будет воспринято в преподавательском сообществе с одобрением и пониманием. Финансовые потери государства при этом предполагаются минимальными. Те студенты, что в настоящее время субсидируются государством, но оканчивают вузы со слабыми знаниями, окажутся без дипломов. В выигрыше будут те вузы, которые в настоящее время продолжают бороться за качество образования, и отчисляют нерадивых студентов вопреки меркантильным интересам администрации.

#### **Предложение 7**

*Обратиться в Правительство России с предложением разрешить вузам по инженерным направлениям и специальностям производить отчисления обучающихся в количестве до 50 % от плана приема без финансовых штрафов и снижения показателей эффективности работы вуза.*

**Проблема 8. Проблема утвержденных ФГОС по направлению «Энергетическое машиностроение» 13.03.03 и 13.04.03**

28.02.2018 г. утверждены Федеральные государственные стандарты (ФГОС) высшего образования (ВО) по направлению «Энергетическое машиностроение» 13.03.03 (уровень бакалавриата) и 13.04.03 (уровень магистратуры).

В стандартах нет упоминания ни о двигателях внутреннего сгорания, ни о паровых и газовых турбинах. Так, для бакалавров названы следующие области профессиональной деятельности: 01 — Образование и наука; 19 — Добыча, переработка, транспортировка нефти и газа; 20 — Электроэнергетика; 24 — Атомная промышленность; 28 — Производство машин и оборудования. Для магистров добавлена еще одна область профессиональной деятельности: 40 — Сквозные виды профессиональной деятельности в промышленности.

Специалисты, подготовленные по направлению «Энергетическое машиностроение» выпускаются без знаний о ДВС и турбинах!

Традиционно специалисты по судовым дизелям и дизелям большегрузных автомобилей, как и специалисты по судовым и стационарным турбинам, готовились по специальностям, соответствующим стандартам «Энергетическое машиностроение».

Кроме того, стандарты явно требуют доработки в части конкретизации направленности профилей и магистерских программ. Надежды на то, что большая свобода, данная разработчикам образовательных программ новыми ФГОС, будет реализована во благо учебного процесса, имеют реальные границы. В каждом университете реализуются десятки образовательных программ, и в целях концентрации и экономии ресурсов руководство вузов имеет склонность объединять курсы учебных дисциплин разных образовательных программ в общие потоки, применять единые формальные правила при разработке образовательных программ, осреднять требования к результатам реализации образовательных программ. В результате образовательные программы, наиболее сложные по содержанию, теряют часть научно-технического материала и педагогической оригинальности в изложении материала. По этим причинам конкретизация содержания курсов дисциплин, заложенная во ФГОС, может дать положительный эффект в деле подготовки инженерных кадров.

**Предложение 8**

*Обратиться в Минобрнауки РФ с предложением доработать ФГОС ВО 13.03.03 и 13.04.03 (уровни бакалавриата и магистратуры), в частности добавить в области профессиональной деятельности: 30 — Судостроение, 31 — Автомобилестроение.*

**Проблема 9. Недостаточный объем и неравномерность заказов судовых дизелей**

Существует также проблема общего развития дизелестроения в России. Это проблема государственного уровня. Импортозамещение может быть успешным только в случае развитой промышленной базы и достаточно большого объема заказов. Если заводы выпускают конкретные модификации дизелей штуками и десятками, импортозамещения не получится. Нужна программа долговременного развития судостроения с гарантированными непрерывными заказами дизелей в определенных объемах... При этом, чтобы локализация комплектующих была успешной, необходимо в этой программе найти место и для всех предприятий, где имеется опыт производства судовых дизелей. В обоснование можно привести социальную аналогию. Для того чтобы талант развивался быстро и полноценно, человек должен быть в коллективе определенного размера... Так и в промышленности. Сомневаюсь, что заводы-монополисты без дружеской конкуренции смогут добиться выдающихся результатов. В числе предприятий, которые должны быть включены в программу развития судового дизелестроения следует назвать погибшие ОАО РУМО в Нижнем Новгороде, АО «Волжский дизель имени Маминых» в Балаково. К сожалению, шансов на возрождение практически не имеет ОАО «Дальдизель» в Хабаровске.

**Предложение 9**

*Обратиться в Минпромторг России с предложением разработать Программу судового дизелестроения, в которой должны быть предусмотрены гарантии минимального, но достаточного для развития производств, объема заказов для основных предприятий отрасли.*

**В качестве выводов следует отметить следующее**

В создавшемся положении возрождение отечественного двигателестроения возможно только с привлечением значительных государственных ресурсов.

Необходимо разработать программу импортозамещения и ввести жесткий контроль для ее реализации в целях ограничения типажа двигателей, применяемых на флоте; обеспечить дизелестроительные заводы заказами в объеме, достаточном для устойчивого развития; организовать кооперацию производства комплектующих; повысить статус главных конструкторов на ведущих дизелестроительных заводах; повысить эффективность экспертного контроля за выполнением программ, финансируемых государством; повысить качество подготовки инженерных кадров, в том числе в области энергетического машиностроения.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛОМАСООБМЕНА В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СРЕДНЕОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

Л.Л. Мягков, к.т.н., доцент кафедры, В.М. Сивачев, аспирант,  
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

Форсирование среднеоборотных дизелей посредством повышения давления наддува приводит к росту теплонапряженности крышек и втулок цилиндров. Это может стать причиной образования термоусталостных трещин в этих деталях, а также причиной задира поршня вследствие высоких температур зеркала цилиндра. Нормализация теплового состояния деталей дизеля может быть достигнута интенсификацией теплообмена в полостях охлаждения за счет пузырькового кипения жидкости. В настоящей работе выполнено моделирование сопряженного теплообмена в системе охлаждения среднеоборотного дизеля нового поколения 12ЧН26,5/31 (Д500) при допущении об отсутствии кипения жидкости. Расчетные исследования показали, что температура жидкости в отдельных зонах полостей охлаждения крышек и втулок цилиндров дизеля достигает температуры насыщения, следовательно, учет процесса кипения в расчете приведет к снижению полученных максимальных температур деталей.

**Введение.** В настоящее время повышение мощности современных среднеоборотных дизелей реализуется за счет форсирования по среднему эффективному давлению. Интенсификация рабочего процесса приводит к росту тепловой напряженности деталей двигателя, образующих камеру сгорания, в том числе втулок и крышек цилиндров. Следствием роста тепловой напряженности могут стать термоусталостные трещины в данных деталях, а также задиры поршня из-за разрушения масляной пленки на зеркале цилиндра. Описанные виды отказов имели место в практике ОАО «Коломенский завод» при доводке и эксплуатации семейства среднеоборотных дизелей типа ЧН26/26 (Д49). Проблема актуальна и для дизелей нового поколения типа ЧН26,5/31 (Д500), так как стремление повысить мощностные, экономические и экологические показатели заставляет производителя постоянно повышать параметры рабочего процесса. На рис. 1 представлен общий вид дизеля 12ЧН26,5/31, предназначенного для различного применения: в тепло-



возах, на судах и аварийных источниках питания атомных электростанций [1].

Решение данной проблемы возможно реализовать путем воздействия на интенсивность теплообмена в полостях охлаждения. Наиболее эффективным способом локального охлаждения можно считать процесс пузырькового кипения с недогревом, так как, во-первых, интенсивность охлаждения в режиме поверхностного кипения значительно выше, чем при вынужденной конвекции, а во-вторых, коэффициент теплоотдачи при кипении напрямую зависит от тепловой нагрузки, следовательно, в зонах с высокими тепловыми потоками интенсивность охлаждения автоматически будет высокой [2]. Таким образом, для обеспечения ресурса перспективных среднеоборотных дизелей представляется возможным интенсифицировать теплоотвод в наиболее те-

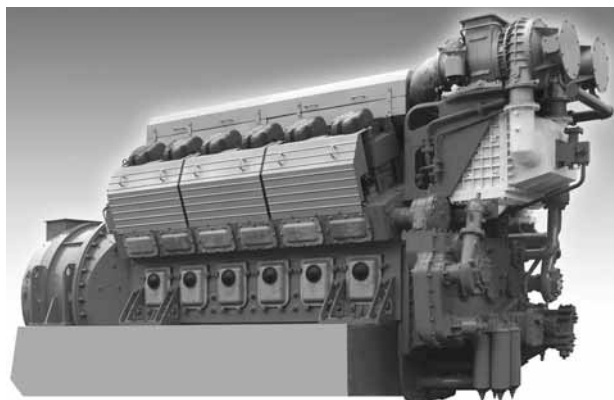


Рис. 1. Среднеоборотный дизель 12ЧН26,5/31 (Д500)

плотна нагруженных зонах деталей дизеля, применяя процесс пузырькового кипения жидкости.

В настоящее время для решения задач, связанных с течениями жидкости в полостях охлаждения двигателей внутреннего сгорания используются методы вычислительной гидродинамики (CFD-методы) [3]. При этом решается сопряженная задача теплообмена, когда к системе уравнений, описывающих температурное поле в потоке жидкости, присоединяется уравнение теплопроводности, описывающее температурное поле в твердом теле, а на границе жидкость–стенка задаются условия сопряжения этих полей [4]. Для моделирования процесса кипения жидкости на стенках проточной части используются специальные зависимости для плотности теплового потока на стенке — модели кипения. Наиболее распространенной применительно к системам охлаждения двигателей является модель Дж. Чена [5]. Обзор литературы показывает, что более точные результаты, по-видимому, дают модификации модели Дж. Чена, учитывающие влияние недогрева жидкости на подавление пузырькового кипения [6, 7]. Имплементация модели кипения в CFD-код может быть реализована с помощью источникового члена в уравнении энергии, который записывается для пристеночных ячеек в жидкости и в твердом теле.

В настоящей работе представлен первый этап расчетного исследования сопряженного тепло-массообмена в системе охлаждения среднеоборотного дизеля 12ЧН26,5/31, а именно при допущении что отсутствуют фазовые переходы жидкости.

**Постановка задачи расчета.** На рис. 2 изображена расчетная область, которая состоит из подобласти  $\Phi$ , занятой деталями двигателя, подобласти  $\Omega$ , занятой охлаждающей жидкостью, и воздушных полостей  $\Psi$ . Для того чтобы учесть неравномерность охлаждения деталей по цилиндрам, расчетная область выбрана таким образом, что включает в себя все 12 цилиндровых комплектов, установленных в блок-картер (рис. 2, поз. 1) двигателя. Помимо крышек (поз. 2) и втулок цилиндров (поз. 3) в сборе, в расчетную область были также включены кожухи клапанного механизма (поз. 4), впускные (поз. 5) и выпускные коллекторы (поз. 6), крышки-заглушки (поз. 7). Движущиеся детали — поршни, шатуны, коленчатый вал, детали клапанного механизма, распределительные валы — не рассматриваются. Исключение составляют впускные и выпускные клапана (поз. 8), так как подвод тепла через фаски клапанов существенно влияет на тепловое состояние крышек цилиндров.

Конвекция воздуха в кожухах клапанного механизма (подобласть  $\Psi$ ), моделируется с помощью методики [8], позволяющей рассматри-

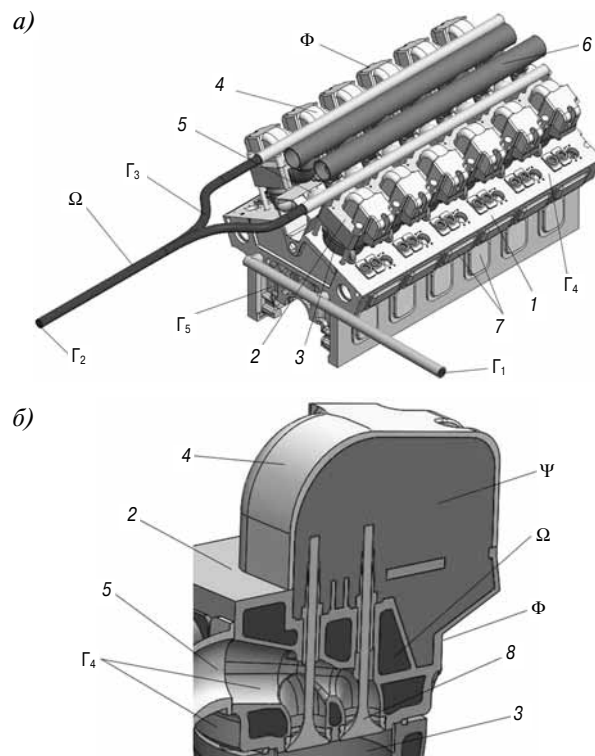


**Рис. 2. Расчетная область (а), фрагмент расчетной области (б) и граничные условия:**

1 — блок цилиндров; 2 — крышка цилиндра; 3 — втулка цилиндра; 4 — кожух клапанного механизма; 5 — впускной коллектор; 6 — выпускной коллектор; 7 — крышки-заглушки; 8 — клапана;  $\Omega$  — область, занятая охлаждающей жидкостью;  $\Phi$  — область, занятая деталями двигателя;  $\Psi$  — воздушная полость;  $\Gamma_1$  — входное граничное условие;  $\Gamma_2$  — выходное граничное условие;  $\Gamma_3$  — граница раздела жидкость–стенка;  $\Gamma_4$  — граничные условия третьего рода;  $\Gamma_5$  — адиабатические граничные условия

вать моделирование естественной конвекции как теплопроводность. Эквивалентный коэффициент теплопроводности воздуха для данных условий составил 0,49 Вт/(м·К).

В системе охлаждения дизеля Д500 жидкостью является вода. Ее расход составляет 130 м³/ч, давление в расширительном бачке поддерживается приблизительно 2,5 бар, температура жидкости на входе равна 85 °С.

Для подобласти  $\Omega$  граничные условия задаются на поверхностях  $\Gamma_1$  (входное граничное условие),  $\Gamma_2$  (выходное граничное условие) и  $\Gamma_3$  (граница раздела жидкость–стенка). При этом для поверхности  $\Gamma_3$  не вводятся тепловые граничные условия, так как при решении сопряженной задачи они реализуются автоматически в процессе создания дискретных аналогов.

Для подобласти  $\Phi$  задается два типа граничных условий: граничные условия третьего рода ( $\Gamma_4$ ) и адиабатические граничные условия ( $\Gamma_5$ ). Граничные условия  $\Gamma_4$  определяются на поверхностях огневого днища крышек цилиндров, впускных

и выпускных каналов; поверхностях клапанов, омываемых газами, и со стороны камеры сгорания; на поверхностях зеркала цилиндра, впускного ресивера и выпускных коллекторов; наружных поверхностях деталей. Граничные условия  $\Gamma_5$  задаются на внутренних поверхностях блока цилиндров и крышек-заглушек.

Граничные условия определяются с помощью программных комплексов «Дизель-РК» [9] и ICE [10, 11], разработанных на кафедре Э2 «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. При этом изменение коэффициента теплоотдачи по радиусу цилиндра получено с помощью специальной функции распределения [12]. Граничные условия третьего рода для наружных поверхностей деталей приняты из соображений консервативности.

Для сопряжения клапан–седло принято допущение об идеальном контакте, так как в случае полномасштабной модели дизеля итерационная процедура согласования температурных полей данных деталей становится слишком трудоемкой, а допущение об идеальном контакте, кроме того, что не требует проведения итерационного расчета, является еще и более консервативным подходом [13].

Коэффициенты термического сопротивления контакта между деталями получены по экспериментальным данным для дизелей данного типа [14].

**Компьютерная модель.** Компьютерная модель состоит из математической модели, сеточной модели и реализации математической модели, которая состоит из допущений, уравнений и граничных условий. Реализация математической модели представляет собой метод дискретизации уравнений и алгоритм решения полученной системы линейных алгебраических уравнений.

Основные допущения математической модели: жидкость считается вязкой, ньютоновской и несжимаемой средой; течение жидкости стационарное и турбулентное; теплофизические свойства воды являются функциями температуры и рассчитываются с помощью стандарта IAPWS-97 [16]; свойства материалов деталей также являются функциями температуры [17].

Основные уравнения математической модели:

— уравнение неразрывности:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0; \quad (1)$$

— уравнение движения:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \rho \mathbf{g} - \nabla \cdot (\mathbf{p} \mathbf{I}) + \nabla \cdot \mathbf{T}; \quad (2)$$

— уравнение энергии:

$$\nabla \cdot (\rho H \mathbf{u}) = \quad (3)$$

$= \nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot \mathbf{T}) + ((\mu/Pr + \mu_t/Pr_t) \nabla h) + \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u} + S_E$ ,  
где  $\nabla$  — оператор Гамильтона;  $\mathbf{u}$  — вектор скорости;  $\mathbf{g}$  — вектор ускорения свободного падения;  $p$  — давление;  $\mu_t$  — турбулентная вязкость;  $\mathbf{I}$  —

единичная матрица;  $H = h + |\mathbf{u}|^2/2$  — полная энтальпия;  $h$  — энтальпия;  $S_E$  — источниковый член уравнения энергии;  $Pr_t$  — турбулентное число Прандтля.

Тензор касательных напряжений:

$$\mathbf{T} = (\mu + \mu_t)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - 2/3(\mu + \mu_t)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}. \quad (4)$$

Уравнение энергии решается во всей расчетной области (подобласти  $\Omega$ ,  $\Phi$  и  $\Psi$ ).

Для описания процессов турбулентного переноса используется  $k$ – $\omega$  Shear Stress Transport (SST) модель Ментера [15], использующая пристеночные функции.

Уравнения связи представляют собой зависимости теплофизических свойств жидкости и материалов деталей от температуры.

Для замыкания системы дифференциальных уравнений записываются граничные условия. На поверхности  $\Gamma_1$  задан расход  $Q_{in}$  и температура жидкости  $T_{in}$ :

$$\int_{S_{\Gamma_1}} (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dS = Q_{in}; \quad (5)$$

$$T|_{\Gamma_1} = T_{in}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{n}$  — нормаль к поверхности.

На поверхности  $\Gamma_2$  задано нулевое изменение скорости в направлении выхода:

$$(\nabla u \cdot \mathbf{n})|_{\Gamma_2} = 0; \quad (7)$$

$$(\nabla v \cdot \mathbf{n})|_{\Gamma_2} = 0; \quad (8)$$

$$(\nabla w \cdot \mathbf{n})|_{\Gamma_2} = 0, \quad (9)$$

где  $u, v, w$  — проекции вектора скорости на оси  $x, y, z$  соответственно.

На поверхности  $\Gamma_3$  задано условие прилипания:

$$\mathbf{u}|_{\Gamma_3} = 0. \quad (10)$$

Граничные условия на поверхностях  $\Gamma_4$  (табл. 1) и  $\Gamma_5$  записываются следующим образом:

$$-(\lambda_T \nabla T_T \cdot \mathbf{n})|_{\Gamma_4} = \alpha(T_w - T_{cp}); \quad (11)$$

$$(\lambda_T \nabla T_T \cdot \mathbf{n})|_{\Gamma_5} = 0, \quad (12)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $T_w$  — температура стенки;  $T_{cp}$  — температура окружающей среды; индекс « $T$ » означает, что параметр относится к твердому телу.

Моделирование контактных пар проводится путем задания соответствующих коэффициентов термического сопротивления контакта РК (табл. 2).

Сеточная модель состоит из полиэдрических гексагональных ячеек и насчитывает более 120 млн ячеек. Вблизи стенок в подобласти  $\Omega$  имеется призматический пограничный слой, насчитывающий две ячейки по толщине.

Таблица 1

## Граничные условия

| Поверхность теплообмена       | $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) | $T_{cp}$ , °С |
|-------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| Огневое днище крышки цилиндра | См. рис. 3                        | 723           |
| Зеркало цилиндра              | См. рис. 3                        | См. рис. 3    |
| Впускной канал                | 333                               | 78            |
| Выпускной канал               | 904                               | 641           |
| Впускной ресивер              | 234                               | 78            |
| Выпускные коллекторы          | 212                               | 641           |
| Наружные поверхности          | 30                                | 40            |

Таблица 2

Коэффициенты  
термического сопротивления контакта

| Контактные пары                             | $R_k \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> ·К/Вт |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Клапан–седло клапана                        | 0                                       |
| Седло клапана–крышка цилиндра               | 108,7                                   |
| Направляющая втулка клапана–крышка цилиндра | 108,7                                   |
| Направляющая втулка–клапан                  | 1250                                    |
| Остальные контактные пары                   | 0                                       |

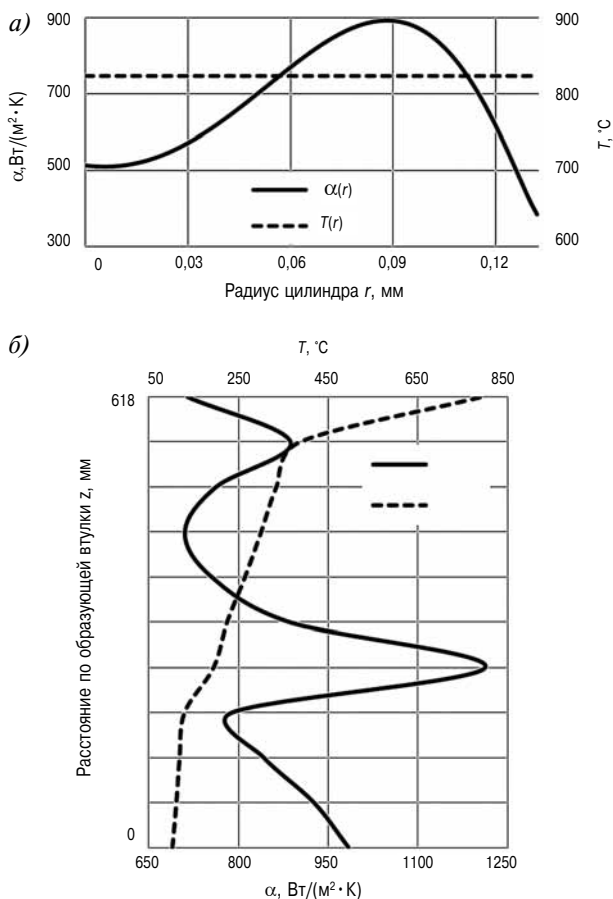


Рис. 3. Граничные условия для огневого днища крышки цилиндра (а) и зеркала цилиндра (б)

Дискретизация уравнений сохранения реализуется с помощью метода контрольного объема [18]. Затем полученная система алгебраических

уравнений решается с помощью специализированного метода [19].

Численное моделирование проводилось с помощью программного комплекса STAR-CCM+.

**Расчетные исследования.** С помощью разработанной компьютерной модели проведены расчетные исследования сопряженного теплообмена в системе охлаждения дизеля 12ЧН26,5/31. Численное моделирование осуществлялось для режима максимальной мощности при частоте вращения 1000 об/мин,  $p_{me} = 27$  бар и  $p_z = 200$  бар.

В результате выполненных расчетов получены трехмерные распределения скоростей, давления и температур жидкости в полостях охлаждения, а также распределение температуры в деталях. На рис. 4 представлены распределения скорости и температуры жидкости в проточной части. На рис. 5 представлены температурные поля деталей цилиндрического комплекта, наиболее удаленного от входа жидкости в систему охлаждения.

Вследствие коллекторного эффекта расход жидкости в полостях охлаждения цилиндров неодинаковый. Максимальная разница расходов

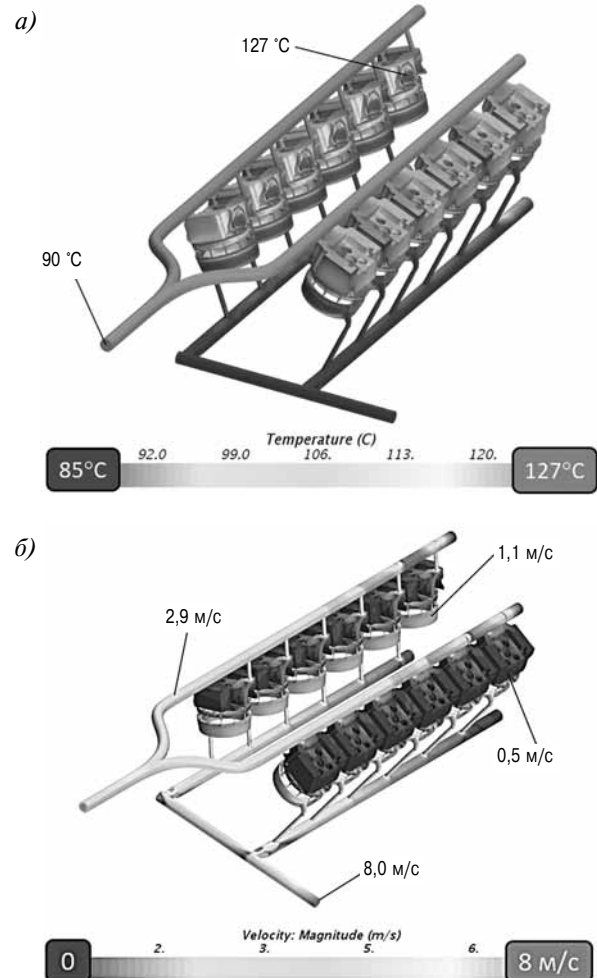


Рис. 4. Температурное (а) и скоростное (б) поле охлаждающей жидкости

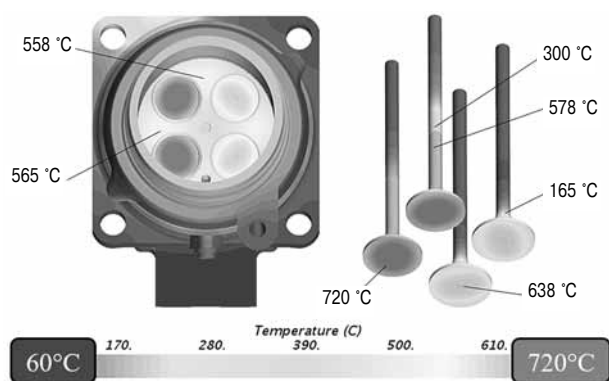


Рис. 5. Температурные поля втулки, крышки цилиндров и клапанов

не превышает 10 %. При этом разница максимальных температур цилиндров невелика и приблизительно равна 6 °С. Перепад температур между входом и выходом жидкости из системы охлаждения составил порядка 5 °С.

#### Выводы

1. Выполнен расчет сопряженного тепломассообмена в системе охлаждения среднеоборотного дизеля 12ЧН26,5/31 (Д500).

2. Согласно полученным результатам максимальная температура крышки цилиндра составляет 565 °С, выпускного клапана — 720 °С, впускного клапана — 638 °С, втулки цилиндра — 380 °С.

3. Температура жидкости в отдельных зонах полостей охлаждения втулок и крышек цилиндров достигает температуры насыщения, следовательно, учет процесса кипения в расчете приведет к снижению максимальных температур деталей, полученных при допущении об отсутствии фазовых переходов жидкости.

4. Обзор литературы показывает, что при моделировании кипения жидкости в полостях охлаждения двигателя целесообразно принять режим течения однофазным, а интенсификацию теплообмена на поверхностях проточной части учитывать с помощью модели Дж. Чена для плотности теплового потока на стенке.

#### Литература

1. Официальный сайт ОАО «Коломенский завод» [Электронный ресурс]. URL: <http://kolomnadiesel.com> (дата обращения: 12.12.18).
2. Новенников А.Л. Теоретические аспекты, методы и пути улучшения теплового состояния охлаждаемых деталей поршневых двигателей: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02. / А.Л. Новенников; Ярославский политехнический институт. Ярославль, 1993. 213 с.
3. Чайнов Н.Д., Мягков Л.Л., Маластовский Н.С. Численное моделирование движения жидкости в

полости охлаждения крышки цилиндра среднеоборотного дизеля // Грузовик. — 2015. — № 5. — С. 4–8.

4. Urip E., Yang S. An Efficient IC Engine Conjugate Heat Transfer Calculation for Cooling System Design // SAE Paper. — 2007. — № 01-0147. — P. 9.

5. Chen J.C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow // Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. — 1966. — Vol. 5, № 3. — P. 323–329.

6. Steiner H., Kobor A., Gebhard L. A wall heat transfer model for subcooled boiling flow // International Journal of Heat Mass Transfer. — 2005. — Vol. 48. — P. 4161–4173.

7. CFD implementation and experimental validation of the Chen model for heat transfer in nucleate boiling / C. Paz, E. Suarez, M. Concheiro, [et al.] // Computational Methods in Multiphase Flow VII. 2013. Vol. 79. — P. 377–385.

8. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. — М.: Энергия, 1977. — 344 с.

9. Кулешов А.С. Развитие методов расчета и оптимизация рабочих процессов ДВС: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02. / А.Л. Кулешов; МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2011. 235 с.

10. Математическое моделирование полей температур, деформаций и напряжений в деталях цилиндропоршневой группы поршневых двигателей / Н.Д. Чайнов, А.Н. Краснокутский, Л.Л. Мягков [и др.]. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. — 32 с.

11. Чайнов Н.Д., Русинковский С.Ю. Расчет согласованных стационарных полей температур узла крышка цилиндра–клапаны двигателя внутреннего сгорания // Двигателестроение. — 2014. — № 2. — С. 3–7.

12. Костин А.К. Ларионов В.В., Михайлов Л.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. — Л.: Машиностроение, 1979. — 222 с.

13. Iqbal O., Arora K., Sanka M. Thermal Map of an IC Engine via Conjugate Heat Transfer: Validation and Test Data Correlation // SAE Int. J. Engines. 2014. № 01-1180. — P. 366–379.

14. Чайнов Н.Д., Краснокутский А.Н., Капицуков А.В. Оценка работоспособности и повышение герметичности газового стыка форсированных среднеоборотных дизелей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2017. — № 6. — С. 51–57.

15. Menter F.R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. — 1994. — Vol. 32, № 8. — P. 1598–1605.

16. Fernandez-Prini R., Dooley R. The International Association for the Properties of Water and Steam. Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam., Erlangen. Germany. — 1997.

17. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко [и др.]. — 2-е изд., доп. и испр. — М.: Машиностроение, 2003. — 784 с.

18. Patankar S.V., Spalding D.B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows // International Journal of Heat Mass Transfer. — 1972. — Vol. 15. — P. 1787–1806.

19. STAR-CCM+ Version 12.04. User guide. — 2017.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ФАЗОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СГОРАНИЯ В ДИЗЕЛЬНЫХ И ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА

С.Б. Милляев, зам. гл. конструктора,  
ОАО «Коломенский завод»

Нормативы вредных выбросов для мощных среднеоборотных двигателей становятся все более жесткими. Одной из главных проблем является снижение выбросов оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) при сохранении высокой топливной экономичности. Предложен метод для снижения максимальных температур цикла за счет позднего впрыска топлива и совмещения фазы максимальной скорости сгорания с моментом достижения максимальной скорости отвода тепла. Техническим результатом является эффективное снижение выбросов  $\text{NO}_x$  при заданном значении расхода топлива. Метод нашел применение на среднеоборотных двигателях внедорожного класса типа Д49 и Д500 при работе на дизельном и газообразном топливах.

## Введение

Известно, что количество выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  зависит от величин средней и локальных температур рабочего тела в камере сгорания. Чем выше эти температуры, тем больше скорость образования оксидов азота. Способы снижения  $\text{NO}_x$  хорошо известны [1, 2, 3], однако их практическая реализация, как правило, связана со снижением КПД рабочего цикла.

Целью исследования является снижение выбросов оксидов азота при заданном значении расхода топлива за счет снижения скорости нарастания давления и температуры рабочего тела посредством совмещения фазы максимальной скорости тепловыделения и периода максимальной скорости отвода тепла в стенки цилиндра.

## Методика исследований

В основу методики оптимизации показателей сгорания топлива и алгоритма ее реализации положено решение уравнений (1–5) на основе первого закона термодинамики, и уравнений кинематических функций (6–7) для кривошипно-шатунного механизма.

Принято допущение, что положение максимума скорости тепловыделения соответствует угловому положению поршня относительно верхней мертвой точки  $\alpha Q50$ , при котором выделяется половина

общего количества теплоты при сгорании топлива. Это положение соответствует так называемому «центру тяжести сгорания», определяемому по интегральной характеристике тепловыделения. Целевое значение  $\alpha Q50_{\text{opt}}(\text{NO}_x \text{ min})$ , при котором достигается минимальная скорость образования  $\text{NO}_x$  отвечает, в соответствии с данной методикой, максимуму относительной скорости увеличения объема цилиндра. Изменение объема характеризуется кинематическими функциями  $\gamma_k$  и  $\sigma_k$  для скорости и перемещения поршня. Начало сгорания  $\alpha_{\text{start}}$  соответствует моменту воспламенения, а конец сгорания  $\alpha_{\text{end}}$  — моменту достижения максимального количества выделившейся теплоты.

Тепловыделение:

$$\frac{dQ(\alpha)}{d\alpha} = \frac{k}{k-1} P(\alpha) \frac{dV(\alpha)}{d\alpha} + \frac{1}{k-1} V(\alpha) \frac{dP(\alpha)}{d\alpha} + \frac{dQ(\alpha)_w}{d\alpha}; \quad (1)$$

$$Q(\alpha) = \int_{\alpha_{\text{start}}}^{\alpha} \frac{dQ(\alpha)}{d\alpha} d\alpha, \quad Q = \int_{\alpha_{\text{start}}}^{\alpha_{\text{end}}} \frac{dQ(\alpha)}{d\alpha} d\alpha; \quad (2)$$

$$\alpha Q50 = \alpha \{|Q(\alpha) - 0,5Q| = \min[Q(\alpha) - 0,5Q]\}. \quad (3)$$

Снижение выбросов  $\text{NO}_x$ :

$$\Delta \alpha Q50 = \min(\alpha Q50 - \alpha Q50_{\text{opt}}(\text{NO}_x \text{ min})); \quad (4)$$

$$\alpha Q50_{\text{opt}}(\text{NO}_x \text{ min}) = \alpha \{ (1/V) (dV/d\alpha) \}_{\text{max}}; \quad (5)$$

$$\frac{1}{V(\alpha)} \frac{dV(\alpha)}{d\alpha} = \frac{\pi}{360} \frac{\gamma_k}{(1/(\epsilon-1) + \sigma_k/2)}. \quad (6)$$

Скорость и перемещение поршня:

$$\begin{aligned} \gamma_k &= \sin(\alpha)(1 + \lambda \cos(\alpha)), \\ \sigma_k &= 1 - \cos(\alpha) + 0,5\lambda \sin^2(\alpha). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $Q(\alpha)$  — количество теплоты, образующейся при сгорании топлива в функции от угла поворота кривошипа  $\alpha$ ;  $P(\alpha)$  — давление газов;  $V(\alpha)$  — объем цилиндра;  $Q(\alpha)_w$  — потери теплоты в стенки камеры сгорания;  $k = c_p/c_v$  — отношение теплоемкостей газов;  $\alpha Q50$  и  $\alpha Q50_{\text{opt}}(\text{NO}_x \text{ min})$  — фазовые показатели сгорания.

Выбор показателя оптимального сгорания  $\alpha Q50$  имеет два ключевых преимущества. Во-первых, он может быть рассчитан непосредственно при наличии диаграммы давления в цилиндре. Во-вторых, он слабо зависит от межциклового не-

стабильности процесса сгорания и имеет хорошую повторяемость результатов. Начало и окончание сгорания, также как и пик скорости тепловыделения, напротив, более чувствительны к межцикловым изменениям давления и на выходе образуют «шумные» сигналы. В то же время значение показателя  $\alpha Q_{50}$  может быть надежно вычислено на всех режимах работы двигателя.

Экспериментальные исследования проводились на отсеках дизелей ОД49 и ОД500, полноразмерных двигателях типа 12ЧН26/26 (5-26ДГ-03, 21-26ДГ-01) и 12ЧН26,5/31 (12ЛДГ500), а также на отсеке двигателя ОД49, оборудованном для работы по газовому циклу с искровым зажиганием. Получены результаты испытаний газового двигателя в составе мотор-генератора 6ГМГ (12ГЧН26/26) промышленного применения.

### Результаты исследований

В ходе проведенных исследований установлено, что наибольший эффект по снижению образования  $\text{NO}_x$  можно реализовать путем организации смесеобразования и сгорания в фазе, при которой максимальная скорость тепловыделения соответствует максимальной относительной скорости увеличения объема цилиндра на такте рабочего хода, которая зависит лишь от углового положения кривошипа [4]. Что же касается определения фазы максимальной скорости тепловыделения, то она зависит от многих факторов и главным образом от параметров топливоподачи. Поставленная цель достигается путем корректировки угла начала впрыска топлива, что в сочетании с объемом цикловой подачи обеспечивает начало горения при заданном положении поршня. При этом достижение максимальной скорости сгорания обеспечивается при углах поворота кривошипа, соответствующих положению максимума относительной скорости увеличения объема цилиндра, когда имеет место наибольшая скорость отвода тепла. Процесс сгорания, преимущественно в диффузионной фазе, смещается на линию расширения, а максимум скорости тепловыделения соответствует фазе максимальной скорости изменения объема цилиндра. Благодаря быстрому отводу части тепла (внутренней энергии) от рабочего тела максимальные значения температур будут снижены. Такое протекание процесса сгорания повышает эффективность работы и обеспечивает минимальную скорость образования  $\text{NO}_x$ .

Скорость нарастания давления и максимальная температура газов снижаются в результате активного отвода теплоты от газов. Снижение расхода топлива и высокий КПД обеспечиваются при скоростях тепловыделения, достаточных для малой продолжительности сгорания, и оптимально согласованных с ходом поршня. Если большая

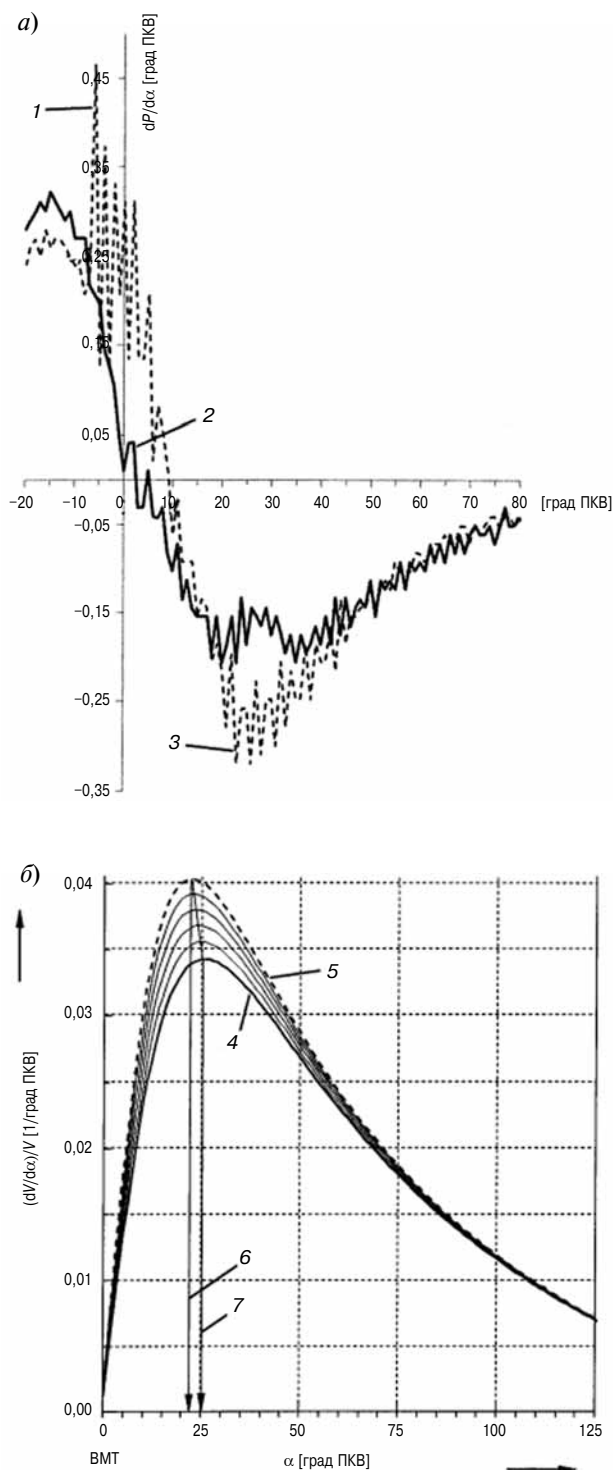


**Рис. 1. Изменение скорости нарастания давления газов в дизеле  $dP/d\alpha$  [МПа/град ПКВ] и функции изменения объема цилиндра  $(dV/d\alpha)/V$  [1/град ПКВ] в зависимости от угла поворота кривошипа [4]:**

*a* — графики изменения скорости нарастания давления  $dP/d\alpha$  при различных значениях угла опережения впрыска топлива (5 град ПКВ до ВМТ — сплошная линия, 10 град ПКВ до ВМТ — штриховая линия); *б* — графики изменения кинематической функции объема цилиндра  $(dV/d\alpha)/V$  на участке рабочего хода при различных значениях степени сжатия ( $\epsilon = 15$  — сплошная линия,  $\epsilon = 20$  — штриховая линия)

часть теплоты высвобождается слишком рано, возрастают потери теплоты в стенки камеры сгорания. Позднее выделение теплоты приводит к ухудшению термического КПД, высоким температурам отработавших газов и выбросу продуктов неполного сгорания топлива.

На рис. 1, а приведены графики скорости нарастания давления газов  $dP/d\alpha$  (МПа/град ПКВ) в цилиндре двигателя типа Д49 (12ЧН26/26) на режиме полной мощности  $P_e = 1470$  кВт при  $n = 750$  об/мин [4]. Штриховая линия соответствует углу начала впрыска топлива 15 град ПКВ до ВМТ, сплошная — 5 град ПКВ до ВМТ. Как видно на графиках, при раннем впрыске топлива (штриховая линия) начало горения сопровождается резким скачком давления в фазе 10 град ПКВ до ВМТ (поз. 1). Поздний впрыск топлива, при котором начало горения соответствует фазе 0 град ПКВ (ВМТ), приводит к значительному снижению скорости нарастания давления  $dP/d\alpha$  (поз. 2). В диапазоне углов 22–25 град ПКВ после ВМТ наблюдаются минимальные скорости нарастания давления (поз. 3), что свидетельствует о потере внутренней энергии газов при быстром увеличении объема цилиндра.

На рис. 1, б приведены графики относительной скорости изменения объема цилиндра  $(dV/d\alpha)/V$ , согласно уравнениям (6) и (7) [4]. Значение этого параметра, как следует из зависимостей для  $\gamma_k$  и  $\sigma_k$ , связана только с конструкцией двигателя ( $\lambda$  и  $\epsilon$ ). Численные расчеты показали, что величина  $\lambda$  (отношение радиуса кривошипа к длине шатуна) в пределах ее реальных значений 0,2–0,32 оказывает незначительное влияние на функцию изменения объема. При этом угловое отклонение положения экстремальных значений функции не более  $\pm 0,5$  град ПКВ. Существенное влияние на функцию изменения объема оказывает степень сжатия двигателя. Сплошная линия соответствует степени сжатия  $\epsilon = 15$  (поз. 4), штриховая — предельному значению  $\epsilon = 20$  (поз. 5).

Для двигателя типа Д49 в зависимости от степени сжатия положение максимума функции объема находится в диапазоне углов 22–25 град ПКВ после ВМТ (поз. 6 и 7). Испарение и выгорание топлива ускоряется за счет турбулизации заряда в пристеночных зонах, вызванной движением поршня. Интенсивность турбулентности зависит от функции изменения объема  $(dV/d\alpha)/V$ . Фаза максимальной скорости тепловыделения должна соответствовать положению максимума приведенной выше функции объема цилиндра.

На рис. 2 представлен опытный отсек дизеля ОД49 и типовый комплект датчиков для оценки качества процессов сгорания и впрыска топлива.



Рис. 2. Отсек двигателя ОД49 с комплектом датчиков для индицирования давления впрыска топлива, давления газов в процессах сгорания и газообмена

Помимо индицирования давлений регистрировались и другие параметры, необходимые для анализа, в том числе концентрации  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$  и дымность отработавших газов. Технические характеристики отсека: диаметр цилиндра 260 мм, ход поршня 260 мм, рабочий объем цилиндра 13,8 дм<sup>3</sup>, степень сжатия 12,5–16,5, номинальная частота вращения 1000 об/мин.

На рис. 3 приведены диаграммы давления газов  $P$  и давления топлива  $P_f$  на входе в форсунку. Для оценки фаз подачи топлива приведена диаграмма подъема иглы форсунки  $L_i$  по углу поворота коленчатого вала. Информация о характере впрыска топлива позволяет более точно определить

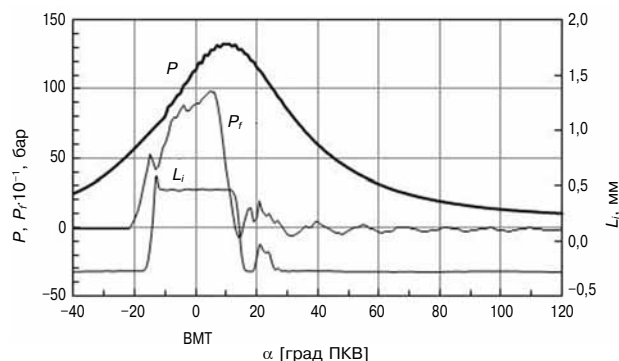


Рис. 3. Диаграммы впрыска топлива (давление топлива на входе в щелевой фильтр форсунки), подъема иглы форсунки и давления газов в камере сгорания двигателя ОД49 на режиме полной мощности

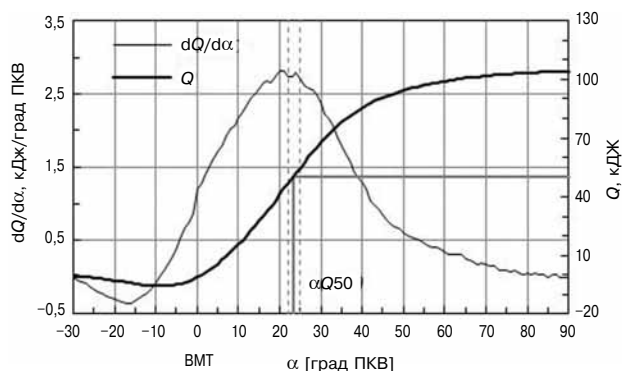


Рис. 4. Интегральная ( $Q$ ) и дифференциальная ( $dQ/d\alpha$ ) характеристики тепловыделения в цилиндре двигателя ОД49

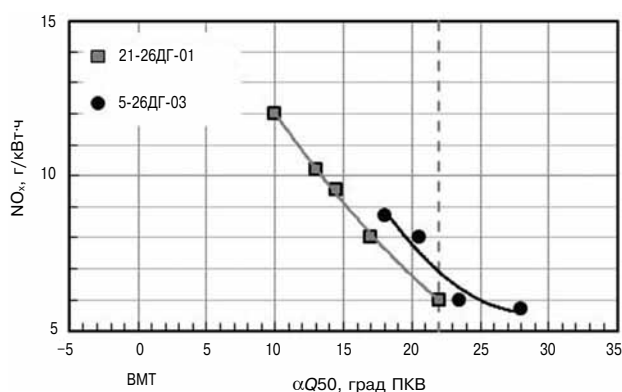


Рис. 5. Изменение удельных выбросов оксидов азота в зависимости от фазы сгорания  $\alpha Q_{50}$  тепловозных дизель-генераторов

фазовые показатели сгорания. На рис. 4 приведены результаты обработки диаграммы давления газов на тепловыделение.

На рис. 5 показано, что наименьший выброс  $NO_x$  на режиме полной мощности может быть достигнут при положении фазы сгорания 22 град ПКВ после ВМТ и более поздних фазах. Однако выбор оптимального значения показателя зависит от заданного уровня расхода топлива (согласно предложенной методике наиболее эффективной является фаза сгорания в диапазоне 22–25 град ПКВ после ВМТ).

Концепция снижения выбросов  $NO_x$ , изложенная выше, находит применение при разработке газовых двигателей. Детальные исследования процесса сгорания проводились на отсеке ОД49, оборудованном для работы на природном газе (рис. 6).

На двигателе установлена система зажигания Altronic CD200, электромагнитный клапан подачи газа 4ЭКГ.03, электронный регулятор частоты вращения ГЭРЧВ-01 (ООО «ППП Дизельавтоматика»). Поршень с «плоской» камерой сгорания, степень сжатия 12,6. Фазы газораспределения обе-

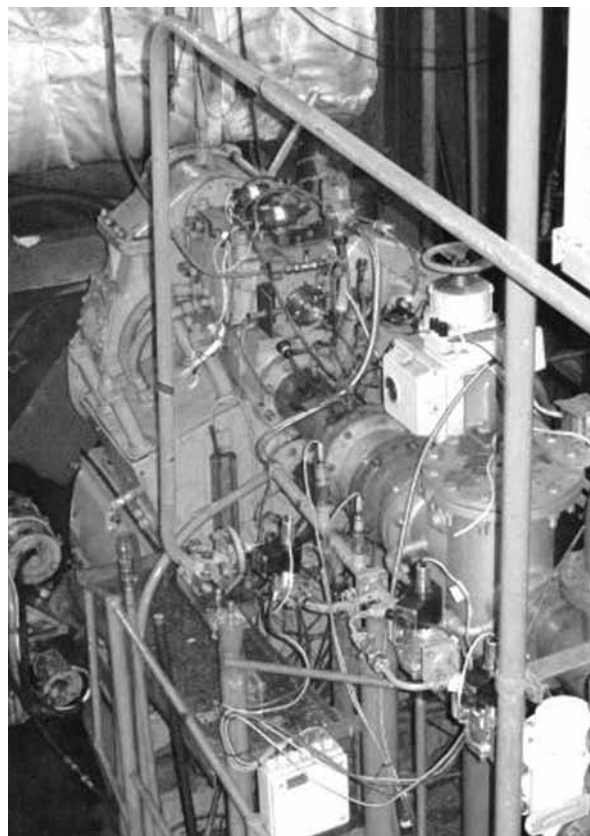


Рис. 6. Опытный одноцилиндровый газовый отсек ОД49 (1ГЧН26/26)

спечивали продувку цилиндра продолжительностью 45 град ПКВ. В ходе испытаний была выявлена область стабильной работы и выбраны регулировки двигателя на режимах газового двигателя-генератора 9ГМГ для маневрового теплового.

На рис. 7 приведены основные рабочие параметры отсека с оптимизированными значениями коэффициента избытка воздуха и угла опережения зажигания.

Доводка процесса сгорания на газовом отсеке включала применение различных вариантов источников искры. Применялись свечи с резбовым соединением M14×1,25 (GK3-5), M18×1,5 (GL3-5) и M18×1,5 (MPC 1900) со встроенной предкамерой. Испытания показали, что со свечой M18 концентрация  $NO_x$  на выпуске снижается на 10–15 % по сравнению с работой двигателя со свечой M14. Однако при этом увеличивается расход топлива примерно на 3 %. На границах стабильной области работы наблюдается детонация при значениях коэффициента  $\lambda$  (по датчику кислорода) меньше 1,1–1,2 и неполное сгорание газа, вплоть до пропуска вспышек —  $\lambda > 1,65$  на режиме полной мощности. Применение встроенной предкамеры (пассивного типа) расширяет области работы двигателя и позволяет при прочих равных условиях увеличить коэффициент  $\lambda$  на 0,1–0,2

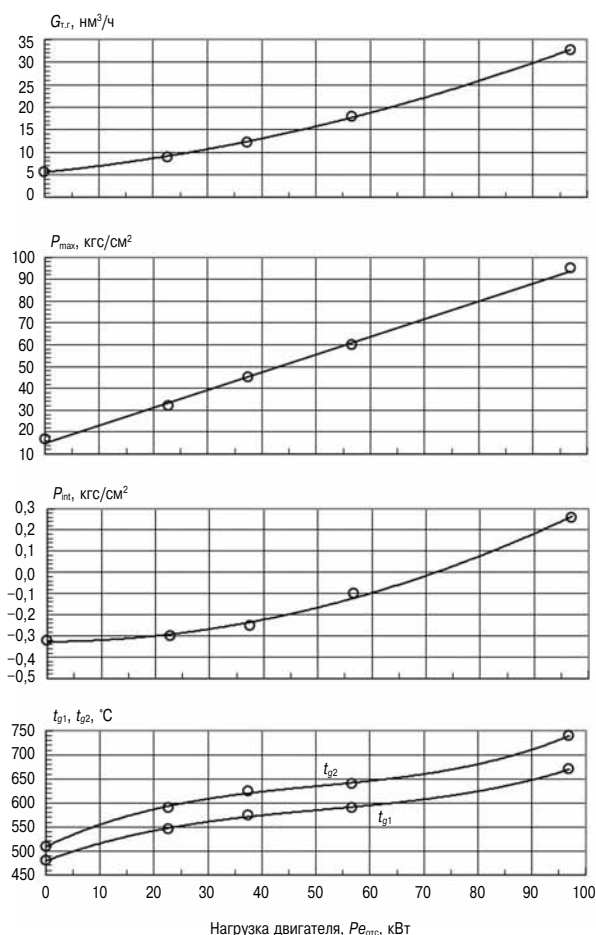


Рис. 7. Параметры отсека ОД49 на режимах имитации тепловозной характеристики газового двигателя-генератора 9ГМГ ( $G_{tr}$  — расход топливного газа,  $P_{max}$  — максимальное давление сгорания в цилиндре,  $P_{int}$  — давление воздуха в ресивере двигателя,  $t_{g1}$  и  $t_{g2}$  — соответственно температура газов за цилиндром и в выпускном коллекторе)

единицы, как на полной мощности, так и на частичных нагрузках.

На рис. 8 показан характер изменения концентрации  $NO_x$  в отработавших газах в зависимости от фазы сгорания  $\alpha Q_{50}$  при частичной нагрузке 35 %  $Pe$ . В диапазоне углов 22–25 град ПКВ предкамера свечи практически не влияет на выброс  $NO_x$ , однако уровень концентрации существенно зависит от состава смеси. Так, увеличение коэффициента  $\lambda$  от 1,45 до 1,65 приводит к снижению концентрации  $NO_x$  от 500 до 150 ppm.

При работе газового двигателя характерно повышение температуры выпускных газов на выходе из цилиндра вследствие малой степени расширения продуктов сгорания и меньших, по сравнению с дизелем, скоростей сгорания метановоздушных смесей. Для оценки теплового состояния деталей камеры сгорания выполнено термометрирование крышки и втулки цилиндра с использованием хромель-алюмелевых термопар. Испытания двигателя в составе газового мотор-

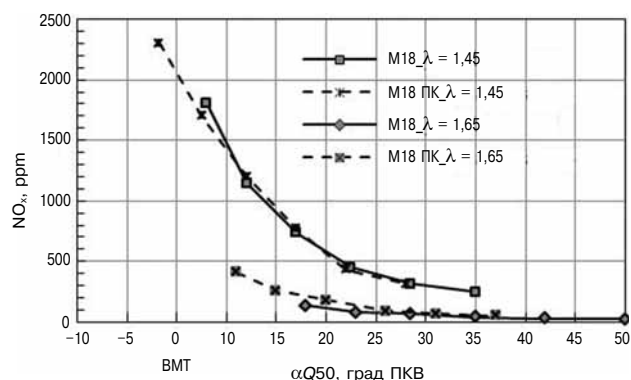


Рис. 8. Изменение концентрации  $NO_x$  на выпуске отсека ОД49 в зависимости от фазы сгорания  $\alpha Q_{50}$  при нагрузке 35 %  $Pe$  ( $n = 770$  об/мин)

генератора 6ГМГ (12ГЧН26/26) проводились на режимах нагрузочной характеристики при  $n = 1000$  об/мин. Термопары заключались в трубки из нержавеющей стали с внутренним диаметром 1,2 мм. На огневом днище крышки цилиндра спаи термопар приваривались импульсной сваркой к поверхности днища (рис. 9).

На режиме максимальной мощности 1300 кВт температура днища между выпускными клапанами

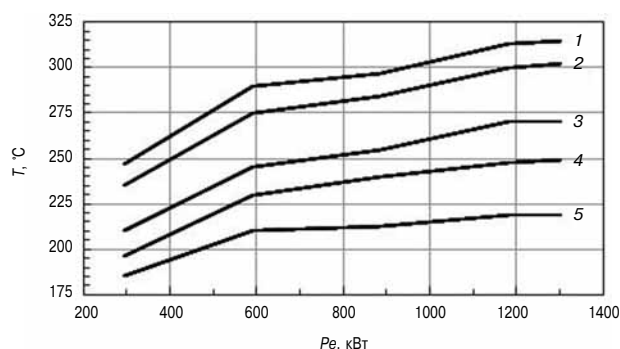
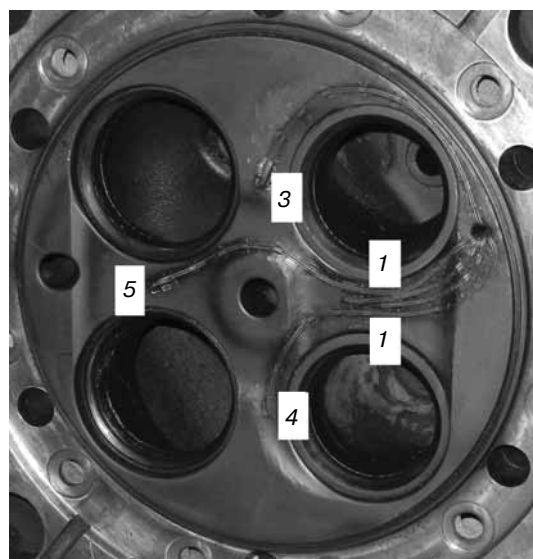


Рис. 9. Результаты термометрирования газового мотора (12ГЧН26/26) на режимах нагрузочной характеристики при  $n = 1000$  об/мин

составила 315 °С (температура втулки цилиндра в районе газового стыка 140 °С), что обеспечивает необходимый запас прочности. Допустимые значения температур крышек цилиндров из высокопрочного легированного чугуна не должны превышать 350 °С.

В качестве топлива применялся природный газ следующего состава:  $\text{CH}_4 = 96 \%$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6 = 2,2 \%$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,7 \%$ ,  $i\text{-C}_4\text{H}_{10} = 0,1 \%$ ,  $n\text{-C}_4\text{H}_{10} = 0,1 \%$ ,  $\text{CO}_2 = 0,2 \%$ ,  $\text{N}_2 = 0,7 \%$ . Оценку применимости газового топлива целесообразно проводить по метановому числу [2], которое для данного газа составляет не менее 85 ед. Газовый мотор в комплектации с модернизированным поршнем имел геометрическую степень сжатия 12,6. Высокая детонационная стойкость газа позволяет обеспечить надежную работу в диапазоне углов опережения зажигания до 32–36 град ПКВ до ВМТ и значениях коэффициента избытка воздуха до 1,4–1,5 по датчику кислорода при нагрузках, близких к полной мощности.

Процесс сгорания с низким выбросом  $\text{NO}_x$  связан с решением проблемы нестабильности горения обедненных смесей. Область работы двигателя определяется, главным образом, границами детонации и пропуска вспышек. Обе границы сближаются для более высоких значений коэффициента избытка воздуха и среднего эффективного давления. Конкретные значения параметров и их пределы сильно зависят как от свойств газа, так и от системы сгорания (источника искры, способа подачи газа), частоты вращения и размеров цилиндра двигателя.

#### Выводы

1. В рассмотренной методике реализуется возможность использования кинематической функции изменения объема цилиндра для определения фазовых показателей сгорания в целях снижения выбросов  $\text{NO}_x$ , как в дизельных двигателях, так и в газовых двигателях с искровым зажиганием.

2. Наибольший эффект в снижении выбросов  $\text{NO}_x$  достигается путем организации процесса сгорания в фазе, при которой максимальная скорость тепловыделения соответствует максимуму относительной скорости увеличения объема цилиндра на такте рабочего хода, которая в свою очередь зависит лишь от углового положения кривошипа.

3. Главной проблемой для газовых двигателей является обеспечение стабильного сгорания при высоком КПД, поэтому требуется оценка влияния на процесс сгорания конструкции двигателя, системы подачи газа и зажигания, внешних условий на впуске и выпуске, состава топливного газа.

#### Литература

1. Никитин Е.А. Многотопливный, перспективный и экологически чистый / Е.А. Никитин, Э.А. Улановский, В.А. Рыжов, С.Б. Миляев // Двигатель. — 2000. — № 5–6 (11–12). — С. 50–52.
2. Рыжов В.А. Опыт эксплуатации двигателей Д49 на топливах широкого фракционного состава / В.А. Рыжов, Э.А. Улановский, С.Б. Миляев // Сб. науч. трудов. — Вып. 23: Двигатели и энергоустановки. — Харьков: ХАИ, 2001. — С. 174–177.
3. Пат. 2163975 Российская Федерация, МПК7 F 02 В 3/12. Способ работы двигателя внутреннего сгорания / Никитин Е.А., Улановский Э.А., Миляев С.Б. [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО НВФ «Конвер». — № 2000103288/06; заявл. 14.02.2000; опубл. 10.03.2001, Бюл. № 7. — 4 с. : ил.
4. Пат. 2634343 Российская Федерация, МПК7 F 02 В 3/12. Способ работы двигателя внутреннего сгорания / Рыжов В.А., Миляев С.Б.; заявитель и патентообладатель ОАО ХК «Коломенский завод». — № 2015154881; заявл. 22.12.2015; опубл. 25.10.2017, Бюл. № 30. — 9 с. : ил.
5. Рыжов В.А., Печенин В.В. Совершенствования дизелей 16Д49 дизель-дизельных агрегатов 1ДДА12000 кораблей корвет проекта 20380 // Двигателестроение. — 2014. — № 1 (255). — С. 12–19.

## СНЯТИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ДЕТАЛЯХ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ ГАЗОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

*Д.А. Иванов, к.т.н., доц., В.С. Зюкин, асп., А.А. Колосков, асп.  
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации*

В процессе восстановительного ремонта деталей авиадвигателей широко используются такие технологии, как наплавка и приваривание вставок малой толщины аргонодуговой сваркой. При этом значительные остаточные напряжения полностью снять нагревом невозможно без негативных последствий для структуры материала изделия.

Представлены результаты исследования, показывающие, что воздействие пульсаций воздушного потока без применения нагрева позволяет эффективно управлять остаточными напряжениями металлических элементов конструкций, в том числе устранить нежелательные растягивающие напряжения на поверхности металлических деталей авиадвигателей, что уменьшает риск образования трещин в процессе их эксплуатации.

В процессе восстановительного ремонта деталей авиадвигателей широко используются такие технологии, как наплавка и приваривание вставок аргонодуговой сваркой. При этом локальный нагрев выше температуры плавления приводит к возникновению значительных остаточных напряжений. Полностью их снять нагревом, который в основном применяется для этих целей на практике, невозможно без таких негативных последствий для структуры материала изделия, как рост зерен, коагуляция карбидных и интерметаллидных включений. К тому же остаточные напряжения снимаются до минимального значения при данной температуре за 1,5–2 часа. Методы поверхностной пластической деформации мало пригодны для снятия остаточных напряжений в деталях авиадвигателей, так как дробеструйная обработка, центробежно-шариковый (роликовый) наклеп недопустимо ухудшают чистоту поверхности, а накатывание стальным шариком (роликом) и алмазное выглаживание оправкой трудно реализуемо для деталей сложной формы, что, кроме прочего, ведет к изменению линейных размеров.

Поэтому задача по осуществлению эффективного управления напряжениями в изделиях малой толщины с высокими требованиями к



качеству поверхности, для которых ограниченно применимы методы снятия остаточных напряжений поверхностной пластической деформацией является актуальной. Для управления остаточными напряжениями в элементах конструкции авиационной техники представляется перспективным использование бездеформационных методов, таких как воздействие пульсирующими дозвуковыми воздушными потоками (газоимпульсная обработка).

Остаточными напряжениями принято называть такие напряжения, которые существуют и уравниваются внутри твердого тела после установления причин, вызвавших их появление. Остаточные напряжения всегда являются внутренними, поскольку они самоуравновешиваются внутри твердого тела или жесткого агрегата. Образование остаточных напряжений всегда связано с неоднородными пластическими деформациями в смежных объемах материала или агрегата, вызванными внешним деформирующим воздействием, градиентом температур по сечению изделия при быстром охлаждении или неоднородностью и неравномерностью фазовых превращений, связанных с изменениями объема.

Задача механических методов определения остаточных напряжений состоит в том, чтобы по известной совокупности значений перемещений или деформации определить вызвавшие их напряжения.

Исследования остаточных напряжений проводились в соответствии с методом Давиденкова, примененным к кольцевым образцам.

В кольцевых образцах значения тангенциальных остаточных напряжений уменьшаются от поверхности к центру и после прохождения нейтрального слоя меняют свой знак на противо-

положительный. При распределении остаточных напряжений по толщине кольца, близком к линейному, в слое, удаленном от поверхности на расстояние  $a$

$$\sigma_{\Theta(a)} = \pm 2 \frac{E \delta_p}{(1 - \mu^2) D_{cp}^2} (h/2 - a), \quad (1)$$

где  $E$  — модуль Юнга;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $D_{cp}$  — средний диаметр кольца до разрезки;  $h$  — толщина кольца напротив разреза;  $\delta_p$  — изменение диаметра кольца после разрезки.

За толщину кольца принималась толщина тонкой части, в которой определялась величина остаточных напряжений. По тонкой части кольца определялся и диаметр.

Верхний знак в формуле (1) используется при снятии наружных слоев, нижний — внутренних.

На поверхности кольца

$$\sigma_{\Theta} = \pm \frac{E \delta_p h}{(1 - \mu^2) D_{cp}^2}. \quad (2)$$

В последней формуле знак «+» соответствует наружной поверхности кольца, а «-» — внутренней.

Было проведено исследование влияния газоимпульсной обработки [1–10] без осуществления предварительного нагрева на остаточные напряжения в тонкостенных кольцевых трубных элементах конструкции авиадвигателей, авиационной и аэродромной техники.

Исследования проводились на установке, представляющей собой газоструйный генератор типа свистка Гавро с цилиндрическим осесимметричным резонатором, на дне которого для подачи сжатого воздуха соосно с резонатором закреплен газоход. Противоположный торец газохода с помощью плоской круглой крышки образует щелевое кольцевое сопло, ширина которого регулируется сменными втулками. Накидная гайка фиксирует положение сменного кольцевого ножа, имеющего клиновидный профиль с острием, направленным в сторону щелевого сопла. Такое устройство генератора позволяло варьировать удаление клинового ножа от среза сопла, ширину щели сопла и взаимное положение ножа относительно кромок сопла. Веерная струя, натекая на кольцевой нож, создает условия для возбуждения режимов нестационарного наполнения и опорожнения резонатора, что вызывает колебательное движение веерной струи. Резонатор располагался вертикально и сверху на него монтировалась при помощи резьбового соединения цилиндрическая успокоительная камера, призванная обеспечить равномерное распределение скорости газового потока по всему поперечному сечению. Над успокоительной камерой размещались пред-

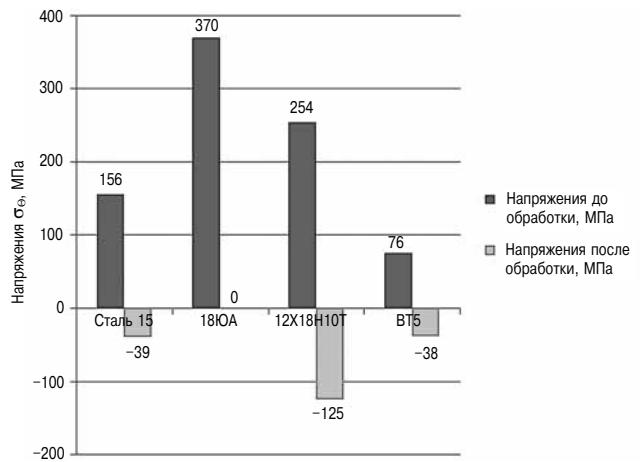


**Рис. 1. Уровень тангенциальных остаточных напряжений на поверхности металлических кольцевых изделий до и после газоимпульсной обработки**

назначенные к обработке пульсирующим газовым потоком изделия.

Продолжительность обработки составляла от 10 до 20 мин, при частоте колебаний параметров потока — 1–2 кГц.

Результаты газоимпульсной обработки на напряженное состояние поверхности изделий из конструкционных металлических материалов приведены на гистограмме рис. 1.

Растягивающие остаточные напряжения обозначены знаком «+», а сжимающие — знаком «-».

Приведенные результаты показывают, что газоимпульсная обработка оказывает влияние не только на величину, но и на знак остаточных напряжений на поверхности изделий, при этом величина напряжений уменьшается.

Дополнительно было проведено более детальное исследование влияния продолжительности газоимпульсной обработки на величину тангенциальных остаточных напряжений в поверхностных слоях металлических изделий.

В качестве объекта исследований была выбрана бесшовная холоднокатаная труба наружным диаметром 38 мм и толщиной стенки 1,1 мм, изготовленная из стали 12Х18Н9Т, используемой в двигателестроении.

Ширина вырезанных колец — 10 мм. Тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности кольца составляли +183 МПа.

Обдув в течение 5 минут пульсирующим газовым потоком при частоте пульсаций 1130 Гц и звуковом давлении, равном 122 дБ, обеспечил снижение поверхностных тангенциальных остаточных напряжений на 70 % (до +55 МПа), а в течение 10 минут — на 75 % (до +46 МПа), что является неплохим результатом, если принять во внимание сочетание высокой вязкости материала

с пределом прочности 1100–1300 МПа (в наклепанном состоянии).

Экспериментально получена следующая зависимость тангенциальных остаточных напряжений от продолжительности обдува: 2,5 мин — +293 МПа; 5 мин — +55 МПа; 7,5 мин — +110 МПа; 10 мин — +46 МПа. 12,5 мин — +82 МПа; 15 мин — +73 МПа; 17,5 мин — +55 МПа (см. график рис. 2).

Периодическое увеличение значений уровня тангенциальных остаточных напряжений в процессе обдува может быть связано с уменьшением влияния осевых и радиальных остаточных напряжений, обладающих противоположным знаком вследствие их релаксации.

Таким образом, было установлено, что существует оптимальная с точки зрения уровня и знака остаточных напряжений на поверхности изделия продолжительность газоимпульсной обработки, зависящая от материала, геометрических параметров образца, а также от амплитудно-частотных характеристик самого потока.

Дальнейшее продолжение обдува делает процесс менее технологичным и может привести к снижению положительного эффекта от газоимпульсной обработки.

Как показали многочисленные экспериментальные исследования, газоимпульсная обработка металлических изделий, включая элементы конструкции воздушных судов и аэродромной техники, является эффективным средством управления величиной и знаком остаточных напряжений, возникших в процессе изготовления изделия, его эксплуатации и восстановительного ремонта.

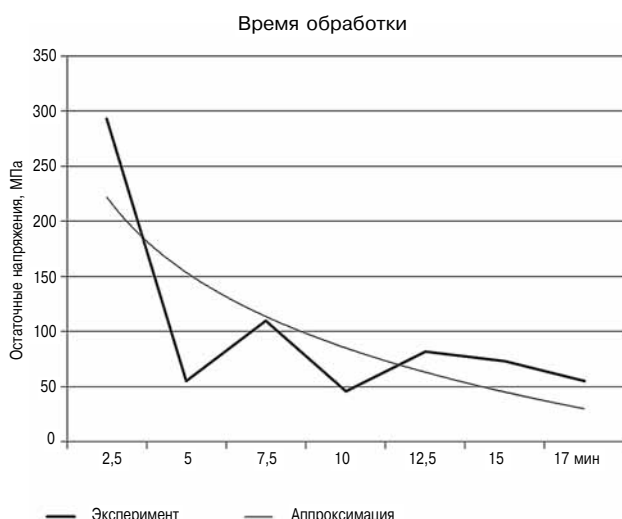


**Рис. 2. Зависимость тангенциальных остаточных напряжений от продолжительности газоимпульсной обработки кольцевых образцов, вырезанных из бесшовной холоднокатаной трубы наружным диаметром 38 мм и толщиной стенки 1,1 мм, изготовленная из стали 12Х18Н9Т**

При этом основной фактор, определяющий величину и знак остаточных напряжений, — время обдува.

Принимая, что в начальный момент обдува остаточные напряжения в поверхностных слоях изделия положительные (растягивающие), то есть представляющие наибольшую опасность при эксплуатации, можно добиться их нулевого значения за время обработки  $T/4$ , где  $T$  — период порядка 20 мин.

Продолжая газоимпульсную обработку, можно получить на поверхности изделия сжимающие остаточные напряжения, которые во многих случаях желательные, так как повышают устойчивость к коррозии и усталостному разрушению. Отрицательные (сжимающие) остаточные напряжения растут по модулю до момента времени, соответствующего  $T/2$ , при этом модуль их значений составляет не более 40 % от исходного значения остаточных напряжений  $\sigma_{ост0}$ .

При дальнейшей обработке изделия остаточные напряжения, не меняя знака, уменьшаются по модулю до нулевого значения (момент времени  $3/4T$ ) и, меняя знак на положительный, достигают максимального значения в момент времени  $T$ , причем величина остаточных напряжений в момент  $T$  значительно меньше исходной.

Следствием продолжения обдува будет повторение вышеописанного процесса со значительно меньшими значениями остаточных напряжений в сравнении с первым периодом и к моменту времени  $3/4T$  уровень остаточных напряжений практически не меняется и остается близким к нулю.

Таким образом, процесс изменения остаточных напряжений при газоимпульсной обработке сходен с процессом затухания колебаний и может быть описан соответствующим уравнением:

$$y = A \cdot e^{-ax} \sin(\omega x + \varphi_0), \quad (3)$$

где  $A$  — начальная амплитуда колебаний (положительная величина);  $a$  — коэффициент затухания;  $A \cdot e^{-ax}$  — мгновенное значение амплитуды;  $(\omega x + \varphi_0)$  — фаза колебаний;  $\omega = 2\pi/T$  — циклическая частота;  $\varphi_0$  — начальная фаза колебаний.

Обработка экспериментальных данных позволила получить следующую эмпирическую формулу:

$$\sigma_{ост} = \sigma_{ост}/\sigma_{ост0} = e^{-0,1\tau} \cdot \cos(\omega\tau), \quad (4)$$

где  $\tau$  — время обдува.

Зависимость  $\sigma_{ост}/\sigma_{ост0}$  от времени обдува представлена на рис. 3.

Газоимпульсной обработке подвергались стальные кольца подшипников, используемые в конструкции воздушных судов. Кольца подшипников подвергаются в процессе эксплуатации циклическим и знакопеременным нагружениям, поэтому для обеспечения длительной эксплуатации

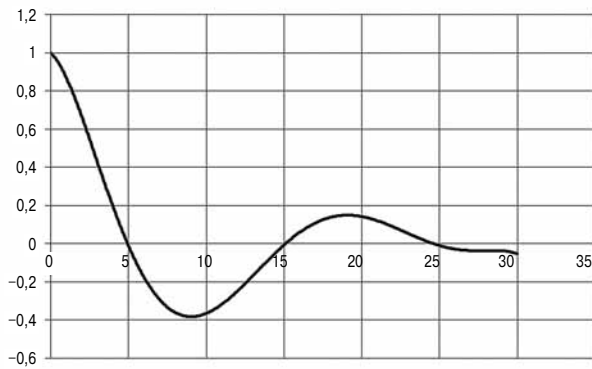


Рис. 3. Зависимость отношения значений остаточных напряжений к их исходному значению от продолжительности обработки пульсирующим дозвуковым газовым потоком

подшипника следует исключить наличие на поверхности его колец нежелательных растягивающих напряжений, чему может способствовать их газоимпульсная обработка. Кольца подшипников подвергают закалке на мартенсит с последующим низким отпуском для сохранения высокой твердости и износостойкости. При этом на поверхности колец подшипников часто возникают понижающие их долговечность растягивающие остаточные напряжения. Подобные напряжения могут образовываться в результате процесса шлифования поверхности колец с целью придания их поверхности необходимой чистоты.

Тангенциальные растягивающие напряжения на поверхности необработанного кольца составили +27 МПа, в результате обдува в течение 5 минут их значение снизилось до +13,5 МПа, после газоимпульсной обработки в течение 10 минут остаточные напряжения на поверхности стали сжимающими –27 МПа и на 15-й минуте обработки показали нулевое значение (см. график рис. 4). Таким образом, характер зависимости уровня остаточных напряжений на поверхности изделия от продолжительности газоимпульсной обработки сохранился неизменным.

В дальнейшем обработка дозвуковым пульсирующим воздушным потоком подвергали кольцевые образцы из алюминиевого сплава АМг6 наружным диаметром 33 мм, шириной кольца 7 мм, толщиной стенки 1,2 мм. Обдув осуществлялся в течение 15 мин. Тангенциальные остаточные растягивающие напряжения составляли на поверхности 122 МПа и после обработки пульсирующим газовым потоком свелись к нулю.

Результаты проведенных исследования показали, что воздействие пульсаций воздушного потока без применения нагрева позволяет эффективно управлять остаточными напряжениями металлических элементов конструкций, в том числе устранить нежелательные растягивающие

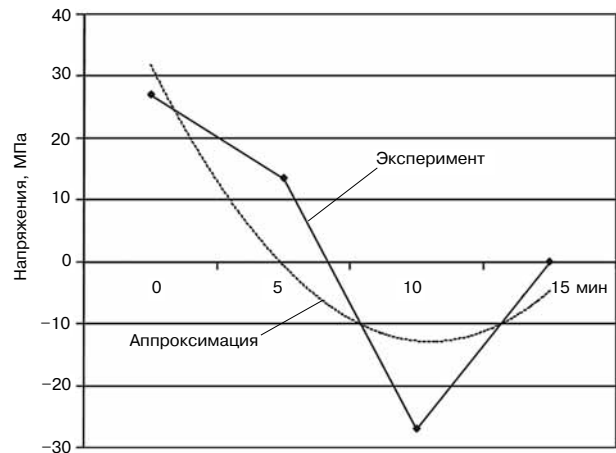


Рис. 4. Уровень тангенциальных остаточных напряжений на поверхности колец подшипника качения из стали ШХ15 в зависимости от продолжительности газоимпульсной обработки

напряжения на поверхности металлических деталей авиадвигателей, что уменьшает риск образования трещин в процессе их эксплуатации.

#### Литература

1. Иванов Д.А. Повышение конструктивной прочности материалов за счет воздействия пульсирующих дозвуковых низкочастотных газовых потоков. Монография. — СПб.: СПбГУСЭ, 2008. — 123 с.
2. Бульчев А.В., Иванов Д.А. Воздействие газоимпульсной обработки на структуру, свойства и напряженное состояние металлических изделий // Технология металлов. — 2013. — № 11. — С. 30–33.
3. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Использование пульсирующего дозвукового газового потока для повышения эксплуатационных свойств металлических изделий // Технология металлов. — 2015. — № 1. — С. 34–38.
4. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Повышение коррозионной стойкости конструкционных сталей газоимпульсной обработкой // Технология металлов. — 2015. — № 10. — С. 27–31.
5. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Газоимпульсная обработка закаленных сталей // Технология металлов. — 2017. — № 6. — С. 17–22.
6. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Повышение конструктивной прочности машиностроительных материалов в результате сочетания термическими и газоимпульсной обработки // Двигателестроение. — 2012. — № 3. — С. 12–15.
7. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Обработка пульсирующим газовым потоком высокопрочных и пружинных сталей // Двигателестроение. — 2014. — № 3. — С. 34–36.
8. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Сочетание закалки сталей с обработкой пульсирующими газовыми потоками // Двигателестроение. — 2015. — № 4. — С. 34–36.
9. Иванов Д.А., Засухин О.Н. Влияние условий газоимпульсной обработки на механические свойства сталей // Двигателестроение. — 2016. — № 4. — С. 30–34.
10. Иванов Д.А. Воздействие нестационарных газовых потоков на структуру и свойства материалов, используемых в авиационной промышленности. Монография. — СПб.: СПбГУГА, 2017. — 328 с.

## РАСЧЁТ СТАБИЛЬНОСТИ ЭТАНОЛО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ДИЗЕЛЯХ

С.А. Плотников, д.т.н., профессор кафедры, М.В. Смольников, аспирант  
Вятский государственный университет, г. Киров  
Г.П. Шишкин, к.п.н., доцент кафедры  
Кировский государственный медицинский университет, г. Киров

С использованием теории движения дисперсных капель в несущей среде получено аналитическое выражение для расчета стабильности этанола-топливной эмульсии (ЭТЭ) различного дисперсного состава. Результаты аналитического расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными. Расчетным методом определен максимальный размер капель водного раствора этанола ( $d = 0,058$  мм) в ЭТЭ, стабильность которой до коалесценции\* составляет не менее 60 мин. В результате проведенных исследований разработан метод расчета оптимального состава смесового топлива на основе ДТ и этанола с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Рассмотрение вопроса о возможности применения эмульсий этанола и дизельного топлива (ДТ) в качестве смесового топлива для дизелей и их влиянии на показатели работы дизеля целесообразно начать с анализа условий создания стабильных эмульсий и их физико-химических свойств.

Эмульсии — термодинамически неустойчивые системы (рис. 1), обладающие значительной свободной энергией. Избыток энергии в поверхностном слое обусловлен наличием поверхностного натяжения вследствие некомпенсированности молекулярных сил сцепления. Поэтому всякое разрушение (образование) тела выражается в образовании (разрушении) новой поверхности разрыва.

Известно, что при смешивании дизельного топлива с этанолом стабильность смеси до коалесценции составляет не более 15 мин. Одним из перспективных направлений увеличения стабильности этанола-топливной эмульсии (ЭТЭ) является применение поверхностно-активных веществ.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) обладают определенными свойствами, молекулярным строением и адсорбционной способностью. Молекулы ПАВ содержат либо один, либо несколько гидрофобных радикалов, которые скапливаются на межфазных поверхностях раздела, изменяя их физико-химические свойства. ПАВ, в зависимости от сферы применения, делятся на три группы: водорастворимые, водомаслорастворимые и маслорастворимые.

При смешивании в ЭТЭ образуются капельки жидкостей разных размеров, которые в зависимости от значения плотности стремятся при расслоении падать вниз или двигаться вверх. Рассмотрим движение капли, состоящей из смеси дистиллированной воды и этанола, в приближении к твердой частице, падающей в ДТ. Движение капли в жидкости хорошо изучено множеством авторов [1–9]. Пусть соотношение дистиллированной воды и этанола будет таким, что  $\rho_{\text{вс}} > \rho_{\text{дт}}$ . Здесь  $\rho_{\text{вс}}$  — плотность смеси «вода+спирт»,  $\rho_{\text{дт}}$  — плотность ДТ. В таком случае капля будет падать в ДТ под действием силы тяжести. Если  $\rho_{\text{вс}} < \rho_{\text{дт}}$  — капля будет всплывать на поверхность, если  $\rho_{\text{вс}} = \rho_{\text{дт}}$  — капля будет находиться в неустойчивом равновесии в объеме ДТ.

Рассмотрим емкость, заполненную эмульсией «ДТ+(дистиллированная вода + этанол)». На рис. 2



Рис. 1. Опытные образцы топлив

\* Коалесценция — процесс полного расслоения эмульсии за счет слияния капель дисперсной среды.

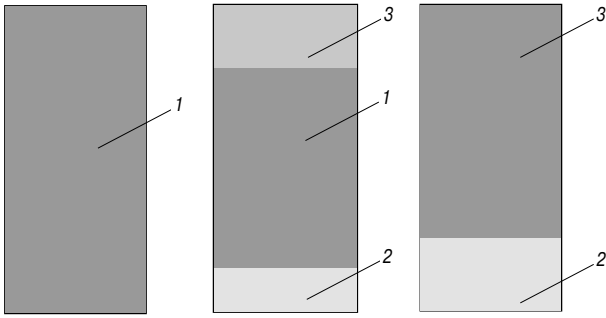


**Рис. 2. Три состояния эмульсии во времени:**

1 — начальное состояние (однородная эмульсия); 2 — частичное расслоение; 3 — полное расслоение

представлены три возможных состояния эмульсии во времени. Обозначим объемы, соответственно: 1 —  $V_3$  (объем эмульсии); 2 —  $V_{\text{вс}}$  (объем смеси дистиллированной воды с этанолом); 3 —  $V_{\text{дт}}$  (объем дизельного топлива);  $V_0$  — общий объем смеси.

Будем полагать, что в любой момент времени выполняется равенство:

$$V_{\text{дт}} + V_{\text{вс}} + V_3 = V_0. \quad (1)$$

Это своего рода закон сохранения объемов, но он не всегда работает. Предполагаем, что изменения объемов фаз в эмульсии будут развиваться по экспоненте. Зададим закон изменения объема во времени смеси «дистиллированная вода + этанол», используя величины  $a, b, c, k_1, k_2, k_3$ , определяющие скорости изменения вышеуказанных объемов и вычисляющиеся опытным путем:

$$(V_{\text{вс}})'_t = ae^{-k_1 t}. \quad (2)$$

Аналогично запишутся изменения объема ДТ во времени и объема эмульсии.

Запишем уравнение (1) в дифференциальной форме:

$$(V_{\text{вс}})'_t dt + (V_{\text{дт}})'_t dt + (V_3)'_t dt = 0 \quad (3)$$

или

$$ae^{-k_1 t} dt + be^{-k_2 t} dt + ce^{-k_3 t} dt = 0. \quad (4)$$

Интегрируя выражение (4), получим решение:

$$\frac{a}{k_1} - \frac{ae^{-k_1 t}}{k_1} + \frac{b}{k_2} - \frac{be^{-k_2 t}}{k_2} + c \frac{e^{-k_3 t}}{k_3} = 0. \quad (5)$$

При  $t = 0$  получим  $V_0 = c/k_3$ , что соответствует наличию эмульсии во всем объеме. При  $t \rightarrow \infty$  получим  $V_0 = a/k_1 + b/k_2$ , что соответствует полному расслоению. То есть  $a/k_1 = V_{\text{вс}}$ ,  $b/k_2 = V_{\text{дт}}$ ,  $V_3 = 0$ . Здесь не следует думать, что для полного расслоения эмульсии потребуется бесконечно большое время, а просто достаточно большое время, необходимое для того, чтобы выполнилось неравенство:

$$\frac{a}{k_1} - \frac{ae^{-k_1 t}}{k_1} + \frac{b}{k_2} - \frac{be^{-k_2 t}}{k_2} \gg c \frac{e^{-k_3 t}}{k_3}. \quad (6)$$

Величины  $a, b, c$  соответствуют некоторым начальным значениям скорости изменения объема соответствующей фазы, а коэффициенты  $k_1, k_2, k_3$  определяют изменения скоростей соответствующих объемов. Размерности величин  $a, b, c$  будут определяться в  $\text{м}^3/\text{с}$ , а коэффициенты  $k_1, k_2, k_3$  в  $\text{с}^{-1}$ . Все величины и коэффициенты следует находить опытным путем. Они будут зависеть от множества факторов: вязкости, плотности, температуры, рода эмульгатора, способа эмульгирования и т. д.

Для выполнения равенства (5) надо полагать, что коэффициенты  $k_1, k_2, k_3$  должны быть близки по величине друг другу или (лучше) равны. Но тогда это будет тождество и в любой момент времени сумма фаз будет равна начальному объему  $V_0$ .

Согласно второму закону динамики можно составить дифференциальное уравнение движения капли (шарика) в следующем виде:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - F_{\text{тр}} - F_A \quad (7)$$

или

$$\rho_{\text{вс}} \frac{dv}{dt} = Vg(\rho_{\text{вс}} - \rho_{\text{дт}}) - 6\pi\eta r v, \quad (8)$$

где  $v$  — объем капли;  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости дизельного топлива;  $r$  — радиус капли;  $\rho_{\text{дт}}$  — плотность дизельного топлива. Уравнение следует считать простым дифференциальным уравнением с разделяющимися переменными. Его частное решение будет иметь вид

$$\begin{aligned} [Vg(\rho_{\text{вс}} - \rho_{\text{дт}}) - 6\pi\eta r v]^{\frac{V\rho_{\text{вс}}}{6\pi\eta r v}} = \\ = [Vg(\rho_{\text{вс}} - \rho_{\text{дт}})]^{\frac{V\rho_{\text{вс}}}{6\pi\eta r v}} \cdot e^{-t}. \end{aligned} \quad (9)$$

Если время  $t$  достаточно велико, правая часть уравнения (9) будет приближенно равна нулю. После преобразований получим известную формулу для равномерного движения капли шарика в вязкой жидкости:

$$v = \frac{2}{9} gr^2 \frac{(\rho_{\text{вс}} - \rho_{\text{дт}})}{\eta}. \quad (10)$$

При выводе формулы (10) предполагалось, что обтекание шарика, состоящего из этанола, жидкостью (ДТ) имеет ламинарный характер. Известно, что характер обтекания (ламинарный или турбулентный) определяется значением числа Рейнольдса.

Для случая мелкодисперсной эмульсии в составе ДТ — 10–15 %, смеси дистиллированной

воды с этанолом — 85–90 %, дифференциальное уравнение (8) примет вид

$$\rho_{\text{вс}} \frac{dv}{dt} = Vg(\rho_{\text{вс}} - \rho_{\text{э}}(t)) - 6\pi\eta(t)rv. \quad (11)$$

Выражение (11) показывает, что плотность и динамическая вязкость эмульсии — есть некоторые функции времени. Естественно предположить, что эти зависимости будут экспоненциальными. По мере выпадения смеси «дистиллированная вода + этанол» в виде капелек, плотность оставшейся эмульсии будет уменьшаться до плотности ДТ вверху, и плотности смеси «дистиллированная вода + этанол» внизу. Аналогично будет изменяться динамическая вязкость эмульсии во времени. Однако без дополнительных исследований неясно, будет ли значение вязкости увеличиваться или уменьшаться.

Зависимость плотности эмульсии от времени по мере расслоения представим в виде

$$\rho_{\text{э}}(t) = \rho_{\text{э0}} \cdot e^{-k_1 t} + \rho_{\text{ДТ}}(1 - e^{-k_2 t}), \quad (12)$$

где  $\rho_{\text{э0}}$  — начальная плотность эмульсии;  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты, определяющие скорость изменения плотности.

Плотность и объем эмульсии будут постепенно уменьшаться по мере выпадения на дно более плотной смеси «дистиллированная вода + этанол». При  $t = 0$  получим  $\rho_{\text{э}}(0) = \rho_{\text{э0}}$ . При  $t \rightarrow \infty$  (достаточно большом) получим  $\rho_{\text{э}}(\infty) = \rho_{\text{ДТ}}$ .

Аналогично для вязкости

$$\eta_{\text{э}}(t) = \eta_{\text{э0}} \cdot e^{-k_3 t} + \eta_{\text{ДТ}}(1 - e^{-k_4 t}). \quad (13)$$

Если вязкость будет возрастать, следует поменять местами  $\eta_{\text{э0}}$  и  $\eta_{\text{ДТ}}$ .

Подставляя выражения (12) и (13) в уравнение (11), получим

$$\rho_{\text{вс}} \frac{dv}{dt} = Vg\{\rho_{\text{вс}} - [\rho_{\text{э0}} \cdot e^{-k_1 t} + \rho_{\text{ДТ}}(1 - e^{-k_2 t})]\} - 6\pi \cdot [\eta_{\text{э0}} \cdot e^{-k_3 t} + \eta_{\text{ДТ}}(1 - e^{-k_4 t})]rv. \quad (14)$$

На участках «равномерного движения» капле смеси в эмульсии получим формулу для скорости оседания капле — стабильности смесового топлива:

$$v = \frac{Vg\{\rho_{\text{вс}} - [\rho_{\text{э0}} \cdot e^{-k_1 t} + \rho_{\text{ДТ}}(1 - e^{-k_2 t})]\}}{6\pi \cdot [\eta_{\text{э0}} \cdot e^{-k_3 t} + \eta_{\text{ДТ}}(1 - e^{-k_4 t})]r}. \quad (15)$$

Подставляя объем капли  $V = 4/3\pi r^3$ , окончательно получим

$$v = \frac{2gr^2\{\rho_{\text{вс}} - [\rho_{\text{э0}} \cdot e^{-k_1 t} + \rho_{\text{ДТ}}(1 - e^{-k_2 t})]\}}{9[\eta_{\text{э0}} \cdot e^{-k_3 t} + \eta_{\text{ДТ}}(1 - e^{-k_4 t})]r}. \quad (16)$$

На самом деле мы имеем дело с неравномерным движением, так как  $v = f(t)$ . И в этом

выражении не учитывается влияние стенок емкости (бака).

Коэффициенты  $k_1, k_2, k_3$ , найденные опытным путем, будут зависеть от множества факторов: вязкости, плотности, температуры, геометрических размеров емкости, рода эмульгатора, способа эмульгирования и т. д.

Сравнение данных аналитического расчета с полученными ранее данными эксперимента (рис. 3) позволяет сделать вывод об их хорошем совпадении. Действительно, принимая диаметр капли около  $d = 50\text{--}60$  мкм (механическое эмульгирование), а количество ПАВ в объеме 2–5 %, время до начала коалесценции даже высококонцентрированных ЭТЭ (40 % этанола в эмульсии) составляет 55 минут. Снижение концентрации этанола в ЭТЭ позволяет достичь указанного времени коалесценции при меньшем количестве ПАВ.

Распределение капель по размерам следует нормально-логарифмическому закону: вероятность логарифма доли капле текущего размера характеризуется нормальным распределением. Этот закон установлен теоретически и подтвержден многочисленными экспериментами. Он справедлив для широкого круга дисперсий, получаемых различными способами: как при диспергировании жидкостей и газов, так и при измельчении твердых материалов.

Если использовать радиус капли в качестве аргумента, то нормальное логарифмическое распределение по размерам будет иметь вид

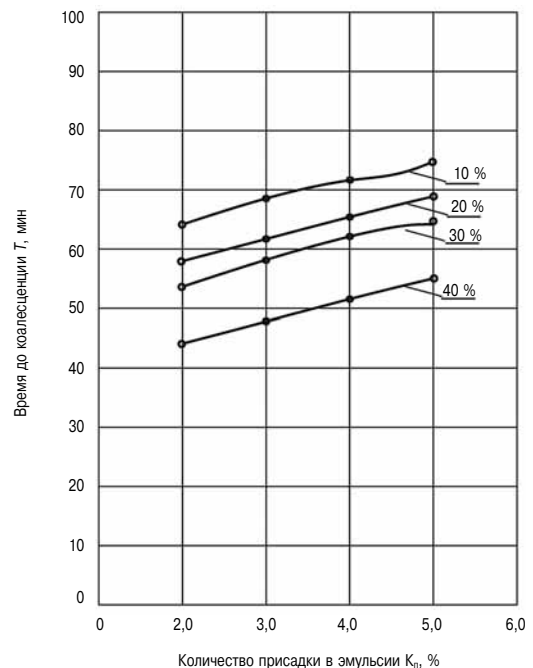


Рис. 3. Стабильность ЭТЭ с добавкой ингибитора коррозии алкенилсукцинимид мочевины СИМ

$$n(\ln(r)) = \frac{N_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} re^{-\frac{\ln\left(\frac{r}{r_{cp}}\right)^2}{2\sigma^2}}, \quad (17)$$

где  $n$  — количество капель смеси в дизельном топливе радиуса  $r$ ;  $N_0$  — общее число капель;  $r_{cp}$  — средний размер капель;  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение, определяющее рассеяние капель по размеру.

Анализ полученных данных показывает, что размер 90 % капель воды, являющихся дисперсной фазой, даже после трех месяцев хранения эмульсии составляет 3 мкм и менее, при этом капли с диаметром более 6 мкм в эмульгированном топливе практически отсутствуют.

Вычислим максимальный размер капель, время осаждения которых на дно топливного бака составляет примерно 60 минут.

Используем формулу Рыбчинского—Адамара, учитывающую свойства капель водно-спиртовой смеси. При  $\mu_{вс} \gg \mu_{дт}$  формула Рыбчинского—Адамара переходит в формулу Стокса. Сравнивая обе формулы, находим:

$$\frac{v}{v_{ст}} = 3 \frac{\mu_{дт} + \mu_{вс}}{2\mu_{дт} + 3\mu_{вс}} > 1. \quad (18)$$

Этот результат означает, что благодаря подвижности поверхности раздела градиенты скоростей, существующие в жидкости, меньше градиентов скоростей при твердой границе раздела. Это также означает, что жидкая капля падает быстрее, чем твердый шарик того же размера.

Рассчитаем максимальный размер капель водно-спиртовой смеси, способных осаждаться на дно топливного бака за 60 минут при уровне топлива в баке 0,3 метра.

Из формулы Рыбчинского—Адамара получим расчетную формулу для радиуса капли:

$$r = \sqrt{\frac{3\mu_{дт}(2\mu_{дт} + 3\mu_{вс})h}{2(\rho_{вс} - \rho_{дт})\eta g(\mu_{дт} + \mu_{вс})}}. \quad (19)$$

Результат расчета составляет  $r = 0,029$  мм.

Проведенные теоретические исследования по нахождению зависимости скорости коалесценции новых ЭТЭ с присадками подтвердили возможность использования ЭТЭ для дизельных ДВС и позволили сформулировать следующие выводы.

1. Получено аналитическое выражение для расчета стабильности ЭТЭ различного дисперсного состава.

2. Данные аналитического расчета хорошо согласуются с полученными ранее данными эксперимента.

3. Расчетным методом определен размер капель ЭТЭ ( $d = 0,058$  мм), время осаждения которых на дно топливного бака составляет 60 минут.

4. В результате проведенных исследований разработан метод аналитического расчета оптимального состава смесового топлива на основе ДТ и этанола с улучшенными эксплуатационными свойствами [11, 12].

#### Литература

1. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. Избранные труды. — М.: Наука, 1978. — 368 с.
2. Иванов В.М. Топливные эмульсии. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 301 с.
3. Плотников С.А., Смольников М.В. Создание новых видов альтернативных топлив на основе этанола. Общество, Наука, Инновации. (НПК-2016) [Электронный ресурс] // Всерос. ежегод. науч.-практ. конф.: сб. статей, 18–29 апреля 2016 г. / Вят. гос. ун-т. — Киров, 2016. — С. 1358–1362.
4. Плотников С.А., Смольников М.В. Исследование показателей работы дизеля 4ЧН11/12,5, работающего на этанолсодержащем топливе. Будущее технической науки: сборник материалов XVI Международной молодежной науч.-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — Нижний Новгород, 2017. — 409–410 с.
5. Плотников С.А., Карташевич А.Н., Смольников М.В. Исследование свойств новых топлив на основе этанола // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. — 2017. — № 1. — С. 114–117.
6. Плотников С.А., Карташевич А.Н., Смольников М.В., Бирюков А.Л. Модернизация системы питания тракторного дизеля 4ЧН11/12,5 для работы на этанола-топливной эмульсии // Молочнохозяйственный вестник. — 2017. — № 2 (26). — С. 110–118.
7. Плотников С.А., Смольников М.В. Оценка экологической эффективности применения этанола в качестве альтернативного топлива. Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и практика // Сб. науч. тр. по мат. заоч. науч.-практ. конф. — Воронеж: ООО ИПЦ «Научная книга», 2015. — № 4. — Ч. 1 (15–1). — С. 93–97.
8. Плотников С.А., Карташевич А.Н., Смольников М.В. Исследование энергетических показателей трактора Беларус-922 при работе на топливе с добавками этанола. Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — Нижний Новгород, 2018. — № 1 (120). — С. 223–228.
9. Плотников С.А., Малышкин П.Ю., Смольников М.В. Определение токсичности и дымности дизеля 4ЧН11/12,5 при работе на этанолсодержащем топливе // Транспортные системы. — 2018. — № 2 (8). — С. 12–18.
10. Патент РФ № 2637904, МКИ7B01F 7/24. Смеситель топлив / Плотников С.А., Карташевич А.Н., Смольников М.В., Черемисинов П.Н., Мельников К.П.
11. Патент РФ № 2629021, МКИ7C10L 10/08, 1/32, 1/182, 1/222, 1/30. Топливная композиция / Плотников С.А., Сальников Д.В., Смольников М.В., Черемисинов П.Н.
12. Патент РФ № 2642078 МКИ7C10L 1/32, 1/16. Топливная эмульсия / Плотников С.А., Карташевич А.Н., Смольников М.В.

## МОДУЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

*И.О. Прутчиков, д.т.н., профессор, В.И. Михайлов, к.т.н.  
Научно-исследовательский институт (ВСИ МТО ВС РФ) Военной академии материально-  
технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева  
В.В. Камлюк, д.т.н.  
ООО «НПО 122 УМР»*

Рассматриваются вопросы обеспечения энергетической безопасности автономных объектов при использовании мобильных модулей контейнерного исполнения на базе комбинированных энергоустановок с двигатель-генераторными установками и статическими преобразователями энергии. Разработан действующий автоматизированный образец модуля с ДГУ мощностью 16 кВт, оборудованный схемой дистанционного управления нетрадиционными комбинированными энергоисточниками, преобразователями и накопителями энергии. Основное технологическое оборудование разработанного модуля энергетической безопасности выполнено с использованием отечественной элементной базы.

Географическими, климатическими и социально-демографическими особенностями РФ обусловлено наличие в ней большого количества объектов инфраструктуры различного назначения (военной, социальной, транспортной, информационной, инженерной и т. д.), не имеющих постоянной надежной связи с внешними инженерными системами жизнеобеспечения, прежде всего энергоснабжения. Такие объекты с точки зрения функционирования их систем жизнеобеспечения можно отнести к разряду автономных. Так, по данным [1], автономные децентрализованные системы энергоснабжения (не присоединенные к основным сетям) в нашей стране обслуживают около 20 млн чел., охватывают около 70 % ее территории (в основном в районах Крайнего Севера и приравненных к ним). В децентрализованных системах энергоснабжения вырабатывается в год от 75 до 85 млрд кВт·ч, что составляет примерно 8 % от общей выработки электроэнергии в России. Причем общая доля и значение автономных объектов постоянно увеличиваются, в первую очередь в связи с повышением требований по качеству энергоснаб-

жения потребителей и освоением новых удаленных районов страны. При этом следует отметить, что большинство новых создаваемых, реконструируемых и модернизируемых автономных объектов инфраструктуры различного назначения находятся в отдаленных районах с неблагоприятными климатическими и иными условиями эксплуатации, где значительную роль играют вопросы обеспечения энергетической безопасности. В условиях, когда для этих объектов разработаны и повсеместно внедряются современные технологии информационной и транспортной доступности, вопросы обеспечения их энергетической безопасности становятся особенно актуальными, во многих случаях лимитирующими процессы освоения новых объектов и территорий, экономического и социального развития нашей страны, укрепления ее обороноспособности.

Выполненный анализ показал, что для большинства автономных объектов, в контексте обеспечения их энергетической безопасности, можно выделить общую тенденцию развития их как энергетических систем, связанную с необходимостью повышения надежности, устойчивости и качества их энергоснабжения до уровня, гарантированного (бесперебойного).

Понимая под энергетической безопасностью прежде всего состояние защищенности от внешних и внутренних угроз энергоснабжению преднамеренного, природного, техногенного, экономического и иного характера, можно определить основные принципы ее обеспечения. Среди общих для всех систем энергоснабжения принципов обеспечения энергетической безопасности, в первую очередь можно выделить следующие:

- гарантированность энергоснабжения в полном объеме в нормальных условиях и в необходимом объеме в аварийных ситуациях;
- мониторинг, контроль и противоаварийное управление энергоснабжением;
- пополнение и резервирование запасов топлива;

- диверсификацию используемых видов топлива и энергии;

- учет требований других видов безопасности (физической, экологической, экономической, пожарной и т. п.);

- рациональное использование энергоресурсов.

Принимая в качестве генерального направления обеспечения энергетической безопасности автономных объектов повышение качества энергоснабжения до гарантированного (бесперебойного) уровня, можно с этих позиций выделить следующие основные направления роста эффективности их гарантированного энергоснабжения [2–4]:

- комплексную реализацию и внедрение технологий когенерации, аккумулирования, частотного регулирования и преобразования энергии;

- улучшение технико-экономических характеристик автономных источников электроэнергии путем совместного применения статических и электромашинных преобразователей энергии;

- внедрение бесперебойных технологий гарантированного энергоснабжения за счет совершенствования средств и систем аккумулирования энергии;

- диверсификацию систем гарантированного энергоснабжения автономных объектов по автономным источникам энергии и видам топлива;

- использование в системах гарантированного энергоснабжения альтернативных и нетрадиционных источников энергии;

- применение в системах гарантированного энергоснабжения современных информационных технологий управления.

Таким образом, энергетическая безопасность автономных объектов инфраструктуры различного назначения в первую очередь должна быть обеспечена путем реализации принципов и направлений повышения эффективности гарантированного энергоснабжения.

В соответствии с данными, приведенными в [5, 6] реализация направлений повышения энергетической безопасности и доведение характеристик энергообеспечения объектов до уровня, гарантированного предполагает следующее.

Во-первых, перевод объектов в разряд автономных, способных функционировать без связи с внешними системами жизнеобеспечения.

Во-вторых, комплексное рассмотрение автономных объектов инфраструктуры различного назначения как объектов и субъектов энергоснабжения в виде единой энергетической системы.

В-третьих, интегрирование и комплексирование систем энергоснабжения автономных объектов с другими системами жизнеобеспечения и безопасности.

В-четвертых, комбинированное применение в целях гарантированного (бесперебойного)

энергоснабжения различных типов автономных источников и преобразователей энергии, в первую очередь двигатель-генераторных установок (ДГУ), статических преобразователей электроэнергии (СПЭ) и нетрадиционных источников энергии (НИЭ).

В-пятых, разработку и создание систем гарантированного энергоснабжения автономных объектов в виде роботизированных необслуживаемых (ограниченно обслуживаемых) комплексов посредством реализации в них инновационных энергоэффективных технологий.

На основании выполненных исследований по рассматриваемому направлению была сформулирована концепция комплексного применения интеллектуальных технологий когенерации, аккумулирования, частотного регулирования и преобразования энергии в целях обеспечения энергетической безопасности [7].

Основу разработанной концепции составляют следующие положения и мероприятия.

1. При создании новых и модернизации существующих автономных объектов их энергетическая система (система энергообеспечения) комплексно строится по принципу автономности, допускающему функционирование без связи с внешними системами и источниками энергоснабжения.

2. Система энергоснабжения автономного объекта по своему функциональному назначению реализуется как система гарантированного энергоснабжения (СГЭС), по своим характеристикам адаптированная к параметрам конкретных энергопотребителей и диверсифицированная по отношению к типам применяемых энергоисточников, условиям внешней (окружающей) среды, видам и характеристикам применяемого топлива.

3. Для реализации функций гарантированного энергоснабжения автономные объекты (до оснащаются) энергоблоками на базе гибридных комбинированных энергоустановок (КЭУ), использующих в качестве основных первичных и вторичных источников энергии двигатель-генераторные установки (ДГУ), статистические преобразователи электроэнергии (СПЭ) и нетрадиционные источники энергии (НИЭ).

4. Для эффективного совместного применения ДГУ, СПЭ и НИЭ в составе системы энергоснабжения автономных объектов предусматривается организация их совместной (параллельной) работы на основе принципов и технологий когенерации, аккумулирования, частотного регулирования и преобразования энергии (ЧРПЭ).

5. С целью обеспечения требуемых уровней автономности, обитаемости, необслуживаемой работы, надежности и экономичности СГЭС

с ДГУ, СПЭ и НИЭ оборудуются системами удаленного, дистанционного интеллектуального управления (ИСДУ).

6. Для обеспечения энергетической и других видов безопасности СГЭС с ДГУ, СПЭ и НИЭ комплексируются и интегрируются с другими технологическими, техническими и специальными системами автономных объектов, такими как инженерные (ИС), безопасности (СБ), автоматического управления (АСУ) и т. д. С этой целью на базе АСУ СГЭС разрабатываются системы активного мониторинга (мониторинга, контроля и управления) — (СМБЖ).

7. С целью оптимизации характеристик энергоснабжения, реализации интеллектуальных адаптивных алгоритмов управления и функционирования, разработка СГЭС с ДГУ, СПЭ и НИЭ сопровождается необходимым аппаратным, программным, алгоритмическим, технологическим, имитационным и расчетно-методическим обеспечением.

8. Функционально за счет комплексного применения рассматриваемых технологий функционирования на уровне СГЭС с ДГУ, СПЭ и НИЭ (ЧРПЭ) и управления на уровне СМБЖ с КОЭС система энергоснабжения автономного объекта военной инфраструктуры согласно данной концепции разрабатывается в виде автономного автоматизированного робототехнического комплекса-модуля энергетической безопасности (МЭБ).

9. Конструктивно МЭБ для многих автономных объектов может быть разработан в контейнерном исполнении.

Подробные сведения по разработанной концепции обеспечения энергетической безопасности автономных объектов представлены в работе [7]. В целях практической реализации основных положений рассматриваемой концепции энергетической безопасности автономных объектов в настоящее время ООО «НПО 122 УМР» на базе контейнерной ДГУ мощностью 16 кВт разработан модуль энергетической безопасности (МЭБ-16). Технологическая схема МЭБ-16 представлена на рис. 1. Основными элементами МЭБ-16 являются первичные автономные энергоисточники, вторичные источники, преобразователи и аккумуляторы энергии, а также необходимая коммутационная, запорно-регулирующая и предохранительная аппаратура и арматура. В качестве основных источников тепловой и электрической энергии в МЭБ-16 использованы: двигатель-генераторная установка (ДГУ) в составе двигателя (Д), работающего на органическом топливе и силового электрогенератора (СГ), функционирующего в режиме электромашинного преобразователя энергии, автономный теплоэлектро-

генератор (АТЭГ), который может быть выполнен на базе комбинированного многотопливного котла, оборудованного встроенным термоэлектрическим нагревателем (ТЭН) и термоэлектрическим генератором (ТЭГ). С целью когенерации и аккумулирования энергии жидкостные и газовые тракты ДГУ и АТЭГ соединены и оборудованы дополнительными устройствами утилизации тепла отработавших (дымовых) газов и теплоносителя.

Аккумулирование вырабатываемого элементами технологической схемы тепла проводится в тепловом аккумуляторе (ТА). Тепло в тепловом аккумуляторе ТА, согласно рис. 2, может запасаться в виде горячего жидкого теплоносителя (воды), водяного пара, горячего воздуха и т. п. Вспомогательным нетрадиционным источником электроэнергии в МЭБ-16 является солнечная батарея (СБ).

В качестве вторичных источников и преобразователей энергии в МЭБ-16 используются статические преобразователи электроэнергии (СПЭ), например специальные реверсивные преобразователи электроэнергии (РПЭ), способные работать в параллель с силовым генератором (СГ) ДГУ, статические агрегаты бесперебойного

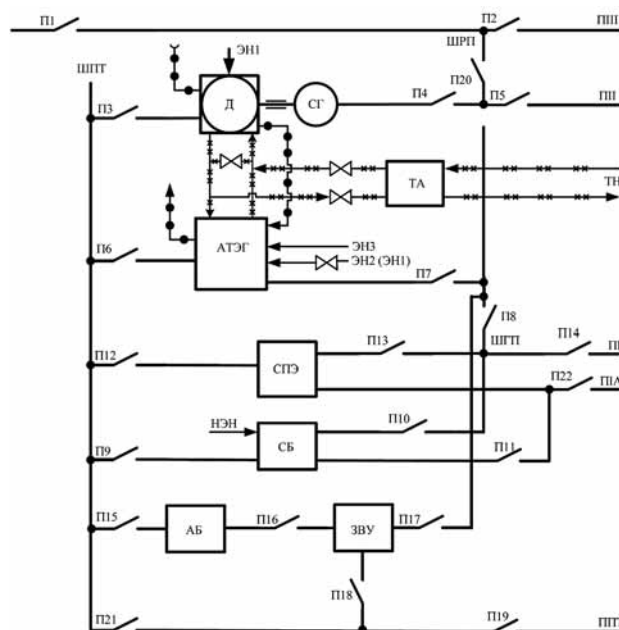


**Рис. 1. Технологическая схема МЭБ-16:**

Д — первичный двигатель; СГ — силовой электрогенератор; АТЭГ — автономный теплоэлектрогенератор; ТА — тепловой аккумулятор (теплообменник); СПЭ — статический преобразователь электроэнергии; СБ — солнечная батарея; АБ — аккумуляторная батарея; ЗВУ — зарядно-выпрямительное устройство; ШПТ — шины постоянного тока; ШРП — шины резервного электропитания; ШГП — шины гарантированного электропитания; ЭН1 — основной энергоноситель; ЭН2, ЭН3 — резервные энергоносители; НЭН — нетрадиционный энергоноситель; П1, П11, ПШ, П1А, ППТ — электропотребители; ТН — теплоноситель

питания (АБП), автономные инверторы с модифицированной синусоидой выходного тока для бытовых потребителей и с чистой синусоидой выходного тока для ответственных потребителей.

В качестве накопителей электрической энергии в МЭБ-16 использованы аккумуляторные батареи (АБ) емкостью 60–190 А·ч на напряжение 12–24 В.

Батарея аккумуляторов АБ состоит из секций (групп) стартерных батарей, накопительных батарей поддержки СПЭ и СБ, а также резервных (расходных заменяемых), используемых при необходимости для увеличения времени автономной работы (батарейной поддержки) СПЭ и СБ. Все аккумуляторные батареи после соответствующего секционирования подключены на общие шины постоянного тока (ШПТ). Для заряда АБ и питания постоянным током потребителей в схеме МЭБ-16 используется зарядно-выпрямительное устройство (ЗВУ). Шины переменного тока секционированы на шины автономного электропитания (ШАП), к которым присоединена внешняя сеть электроснабжения (при наличии) и от которой запитываются электропотребители ПЗ, шины резервного электропитания (ШРП) к которым присоединены основные источники электрической и тепловой энергии: ДГУ и АТЭГ и от которых запитываются электропотребители П2,

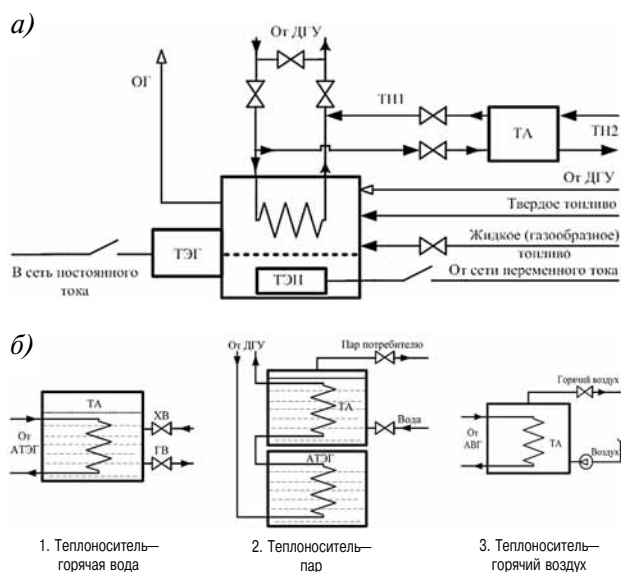


**Рис. 2. Варианты исполнения АТЭГ и ТА из состава МЭБ-16:**

*а* — вариант исполнения АТЭГ на базе многотопливного комбинированного отопительно-варочного котла:

ТН1 — теплоноситель 1-го контура (охлаждающая жидкость ДГУ); ТН2 — теплоноситель 2-го контура (вода, пар, воздух); Ог — отработавшие газы; ТЭГ — термоэлектрогенератор; ТЭН — термоэлектрический нагревательный элемент;

*б* — варианты исполнения ТА и включения его в состав МЭБ-16:

ХВ — холодная вода; ГВ — горячая вода

шины гарантированного питания (ШГП) к которым присоединены СПЭ и СБ и от которых запитываются электропотребители П1. Шины бесперебойного электропитания (ШБП) не секционируются с другими шинами переменного тока, запитываются от СПЭ и СБ (в аварийных режимах возможно подключение от АТЭГ) и подают электропитание потребителям П1А.

Секционирование ШРП и ШГП позволяет за счет параллельного включения ДГУ и СПЭ обеспечить в необходимых случаях эффективное гарантированное электропитание ответственных потребителей П1 на уровне АБП on-line.

Изменение режимов работы МЭБ-16, а также включение основного оборудования производится переключателями П1–П21 по специальным алгоритмам. Компоновка основного оборудования МЭБ-16 представлена на рис. 3.

Согласно рис. 3 основное силовое энергооборудование комплектуется в закрытом контейнере заводского изготовления.

Охранные, экологические и противопожарные системы размещаются комплексно в отдельных блоках (нишах) и при установке МЭБ-16 разворачиваются в рабочее положение. Также при установке модуля разворачивается в рабочее положение расположенная на крыше контейнера солнечная батарея. Блок автоматизированного управления МЭБ-16 включает в себя штатные силовые щиты и щиты управления оборудованием (ДГУ, АТЭГ, СПЭ, СБ и т. д.), щит управления МЭБ-16 с МПСУ МЭБ-16, контроллер supervisory управления на базе ПК, блок ДУ, выносной планшетный пульт дистанционного управления МЭБ-16. Размещенная в щите управления МПСУ МЭБ-16 контролирует работу основного оборудования по сигналам внешнего

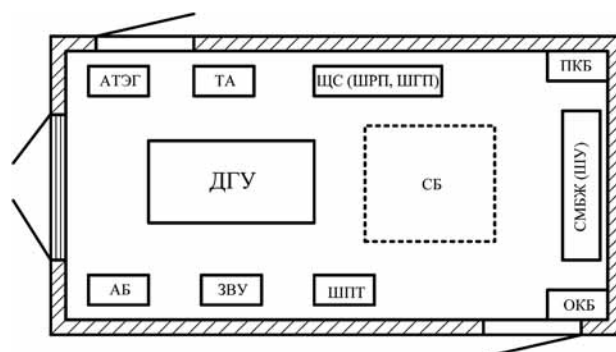


**Рис. 3. Компоновка основного оборудования МЭБ-16**

ДГУ — двигатель-генераторная установка; АТЭГ — автономный тепло-электрогенератор; СБ — солнечная батарея; ЩС — щит силовой со статическими преобразователями электроэнергии; ШПТ — шины постоянного тока; ПКБ — противопожарный комплекс безопасности; ОКБ — охранный комплекс безопасности; СМБЖ(ШУ) — щит управления с системой активного мониторинга (мониторинга, контроля и управления) МЭБ-16; ЗВУ — зарядно-выпрямительное устройство; АБ — аккумуляторная батарея; ТА — тепловой аккумулятор

### Спецификация основного оборудования МЭБ-16

| № п/п | Обозначение | Наименование                                                                       | Количество      |
|-------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| 1     | ДГУ (Д)     | Двигатель Д-242                                                                    | 1 компл.        |
| 2     | (Г)         | Генератор ГС-30-М1                                                                 |                 |
| 3*    | ЩС          | Щит управления и защиты ДЭУ ЩУ-16.3                                                | 1 компл.        |
| 4     | АТЭГ        | Автономный тепло-энергогенератор ЭКО-122                                           | 1 шт.           |
| 5     | ТА          | Тепловой аккумулятор (теплообменник) ТА 45/18                                      | 1 шт.           |
| 6     | СБ          | Солнечные батареи FSM-160, Nevel-250                                               | 6 шт.           |
| 7     | АБ          | Аккумуляторная батарея (Н.Б.) MM 100-12-AGM<br>Аккумуляторная батарея (С.Т) 6СТ-90 | 10 шт.<br>2 шт. |
| 8     | ЗВУ         | Инвертор «Прогресс-12-5000 HYBRID»                                                 | 1 шт.           |
| 9     | ШПТ         | Устройство защиты импульсных перенапряжений FSP-D40-2P                             | 1 компл.        |
| 10    | ОКБ         | КСТО «Изумруд»                                                                     | 1 компл.        |
| 11    | СМБЖ        | Комплекс «Гефест»                                                                  | 1 компл.        |
| 12    | ПКБ         | Прибор «Кварц»<br>Прибор «УОТС-1-1А»                                               | 1 шт.<br>1 шт.  |

\* ООО НПФ «Спецавтоматика».

управления, а также от соответствующих блоков контроля параметров внешней среды, внутреннего оборудования, щита постоянного тока, щита гарантированного питания, ДГУ, АТЭГ, СПЭ, ЗВУ, СБ, АБ, а также угроз физической, экологической и пожарной безопасности. Спецификация основного установленного оборудования МЭБ-16 представлена в таблице.

Разработанный и изготовленный в ООО «НПО 122 УМР» модуль энергетической безопасности МЭБ-16 прошел успешные испытания на различных эксплуатационных режимах. В настоящее время продолжаются его натурные испытания и доработка в направлении обеспечения комплексной безопасности автономных объектов. Также в стадии проработки в сотрудничестве ООО «НПО 122 УМР» с ВА МТО и другими организациями в настоящее время разрабатываются

вопросы создания и практического внедрения МЭБ другой конфигурации и мощностного диапазона.

### Литература

1. Суржикова О.А. Проблемы и основные направления развития электроснабжения удаленных и малонаселенных потребителей России // Вестник науки Сибири. — 2012. — № 3 (4).
2. Прутчиков И.О., Камлюк В.В. Комбинированные энергоустановки автономных объектов с частотным регулированием и преобразованием энергии. — СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2007. — 448 с.
3. Прутчиков И.О., Камлюк В.В., Михайлов В.И., Маккавеев А.В. Системы гарантированного энергоснабжения автономных объектов на базе комбинированных энергоустановок с частотным регулированием и преобразованием энергии. СПб.: ВАМТО, 2016, 228 с.
4. Прутчиков И.О., Камлюк В.В. и др. Оценка и обоснование возможностей реализации на базе комбинированных энергоустановок с ДГУ систем гарантированного энергоснабжения // Морской вестник. — 2009. — № 1 (29). — С. 60–63.
5. Прутчиков И.О., Камлюк В.В. и др. Технологическое, техническое и алгоритмическое обеспечение функционирования интеллектуальных систем гарантированного энергоснабжения автономных объектов МО РФ на базе совместного применения ДГУ и СПЭ // Сборник трудов всероссийской конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Т. 3, — СПб., 2016.
6. Прутчиков И.О., Михайлов В.И., Федяев Л.С., Сумской С.Н. Анализ основных направлений повышения эффективности функционирования систем жизнеобеспечения автономных объектов МО РФ в нормальных и аварийных режимах функционирования // Сборник трудов всероссийской конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности». Т. 3, — СПб., 2018.
7. Прутчиков И.О., Федяев Л.С., Мкртычян А.В. Концепция комплексного применения интеллектуальных технологий когенерации, аккумулирования, частотного регулирования и преобразования энергии в целях обеспечения энергетической безопасности при эксплуатации автономных объектов МО РФ // Сборник докладов научно-практической конференции «Инновационные материалы и технологии» 18.04.2017 г., — Моск. обл., Кубинка, ГУНИД МО РФ. — 136 с.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОТЛАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ С РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ

*А.В. Бондарев, к.т.н.,  
ВА МТО, Санкт-Петербург*

Приведены результаты экспериментальных исследований переходных процессов котла с топкой высокотемпературного кипящего слоя и рециркуляцией уходящих газов. Переходные процессы реализованы за счет возмущающих воздействий изменения нагрузки (расхода топлива) в диапазоне 80–100 %. Работа котла осуществлялась на угле фракционного состава 10–25 мм и фрезерном торфе. Показано, что при работе на различных топливах динамические параметры котла с рециркуляцией уходящих газов, а именно время запаздывания, коэффициент самовыравнивания и время выхода на заданный установившийся режим значительно лучше, чем у котла, работающего без рециркуляции. Сравнение характеристик переходных процессов, полученных экспериментально, и расчетных характеристик, показало удовлетворительную сходимость при отклонениях, не превышающих 5 %.

Источниками теплоснабжения на объектах общего и специального назначения, как правило, являются автономные отопительные и технологические котельные, вырабатывающие горячую воду для отопления, хозяйственного и технологического водоснабжения.

Большинство из них не имеет каких-либо систем механизации топливоподготовки, топливоподдачи и шлакозолоудаления, газоочистки. Хранение угля в них осуществляется на открытых площадках.

Приоритетным направлением модернизации систем теплоснабжения является строительство автоматизированных котельных с технологией сжигания топлива в высокотемпературном кипящем слое (ВТКС).

В настоящее время проведен комплекс экспериментальных исследований при научном сопровождении специалистов ВИ(ИТ) ВА МТО [1, 2] на котлоагрегате КВП-1,74-ВТКС по исследованию стационарных режимов и переходных процессов при сжигании угля, торфа и древесных отходов, а также совместной работы дизель-ге-

нератора с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя.

Многочисленные экспериментальные исследования опытных образцов котлов малой мощности с топками ВТКС выявили ряд недостатков в конструктивных решениях, которые снижают качество топочных процессов на установившихся и переходных режимах. К их числу относятся:

- нарушение режима горения при увеличении коэффициента избытка воздуха и температуры с последующим шлакованием решетки, в особенности на неустановившихся режимах;

- кратерное горение топлива в кипящем слое и неравномерность теплового напряжения объема топочной камеры из-за одностороннего бокового направления подачи первичного воздуха;

- неравномерность (порционность) подачи топлива скребковым питателем, которая нарушает температурный режим и устойчивость горения на установившихся режимах и в переходных процессах;

- унос мелких фракций топлива из кипящего слоя в надслоевое пространство из-за круглого сечения сопел вторичного воздуха.

Для устранения указанных недостатков разработан комплекс технических решений по технологической части и по системе автоматического регулирования процесса горения в топке котла с применением рециркуляции уходящих газов [3].

В рамках практической разработки системы автоматического регулирования и пуска котлов малой мощности в теплоэнергетическом комплексе кафедры двигателей и тепловых установок ВИ(ИТ) ВА МТО проведен комплекс экспериментальных исследований при сжигании твердого топлива в котле КВП-1,74 ВТКС с топкой высокотемпературного кипящего слоя с рециркуляцией уходящих газов на установившихся и неустановившихся режимах работы [4].

Анализ результатов математического моделирования процессов горения в топке котла на статических и динамических режимах с рециркуляцией уходящих газов приведен в работах [4, 5].

Схема экспериментальной установки с расположением измерительных прибавок для кон-

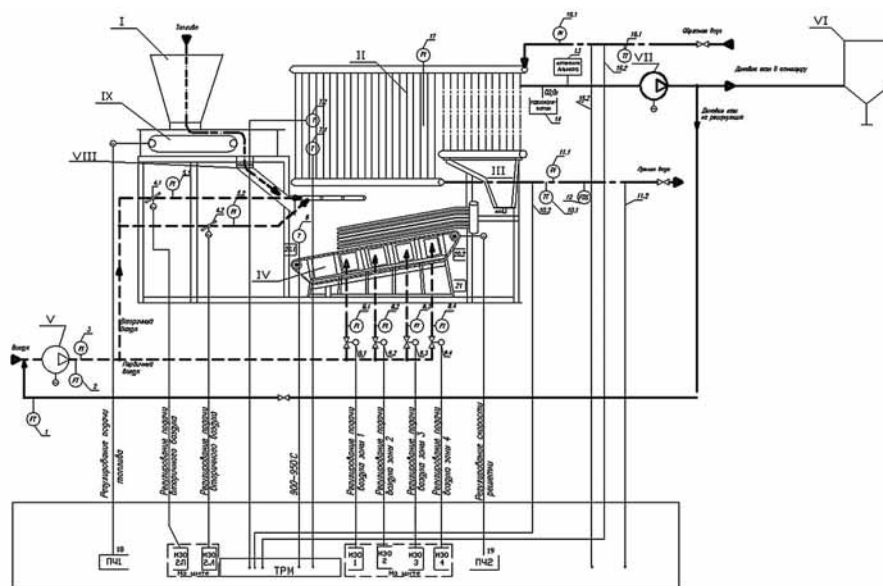


**Рис. 1. Схема экспериментальной установки котла КВП-1,74 ВТКС с рециркуляцией уходящих газов**

троля работы котла ВТКС с рециркуляцией уходящих газов представлена на рис. 1.

На рис. 2–7 представлен измерительный комплекс экспериментального котла КВП-1,74 ВТКС с рециркуляцией уходящих газов.

уходящих газов рециркуляции, вносимых в топку котла ВТКС с определением коэффициента избытка кислорода  $\alpha_{\text{к}}^{\text{см}}$  на каждом режиме представлены на рис. 8. Показано снижение  $\alpha_{\text{к}}^{\text{см}}$  с 1,66 (без рециркуляции уходящих газов) до 1,25 (с ре-

Первый цикл экспериментальных исследований работы котла на переходных и установившихся режимах проводился при сжигании каменного угля calorийностью 5221 ккал/кг, зольностью  $A_p = 11,1 \%$ , влажностью  $W_p = 14,6 \%$  и фракционным составом 10–25 мм.

По программе исследований проведено 4 серии экспериментов на статических и динамических режимах работы котла при внесении возмущающих воздействий за счет расхода топлива воздушной смеси и ступенчатого изменения нагрузки.

Экспериментальные данные по определению максимально возможного расхода



**Рис. 2. Измерительный комплекс котла КВП-1,74 ВТКС**



**Рис. 3. Приборы измерения расхода и давления воздуха и газов рециркуляции**



**Рис. 4. Расстановка термопар в топке котла**



**Рис. 5. Щит КИП с терморегуляторами**



**Рис. 6. Обработка экспериментальных данных на мониторе ПК (ПО Scada)**



**Рис. 7. Измерительный комплекс расхода сетевой и котловой воды**

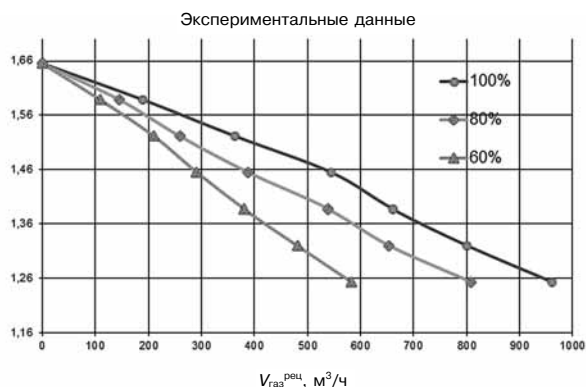


Рис. 8. Изменение коэффициента избытка кислорода  $\alpha$  в зависимости от объема рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной и долевых нагрузках

циркуляцией) на номинальных и долевых режимах при увеличении объема замещения воздуха продуктами сгорания до 25–30 %.

Экспериментальные данные по экономии топлива представлены на рис. 9. Они показывают, что экономия топлива составляет порядка 2,8 % при максимальном объеме замещения воздуха уходящими газами.

Изменение температуры в топке котла на переходных режимах при изменении нагрузки от 80 до 100 % представлены на графиках рис. 10. При изменении расхода топлива в течение 15–20 с одновременно изменяется положение задвижек на трубопроводе рециркуляции уходящих

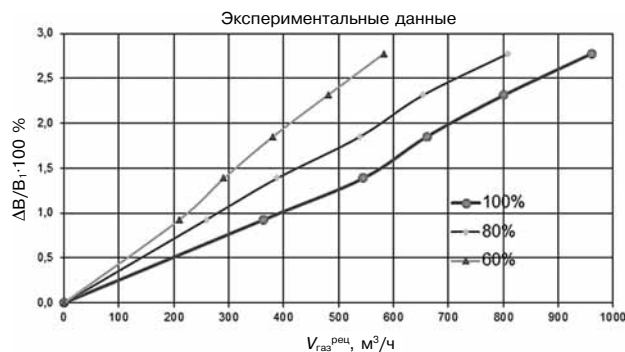


Рис. 9. Экономия топлива котла (в %) в зависимости от объема рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной и долевых нагрузках

газов. Температура слоя в начальный момент характеризуется явно выраженным периодом запаздывания, что обусловлено прогревом топлива и удалением из него влаги. Переходный режим изменения температуры носит аperiодический колебательный характер с выходом на новый установившийся режим. На рис. 11 представлены характеристики переходных процессов, полученные расчетным и экспериментальным способами.

Второй цикл экспериментальных исследований выполнен при сжигании в котле ВТКС фрезерного торфа. На рис. 12 представлены графики расчетного и экспериментального переходных процессов при изменении нагрузки котла от 80

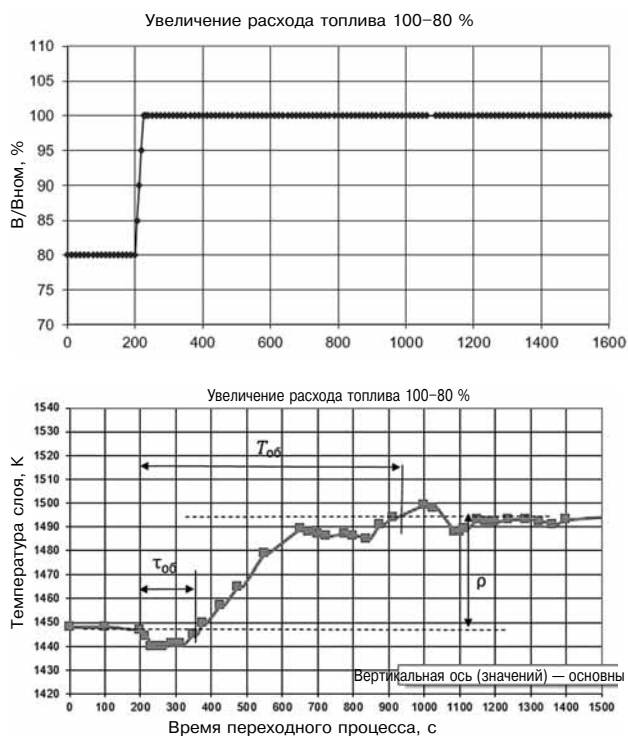


Рис. 10. Переходные процессы в котле «КВП-1,74-ВТКС» с рециркуляцией уходящих газов при изменении расхода топлива (угля)

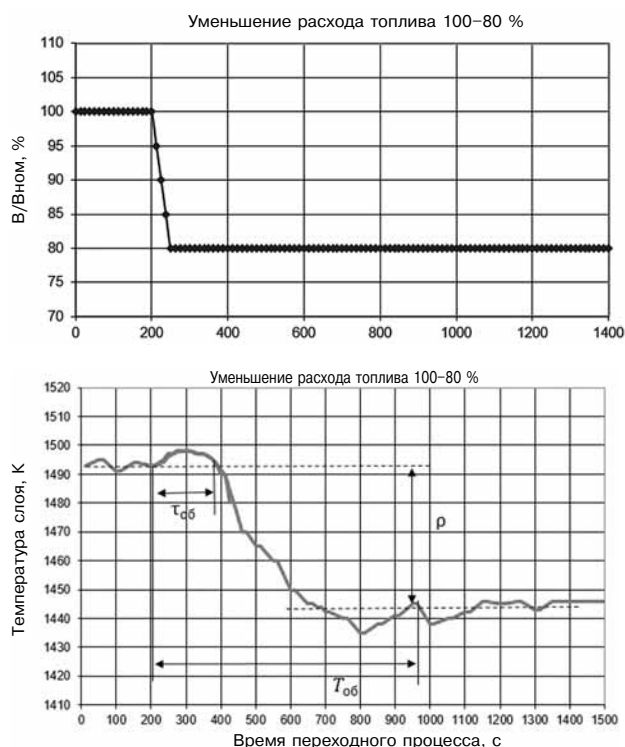




**Рис. 11. Экспериментальный и расчетный переходные процессы в котле «КВП-1,74-ВТКС» с рециркуляцией уходящих газов при сжигании угля**

до 100 % при сжигании фрезерного торфа Тихвинского месторождения следующего элементарного состава: содержание углерода  $C_p = 42,14$  %; водорода  $H_p = 4,46$  %; серы  $S_p = 0,15$  %; зольность  $A_p = 2,17$  %; влажность  $W_p = 23,5$  %; выход летучих  $V_p = 68,85$  %.

Температура слоя в начальный период переходного процесса также характеризуется периодом запаздывания, необходимого для прогрева топлива и удаления из него влаги. Переходный режим изменения температуры носит аperiодический

характер, продолжительность переходного процесса несколько меньше, чем при сжигании угля, что связано с выгоранием фрезерного топлива в надслоевом пространстве в верхней части топочного пространства.

Третий цикл экспериментальных исследований проводился на комбинированной установке при сжигании угля в активном котле-утилизаторе АКУ ВТКС, в топку которого подавались отработавшие газы от дизель-генератора. Результаты экспериментальных исследований комбинированной установки на установившихся режимах работы представлены в статье [5].

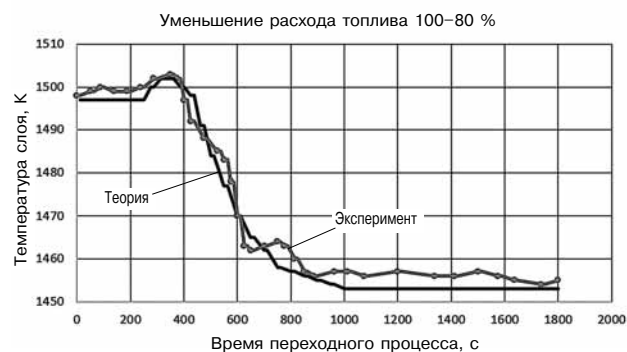
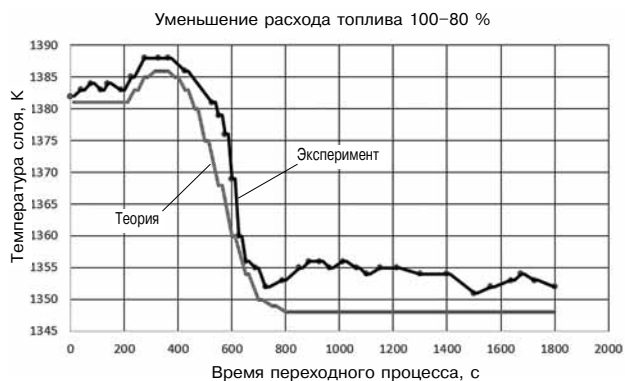
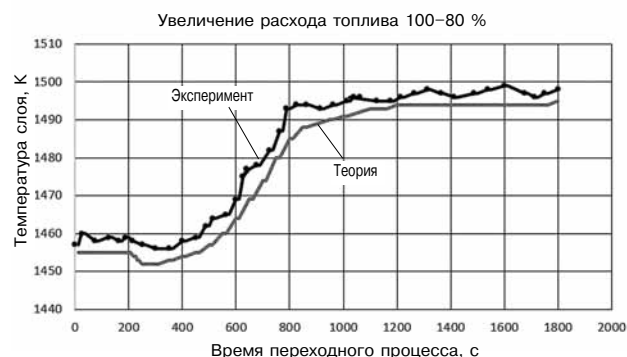
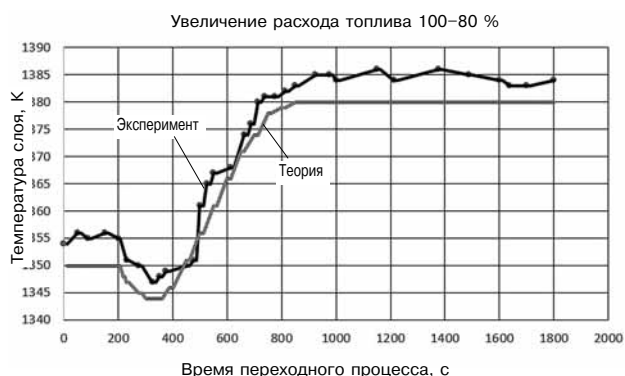


**Рис. 12. Экспериментальный и расчетный переходные процессы в котле «КВП-1,74-ВТКС» с рециркуляцией уходящих газов при сжигании торфа**

**Рис. 13. Экспериментальный и расчетный переходные процессы в котле при работе комбинированной установки с активным котлом утилизатором ВТКС при подаче в топку ОГ дизеля**

Ниже приведены графики переходных процессов полученных расчетным методом и экспериментально.

На рис. 13 показано, что при подаче в топку котла смеси воздуха и отработавших газов дизеля повышается температура горения, время запаздывания сокращается из-за быстрого прогрева топлива, коэффициент самовыравнивания  $\rho_{об}$  несколько ниже, чем при сжигании угля с рециркуляцией уходящих газов, при этом время переходного процесса  $T_{об}$  незначительно увеличивается.

#### Выводы

Характер и продолжительность переходных процессов, полученных экспериментально и расчетным методом при возмущающих воздействиях за счет изменения расхода топлива, при сжигании угля, торфа и работы комбинированной установки с АКУ, показывают удовлетворительную сходимость, не превышающую 5 %.

Коэффициент избытка кислорода в котле с рециркуляцией уходящих газов по экспериментальным данным незначительно превышает расчетные значения и составляет 1,66 при работе без рециркуляции, что обусловлено подсосом воздуха в топочное пространство котла.

Динамические параметры объекта, а именно время запаздывания, коэффициент самовыравнивания, время выхода на заданный режим и меньше чем у котла без рециркуляции уходящих газов.

Экспериментально подтверждена устойчивая работа котла с рециркуляцией уходящих газов в широком диапазоне нагрузок от 50 до 120 % без шлакования решетки.

Основные параметры переходных процессов время запаздывания  $\tau_{об}$ , разгона объекта  $T_{об}$ , коэффициента самовыравнивания  $\rho_{об}$  показывают

удовлетворительную сходимость с теоретическими данными, численные значения которых значительно ниже, чем при работе без газов рециркуляции.

Полученные данные будут использованы для разработки алгоритма системы автоматического управления процессом горения в топке ВТКС котла малой мощности и заложены в контроллер комплектного устройства для комплексной автоматизации котельных оснащенных котлами малой мощности.

#### Литература

1. Смирнов А.В., Бондарев А.В. Основные направления и практический опыт реконструкции угольных котельных малой мощности по технологии высокотемпературного кипящего слоя // Военный инженер. — 2016. — № 1. — С. 13–18.
2. Смирнов А.В., Рода И.С., Овчаров И.В., Бондарев А.В., Карпов М.А. Практический опыт проектирования, строительства и реконструкции угольных котельных малой мощности по технологии высокотемпературного кипящего слоя // Инженерные системы. — 2006. — № 4 (25).
3. Смирнов А.В., Бондарев А.В., Маллаев К.М. и др. Котлоагрегат для сжигания твердого топлива в кипящем слое. Патент на полезную модель. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей 05.05.2017 г., № 170747, Бюл. № 13.
4. Бондарев А.В., Болбышев Э.В., Смирнов А.В. Автоматизация угольных котлов малой мощности с топками высокотемпературного кипящего слоя и рециркуляцией дымовых газов // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 24–28.
5. Смирнов А.В., Бондарев А.В., Александров С.В., Болбышев Э.В. Разработка дизельных теплоэлектростанций с активными котлами утилизаторами высокотемпературного кипящего слоя // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 19–23.



## Василию Степановичу Корчинскому 60 лет!

*08 марта 2019 года  
исполнилось 60 лет  
полковнику в отставке,  
почетному энергетiku РФ,  
к.т.н., доценту кафедры двигателей и  
тепловых установок ВИ(ИТ) ВА МТО  
имени генерала армии А.В. Хрулева  
Василию Степановичу Корчинскому.*

В 1988 году Корчинский В. С. закончил Ленинградское высшее военное инженерное строительное краснознаменное училище (ЛВВИСКУ) им. генерала армии А.Н. Комаровского (в настоящее время ВИ(ИТ) ВА МТО) по специальности инженер-энергетик.

После окончания училища и службы в войсках получил назначение на дальнейшее прохождение службы на кафедре двигателей и энергетических установок (ДЭУ) родного вуза сначала в должности начальника лаборатории, а с 1992 года — преподавателя кафедры. Успешно совмещая преподавательскую деятельность и научную работу над созданием двигателя, работающего по замкнутому циклу, в 1999 году защитил кандидатскую диссертацию. С 2010 по 2015 год работал в должности заместителя начальника кафедры,

преподавая курсантам дисциплины «Экономика и управление энергетическими предприятиями», «Эксплуатация энергетических систем специальных объектов» и др.

За активную и плодотворную работу в образовательной и научной деятельности неоднократно поощрялся командованием института и академии. Имеет награды и поощрения от имени Президиума Верховного Совета СССР, Министра обороны РФ, Министра энергетики РФ.

По основной научной специализации, связанной с совершенствованием автономных источников энергии специальных объектов на базе ДВС, В.С. Корчинский опубликовал более 100 научных работ, в том числе 11 учебников (из них 8 электронных), 9 учебно-методических пособий, получил три патента на изобретения.

В настоящее время Василий Степанович Корчинский продолжает успешно совмещать преподавательскую и научную работу на кафедре с общественной деятельностью в составе научно-методической секции института по специальности «Монтаж, эксплуатация и ремонт систем энергообеспечения объектов специального назначения и инфраструктуры флота».

*Коллектив кафедры двигателей и тепловых установок ВИ(ИТ) ВА МТО, коллеги и друзья, редакция научно-технического журнала «Двигателестроение» поздравляют Василия Степановича с юбилеем и желают ему крепкого здоровья и успехов в плодотворной деятельности, направленной на сохранение лучших традиций коллектива кафедры и института.*



## СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДИЗЕЛЕЙ И ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (материалы конгресса CIMAC-2016)

Впечатляющие темпы развития АТ-технологий и рост вычислительной мощности компьютеров открыли возможности для реализации идеи создания «умного двигателя», полностью адаптированного к изменению внешних условий за счет применения систем электронного управления и контроля. При этом функции электронной системы управления (ECS — Engine Control Systems) предусматривают возможность непрерывной технической диагностики, поиска неисправностей за счет сбора больших массивов данных, направляемых для анализа в центральный блок и выдачи рекомендаций по их оперативному устранению.

В обзоре представлено описание разработок систем управления двигателями, выполненных компаниями, отличающимися различными подходами к их созданию, а также различными функциональными возможностями.

Компанией AVAT Automation GmbH (Германия) в сотрудничестве с Bachmann Electronic GmbH разработана универсальная платформа с открытым программным обеспечением OpenECS для создания систем электронного управления газовыми двигателями на базе промышленных контроллеров PLC. Система обеспе-

чивает поддержание заданной частоты вращения и нагрузки двигателя, соотношения «воздух–топливо», предотвращение детонации и пропуска вспышек, а также защиту от превышения предельно допустимых значений рабочих параметров. Компактные модули PLC, в отличие от существующих автономных устройств, не требуют никаких дополнительных компьютерных инструментов для настройки и техобслуживания.

Компания Diesel United Ltd (Япония) на основе анализа больших массивов данных «Big Data Analysis» разработала диагностическую платформу универсального характера CMAXS LC-A, обладающую функциями автоматического обнаружения отказов, автоматической диагностики, а также автоматического поиска и устранения неисправностей главных судовых двигателей, а также других видов судового оборудования, размещенного в машинном отделении. Для всеобъемлющей поддержки судовой силовой установки как автономного объекта высокой надежности, используются облачные технологии хранения массива данных, а также организована надежная коммуникация по защищенным каналам между судном, изготовителями оборудования и наземными службами.

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

### OPENECS: УНИВЕРСАЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ С ОТКРЫТЫМ ПРОГРАММНЫМ ОБЕСПЕЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННОГО КОНТРОЛЛЕРА

*Martin Greve,  
AVAT Automation GmbH*

#### Реферат

Газовые двигатели с начала их производства комплектовались электронными системами управления, без которых надежный пуск и безопасная работа на газе нестандартного состава гарантирована быть не может. Первоначально системы управления двигателем (ECS — Engine Control Systems) рассматривались как внешние устройства. В их задачу входило поддержание постоянства частоты вращения, нагрузки и соотношения воздух–топливо, а также защита двигателя в случае превышения допустимых значений рабочих параметров. Современные высокотехнологичные двигатели внутреннего сгорания представляют собой электромеханические системы, характеристики которых в значительной степени зависят от программного обеспечения ECS. Поэтому практически все новые разработки и усовершенствования так или иначе связаны с созданием нового программного обеспечения (ПО). В то время как одни двигателестроители идут по

пути создания собственных систем управления, другие предпочитают сотрудничество с фирмами, специализирующимися в данной области.

Система OpenECS описывает механизм взаимодействия между изготовителем двигателя, поставщиком системы управления и интегратором, предоставляя изготовителю двигателя непосредственный доступ к открытому управляющему коду. При создании отдельных компонентов нового двигателя изготовителя обычно привлекают субподрядчиков, обладающих обширным опытом и мощными средствами разработки. Это касается и программного обеспечения, которое изготовитель может создавать либо самостоятельно, либо с помощью специализированной организации.

Платформа OpenECS поддерживает языки программирования PLCopen, а также код MATLAB/SIMULINK. За последние 10 лет производители контроллеров программируемой логики (PLC — Programmable Logic Controllers) освоили платформу PLCopen, приняв ее в качестве стандарта программирования PLC, применяемых в промышленной автоматике. PLCopen предлагает интерфейсы для основных профессиональных средств разработки программного обеспечения, предназначенных для систем отладки, тестирования, документирования, управления исходным

кодом и отслеживания истории. Многие классификационные общества требуют использования таких инструментов разработки, как условия надлежащего качества создаваемого программного обеспечения.

Фирма AVAT имеет обширную библиотеку специализированных программных модулей, учитывающих специфику газового двигателя и его периферийных устройств. «Программная начинка» этих модулей включает, в частности, функции синхронизации и защиты генератора, встроенные инструменты диагностики, предназначенные для сервис-инженеров, а также проверенные драйверы связи, обеспечивающие совместимость с различными внешними устройствами, такими как, например, системы зажигания. Разработка программы для определенного двигателя начинается, как правило, на базе одной из готовых прикладных программ, разработанных ранее для разных типов двигателей. Фирма AVAT готова поддержать изготовителя двигателей на любой стадии разработки или же взять разработку целиком на себя.

Программное обеспечение OpenECS базируется на промышленных системах PLC, выпускаемых в больших количествах. Производитель PLC берет на себя ответственность за своевременную модернизацию систем, за обеспечение их соответствия разного рода классификационным требованиям и за их постоянное послепродажное обслуживание, чтобы в долгосрочной перспективе наличие необходимых запчастей всегда было гарантировано. Модульная система PLC содержит центральный процессор (из доступного ассортимента) и может быть укомплектована любыми модулями I/O (входов-выходов), включая модули мониторинга и защиты сети. Компактные модули, как и любые системы PLC, рассчитаны на оптимальное заполнение объемов пульта управления, размеры которого ограничены. Настоящий доклад раскрывает некоторые новые направления развития промышленной автоматики, которые представляются наиболее перспективными.

Вместе с тем в номенклатуре предлагаемых на рынке PLC пока еще недостаточно некоторых модулей I/O, весьма существенных для газового двигателя. Системы AVAT восполняют данный пробел, предлагая компактные специализированные модули PLC для управления типичными устройствами, такими как, например, приводы регулирующих и перепускных газовых заслонок, шаговыми двигателями, а также для обработки сигналов сенсоров, например, датчиков скорости, коэффициента избытка воздуха, детонации и давления в цилиндрах. В отличие от существующих автономных устройств, эти модули

полностью интегрированы в PLC и не требуют дополнительных компьютерных инструментов для настройки и техобслуживания.

В результате удалось создать наиболее совершенную на сегодняшний день компактную платформу для систем управления двигателем, поддерживающую инструментальный разработчика профессионального ПО, которое соответствует современным требованиям к промышленным PLC.

### **Введение**

Система управления (ECS) в настоящее время стала одним из важнейших компонентов двигателя, что заставило AVAT полностью пересмотреть концептуальную основу своей продукции и соответствующих услуг. Раньше производителям газовых двигателей поставлялись системы управления только собственной разработки и изготовления. Это позволяло двигателестроителям сконцентрироваться на совершенствовании конструкции, в то время как адаптацией ECS к двигателям занимался AVAT.

Сегодня роль ПО в обеспечении необходимых показателей двигателя быстро растет, что побудило многих двигателестроителей создавать собственные подразделения программистов в предвидении существенного увеличения вложений в разработку ПО в ближайшем будущем. Именно такой подход позволяет им стабильно держаться на уровне постоянно растущих требований к показателям качества и универсальности своих изделий. Это не исключает взаимодействия с контрагентами, которые помогают двигателестроителям быстрее осваивать новые технологии и частично разгрузить собственных разработчиков, сохраняя при этом контроль над ключевыми элементами программного обеспечения.

Современные тенденции развития техники и ожидания заказчиков показывают, что крупные двигатели в ближайшем будущем должны стать «умными двигателями». Это открывает новые возможности для совершенствования двигателей, однако приводит к заметному усложнению их систем.

### **Умный двигатель**

Современное направление эволюции промышленных изделий характеризуется такими понятиями, как «интернет вещей» (IoT — Internet of Things), четвертая промышленная революция (Industrie 4.0) и «умное производство» (Smart Manufacturing). «Умные» изделия можно в целом охарактеризовать следующими особенностями [1]:

1. Связь с другими системами.
2. Автоматическая адаптация к текущим условиям.
3. Индивидуализация в соответствии с нуждами заказчика.

4. Сбор информации о конкретных условиях применения, которая поступает в центральный сервер для анализа.

5. Постоянная оптимизация рабочих характеристик, эффективности и готовности к использованию.

6. Приобретение в одном пакете программного обеспечения как услуги (Product-as-Service), оплата за использование (Pay-per-use).

Все указанные характеристики применимы к агрегатам и системам, используемым в двигателях внутреннего сгорания.

#### **Сетевая интеграция и адаптация**

Дизель-генераторные агрегаты теперь управляются не только местными системами АСУ ТП (SCADA — Supervisory for Control And Data Acquisition), но являются компонентами крупных виртуальных электростанций, при этом каждый из них играет свою роль в стабилизации работы электросетей. Аналогичным образом в гибридных системах они вместе с аккумуляторными батареями и электродвигателями объединяются в виртуальные энергомодули. Это весьма перспективный способ создания систем с желаемыми динамическими характеристиками. Подобное объединение возможно лишь при наличии гибких интерфейсов данных.

Если говорить о газообразных топливах, то здесь наблюдается распространение на рынке таких продуктов, как пиролизный газ, сланцевый газ, биогаз и водород. Значительный интерес представляет возможность подачи таких газов через системы питания природным газом, что позволяет разделить производство газов и электроэнергии, используя при этом вместительные хранилища газовых сетей. Для газовых двигателей это означает не только возможность работы на газовых смесях неизвестного состава, но и нечувствительность к значительным флуктуациям состава рабочей смеси. Для этого необходима автоматическая адаптация газового двигателя к составу используемого в данный момент газа.

Спросом на рынке будут пользоваться продукты, индивидуализированные для конкретных применений и определенных заказчиков, с учетом местной специфики. Все это особенно актуально для «рынка покупателя», когда предложение двигателей на рынке превышает покупательский спрос. А достичь этого при минимуме затрат можно за счет последовательного внедрения модульной концепции. В идеале такие варианты продуктов будут отличаться между собой лишь программным обеспечением.

#### **Сбор и обработка данных**

В настоящее время двигателистроители и операторы получают слишком мало данных от своих объектов, находящихся в эксплуатации.

Автоматическая обратная связь с выдачей данных об их использовании и возникающих отказах открывает новые возможности оптимизации продукта. Такая обратная связь в сочетании с другой релевантной информацией позволяет оптимизировать размещение ресурсов (техобслуживание, расходные материалы, включая топливо, и т. п.), а также применить новые методы биллинга, основанные на ожидаемом износе. В других областях промышленности новые модели ценообразования уже создали стимулы для дальнейшего совершенствования продуктов в части диагностических возможностей, надежности и эргономики, при этом разработка таких методов стала возможной лишь с появлением массивов данных, получаемых с мест эксплуатации.

Сложные функции, реализация которых существенно зависит от опытных данных, такие как, например, автоматический контроль и диагностика, теперь переходят от местных контроллеров к центральному серверу. Данные, собранные с этой целью, являются базой для дальнейшего совершенствования алгоритмов. Технически это реализуется программными и аппаратными модулями, которые направляют данные на контроллер двигателя и осуществляют их предварительную обработку. После этого данные пересылаются по защищенным каналам связи на сервер, где осуществляется их оценка.

#### **Ожидания заказчиков**

Пользователи умных продуктов обоснованно ожидают, что их покупка окажется на самом высшем уровне удобства обращения с ней и их защищенности. Эти качества обеспечиваются при следующих условиях.

➤ Соединение с интернетом — энергетические комплексы должны быть доступны через интернет, однако при этом защищены от несанкционированного доступа и хакерских атак. С этой целью необходимо предусмотреть меры для защищенного обновления всех компонентов системы, подверженных риску.

➤ Политика конфиденциальности — заказчики могут разрешать автоматический сбор данных только при наличии прозрачной и профессиональной инструкции по защите конфиденциальных данных, поскольку речь по существу идет о справедливом «обмене данных на добавленную стоимость».

➤ Удобство использования — современный пользователь ожидает, что применять новое промышленное устройство будет не сложнее, чем смартфон или планшет. Например, он захочет, чтобы пользовательский интерфейс включал функцию «multi-touch», поскольку любое другое решение сегодня будет выглядеть безнадежно устаревшим.

Анализ тенденций предложения и спроса показывает, что в будущем сложность систем управления двигателем (ECS) резко возрастет. К основному назначению — управлению двигателем с мониторингом его параметров — добавляются другие функции, что вызовет необходимость использования коротких циклов разработки.

#### Почему именно промышленные PLC?

При переориентации портфеля продукции AVAT в качестве основной ставилась задача создания платформы, в принципе способной охватить все функции, интересующие двигателестроителей и потребителей. Уже сейчас существуют специализированные устройства для выполнения всех известных на сегодняшний день функций. Эти устройства связываются между собой через различные интерфейсы данных, чтобы нужные заказчикам функции распределялись между минимальным числом устройств, что позволит минимизировать требования к обслуживанию инструментов разработчика.

Промышленные PLC идеально подходят для систем SCADA и вспомогательных элементов управления, поскольку заложенный в них модульный принцип обеспечивает чрезвычайную гибкость и легкость конфигурирования. К тому же они поддерживают множество протоколов обмена данными. Промышленные PLC оказываются, таким образом, идеальными устройствами для системной интеграции. Используя специализированные модули, PLC могут намного расширить сферу применения, распространив ее на те области, где раньше использовались только специально сконструированные устройства, например, управление перемещениями, робототехника и функции безопасности.

PLC предназначены для инженеров, решающих технические задачи. В большинстве случаев средства конфигурации, компиляторы и отладчики уже изначально встроены в изделие. В настоящее время программирование большинства PLC производится по стандарту МЭК 61131-3. Многие производители присоединились также к Организации PLCopen®. Этот универсальный стандарт обладает огромными преимуществами в том, что касается возможностей подбора персонала, и обеспечивает кросс-платформенную переносимость решений.

Благодаря блочному принципу разделения между модулями I/O и модулями CPU (центрального процессора) многие производители получили возможность обеспечить гарантированное снабжение заказчиков запчастями на протяжении ряда лет, не прекращая при этом совершенствование изделий до современного уровня при помощи новых модулей CPU.



Рис. 1. Иерархия задач автоматизации и управления двигателем

Вот почему используются промышленные CPU модульного типа для реализации функций управления вспомогательными устройствами, например приводным генератором и двигателем. Уровень SCADA тоже может быть обеспечен с помощью того же семейства PLC, что позволяет автоматизировать всю станцию с использованием единой платформы (рис. 1). Система M1 была выбрана благодаря следующим преимуществам:

- компактности, поскольку места для размещения шкафов управления обычно не хватает из-за пространственных ограничений машинного зала или моторного отсека;
- запаса прочности, позволяющий устанавливать изделия непосредственно на двигателе;
- все компоненты сертифицированы для использования в судовых условиях;
- совместимости с MATLAB/SIMULINK, обеспечивающей возможность быстрого макетирования.

Модульные PLC являются идеальными элементами для управления вспомогательными системами и для задач SCADA, но для использования в системах управления двигателем им не хватает некоторых важных функций. В рамках стратегического партнерства между AVAT Automation и Bachmann Electronic GmbH этот пробел был заполнен.

#### Входы/выходы (I/O), адаптированные для конкретного двигателя

Не все используемые на двигателях датчики и исполнительные устройства (актуаторы) могут стыковаться со стандартными PLC напрямую. Проблема была решена с использованием трех направлений. Во-первых, были использованы модули обработки сигнала AVAT со стандартными модулями I/O, реализующими некоторые специальные функции, например измерение частоты вращения двигателя с помощью зубчатых венцов

специальной формы. Во-вторых, разработаны модули расширения для связи со специальными актюаторами или датчиками, которые таким образом полностью интегрируются в PLC с помощью программных блоков. Для датчиков, которым необходимы специальные виды обработки сигнала, этот процесс перенесен в модуль расширения с целью разгрузки PLC. В-третьих, использованы специальные коммуникационные драйверы AVAT для интеграции дополнительных устройств, например, системы зажигания. В терминах «пирамиды автоматизации» (см. рис. 1) это означает, что специальные функции передаются на уровень датчиков. Понятно, что для полного использования возможностей openECS по реализации стратегий управления нужно, чтобы соответствующие модули работали по принципу «умного датчика» или «умного актюатора», т. е. при формировании обработанного сигнала они сами освобождались от каких-либо функций управления. Кроме того, при этом значительно улучшаются тестируемость системы и анализ рисков (FMEA).

#### Диагностика

С точки зрения диагностики газовый двигатель представляет собой весьма сложную техническую систему. Надежная диагностика износов и других дефектов является нетривиальной задачей и осуществляется экспертами, чья работа требует доступа к большим объемам данных. В принципе, в PLC уже заложены алгоритмы построения трендов и регистрации событий, но для экспертной оценки эти алгоритмы недостаточны. Прежде всего это касается объемов данных, детализации, временного разрешения, объемов хранения и возможностей обработки. Поэтому в систему был встроен диагностический программный пакет AVAT.

#### Открытые ECS

Используя упомянутые выше аппаратные модули и хорошо отработанное программное обеспечение AVAT ECS-Software, был создан универ-

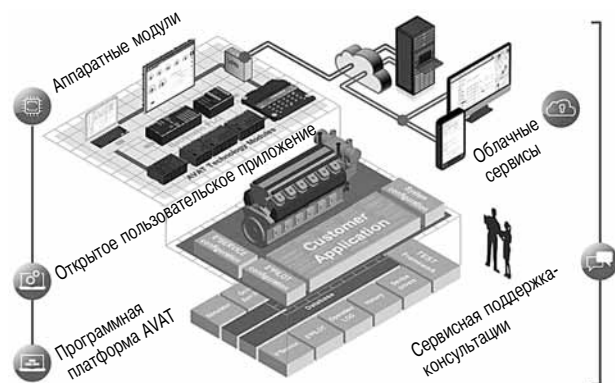


Рис. 2. Модульная платформа AVAT openECS: четыре технических слоя и сервисы поддержки

сальный пакет программного обеспечения, аппаратного обеспечения и сервисов для разработки контроллеров управления двигателями, названный openECS (рис. 2). Самым сложным моментом в этой работе оказалась последовательная реализация модульной концепции, которая дала возможность использовать любые элементы системы независимо друг от друга. Разумеется, главным стимулом при этом было стремление создать полностью законченную и цельную систему.

#### Аппаратные модули

В основе системы лежат контроллер Bachmann PLC Series M1 с CPU, реализующим функции различного уровня, гибкие модули связи и полный набор модулей I/O для цифровых и аналоговых сигналов любого типа. С целью сокращения номенклатуры и количества запчастей рекомендуется заказчикам приобретать ограниченное число различных модулей. Применение PLC серии M1 позволяет обеспечить различные уровни резервирования и реализовать разные конфигурации пространственного расположения модулей I/O на станции. Использование модулей типа GSP, GSM и GM дает возможность полностью обеспечить функции синхронизации и мониторинга генератора и сети средствами системы. Все измеренные величины при этом могут быть использованы для реализации не только заданных функций защиты, но и любых других функций управления.

#### Специальные технологические модули AVAT.

Эти модули дополняют набор M1 PLC некоторыми функциями, специфичными для двигателей внутреннего сгорания. Проверенные модули контроля рабочего процесса E2KNOCKCON (процессор, реагирующий на структурный шум и используемый в детекторах детонации и пропуска всплесков) и модули E2PRECON (процессор для анализа давления в цилиндре) теперь доступны в особо компактном исполнении. Модуль AVAT E2CORE представляет собой универсальный модуль для управления актюаторами газовых заслонок, перепускных клапанов и газовых смесителей. Все модули выполнены в едином форм-факторе M1, чтобы минимизировать занимаемое ими место в шкафу управления. Все они подключаются к PLC через шину CAN, что позволяет использовать их с контроллерами или PLC других двигателей. В этом случае E2CORE может автономно управлять частотой вращения, нагрузкой двигателя и соотношением воздух—топливо. Это позволяет снизить предъявляемые к PLC требования в отношении фазировки и точности.

**Внешние воздействия.** Модули фирмы «Bachmann», как и модули AVAT, рассчитаны на работу при повышенных температурах и высоком

уровне вибраций, что позволяет размещать их непосредственно на двигателе. Кроме того, большинство модулей сертифицированы для работы в судовых условиях.

**Визуализация.** Система позволяет обеспечить визуализацию средствами третьей стороны через интерфейсы данных, и, кроме того, дает некоторые дополнительные возможности. С помощью инструмента WebMI рго возможна визуализация любого контента, который через встроенный веб-сервер может быть выведен на любое устройство, имеющее веб-браузер.

Пакет визуализации AVAT E2PILOT для сенсорных экранов с функцией «multitouch» специально рассчитан на операторов станций. Функции скроллинга, интерактивного вывода журнала записи событий или трендов разной конфигурации обеспечивают оператору уровень комфорта, к которому привыкли обладатели смартфонов. При этом визуализация для каждого конкретного двигателя или заказчика — вопрос лишь нескольких дополнительных строк программного кода.

A E2SERVICE — это инструмент для требовательных сервис-инженеров и техников. Конфигурация дисплеев построена так, чтобы максимально сократить машинное время при исполнении типичных процедур, таких, например, как ввод в эксплуатацию, настройка контроллера, поиск и устранение неисправностей, техобслуживание. Журнал записи событий содержит контекстную информацию, фильтр, функции поиска и перехода. Параметры включают в себя помощь онлайн, а также функции сохранения, восстановления и сравнения.

#### **Открытое пользовательское приложение**

В этом слое находятся все контроллеры и маршруты, а также функции управления и контроля двигателя или его периферийных устройств. Именно здесь создается индивидуальная конфигурация и выполняется программирование всех элементов, специфичных для конкретного двигателя или заказчика. Конструктор двигателя или инженер станции получает неограниченный доступ к исходным кодам данного слоя. Он может видеть и самостоятельно изменять любые параметры в пределах этого слоя. Для программирования M1 центр решений предлагает мощную среду программирования, включающую языки программирования по МЭК 61131-3, тем самым предоставляя доступ ко всем функциям современного PLC. При этом можно не только применить код, сгенерированный автоматически в MATLAB/SIMULINK, но и протестировать его в интерактивном режиме.

**База данных приложения.** Отличительной особенностью openECS является централизованная

база данных. Конфигурация и программирование характеристик всех важнейших объектов осуществляется в CPU так, чтобы все процессы мониторинга, записи и регистрации протекали в фоновом режиме. Программа допускает возможность динамического изменения конфигурации, благодаря чему можно задавать изменяемые пределы или сложные разрешающие условия. Это обеспечивает оптимальную функциональность и тестируемость системы при любых условиях. Наличие параметров конфигурации позволяет автоматически генерировать необходимые документы, например, списки параметров и предельно допустимых величин, а также списки информационных точек для внешних интерфейсов.

#### **Программная платформа AVAT**

В основе системы лежит программная платформа AVAT, которая, в числе прочего, содержит:

- инструменты разработки и тестирования;
- библиотеки функций, относящиеся к конкретному двигателю (например, нагрузочные устройства, регуляторы скорости/нагрузки/состава смеси и т. п.);
- база данных по всем объектам данных;
- диагностический комплект, состоящий из журналов регистрации, ретроспективных записей и необходимых пользовательских интерфейсов;
- драйверов тех или иных устройств, например, технологических модулей AVAT или блоков, поставляемых третьей стороной, например, системы зажигания;
- встроенный каркас для моделирования.

Платформа предлагает инструменты и функциональные блоки, существенно ускоряющие разработку приложений.

Кроме того, использование проверенных программных модулей позволяет свести к минимуму трудоемкость испытаний.

#### **Организация дистанционного контроля**

Возможность прямого дистанционного доступа обеспечивается предварительно сконфигурированными маршрутизаторами VPN, которые создают защищенную линию связи между станцией и защищенным контактным сервером.

Авторизованные лица могут соединяться со станцией после регистрации на сервере.

В перспективе наибольший интерес представляет возможность сбора данных центральным сервером. Программные модули платформы осуществляют передачу на центральный сервер зашифрованных пакетов данных с синхронизацией по таймеру или по событиям, где они проходят дальнейшую обработку. В настоящее время доступны модули извещений о статусе и модули передачи аварийных сигналов. В процессе разработки находятся модули планирования и модули мониторинга по условным критериям.

Полный контроль доступа делает возможной одновременную работу многих клиентов, обладающих индивидуальными правами доступа.

#### **Вклад третьих сторон**

Разработчики каждой новой системы делают все для того, чтобы она со временем не устаревала или устаревала как можно медленнее. Важнейшим условием для этого является совместимость с продуктами других производителей. На аппаратном уровне модули взаимодействуют друг с другом в соответствии с открытыми протоколами связи на основе CAN или Ethernet (исключением является взаимодействие модулей M1 между собой). В платформу уже включены стандартные блоки драйверов для наиболее распространенных устройств, поставляемых третьими сторонами. На уровне приложений в платформу может быть интегрирован практически любой программный модуль. Инструменты разработчика снабжены интерфейсами связи с внешними инструментами управления, исходными кодами и структурами устройств тестирования или паспортизации. Рекомендуются использовать подобные инструменты совместных разработок для повышения их эффективности и обеспечения надлежащего качества программного обеспечения. Как правило, в процедурах сертификации использование таких инструментов является одним из формальных требований.

#### **Приоритет процессов**

OpenECS создает технические предпосылки для разработки PLC систем управления двигателями. Однако пользователя прежде всего интересует, насколько система окажется полезной для его повседневной работы. И в этом смысле отличие хорошего программного продукта от плохого зачастую определяется именно мелкими деталями. Нередко подобные детали воспринимаются пользователями как нечто само собой разумеющееся. Впрочем, то же самое можно сказать о любом продукте, которым пользуются люди.

Как показал опыт, чрезвычайно полезны встречи с пользователями, в ходе которых обсуждаются их действия с использованием так называемых «Карт Пользовательских Историй» (User Story Maps). Такие обсуждения проводятся в рамках семинаров, на которых вместе собираются пользователи, разработчики, менеджеры по разработкам, технической поддержке и продажам. Пользовательские истории охватывают все этапы взаимодействия пользователя с платформой, включая первоначальное ознакомление, адаптацию различных программ, поиск ошибок, процесс выпуска и документирования, и, наконец, формальную передачу пользователю. Так, у всех заинтересованных сторон вырабатывается общее

понимание того, как платформа должна использоваться, какие в ней остались недоработки, источники ошибок, и какая еще помощь может понадобиться пользователю со стороны разработчиков. Результатом является создание расширений, включая инструменты, шаблоны, автоматические проверки программных кодов, интерфейсы документации и средства трансляции. В некоторых случаях обнаруживалась необходимость переработки отдельных компонентов — либо во избежание структурного дублирования, либо из-за того, что готовая AVAT инфраструктура по каким-либо причинам не подходила для заказчика.

#### **Моделирование**

Как правило, изготовителям мощных двигателей приходится сталкиваться с недостатком стендового времени. Отсутствие возможности проверить работу двигателя на всех необходимых режимах на стенде, вынуждает изготовителя добиваться от заказчика разрешения на сокращение объема испытаний, необходимого для формального процесса передачи продукта в эксплуатацию.

В этом случае имеется возможность прибегнуть к имитации, что позволяет решить проблему, к тому же существенно сократив производственные затраты. Имитаторы основных замкнутых контуров (HiL — Hardware-in-the-Loop) чрезвычайно важны для проверки системы в целом. Имитаторы, встроенные непосредственно в систему, как выяснилось, незаменимы для многих повседневных задач, таких как разработка, обучение, тестирование, документирование и продажи.

#### **Модели совместной работы**

Некоторые пользовательские истории касаются услуг соисполнителей, которые дают возможность при работе над крупными проектами воспользоваться опытом партнера или его ноу-хау. Классическая схема исполнения контракта сводится к следующему: задаются технические требования к программному обеспечению, которые в точности должны быть исполнены. После функциональной приемки ответственность переходит к покупателю. Такая схема четко определяет обязанности сторон и является идеальной для крупных контрактов. Однако эта схема мало пригодна для повседневной деятельности, поскольку не предполагает оперативного сотрудничества. Наличие согласованного процесса разработки с использованием совместного инструментария создает новые формы сотрудничества: от консультаций по вопросам построения модулей до выпуска гарантий качества серийных изделий AVAT, включая проверяемую процедуру документирования.

#### **Примеры**

В качестве примеров приведем два контроллера, созданных с помощью инструмента openECS. Обе

системы работают через пользовательский интерфейс E2PILOT, при этом данные всех компонентов могут быть использованы для управления и контроля с помощью инструмента E2SERVICE.

**Пример 1: газовый двигатель мощностью 300–500 кВт**

Разработана система openECS для типичного стационарного газового двигателя с внешним дозатором обедненной смеси, конструкция которого включает смеситель, дроссельную заслонку и перепускной клапан. Объем, необходимый для размещения компонентов PLC (H×W×D), составляет 117×385×60 мм, еще один объем размером 117×330×60 мм необходим для компонентов AVAT (рис. 3).

Отличительные особенности системы:

- интерфейсы для блоков управления впрыском;
- процессы управления двигателем на основе датчика давления в цилиндре, функции которого включают выравнивание нагрузки по цилиндрам и  $p_{\max}$ , а также контроль детонации и пропуска вспышек;
- дополнительный регулятор защиты от детонации, использующий стандартные датчики детонации;
- два пульта управления — местный и дистанционный.

Система выполняет следующие функции:

- управление и контроль всех процессов в двигателе;

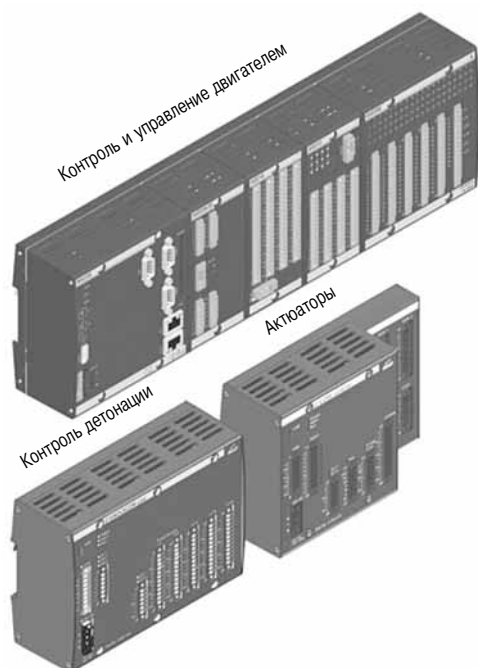


**Рис. 3.** Компоненты ECS для газового двигателя мощностью 300–500 кВт с внешним смесеобразованием

- управление системой охлаждения двигателя, промежуточным и аварийным охладителями (в том числе драйкулерами);

- контроль детонации и пропуска вспышек в отдельных цилиндрах;

- CAN-интерфейс с системой зажигания;
- интерфейс SCADA (Modbus TCP).

**Пример 2: главный судовый двухтопливный двигатель мощностью 10 МВт**

Главный судовый двигатель мощностью 10 МВт оснащается несравненно большим количеством датчиков, для которых требуется соответствующее количество I/O модулей. Во избежание прокладки длинных кабелей I/O модули для управления подачей газа и вспомогательными устройствами были размещены на отдельном пульте и связаны между собой через каналы Ethernet. Согласно требованиям классификационных обществ, система включает в себя блок защиты (также состоящий из PLC модулей), резервные каналы Ethernet и CAN и контролируемые сигнальные кабели для связи с мостиком. Для анализа структурного шума и контроля давления в цилиндре используются судовые версии E2PPRECON-M и E2KNOCKCON-M (рис. 4).

ECS с I/O модулями и блоком защиты размещается в компактном шкафу управления,

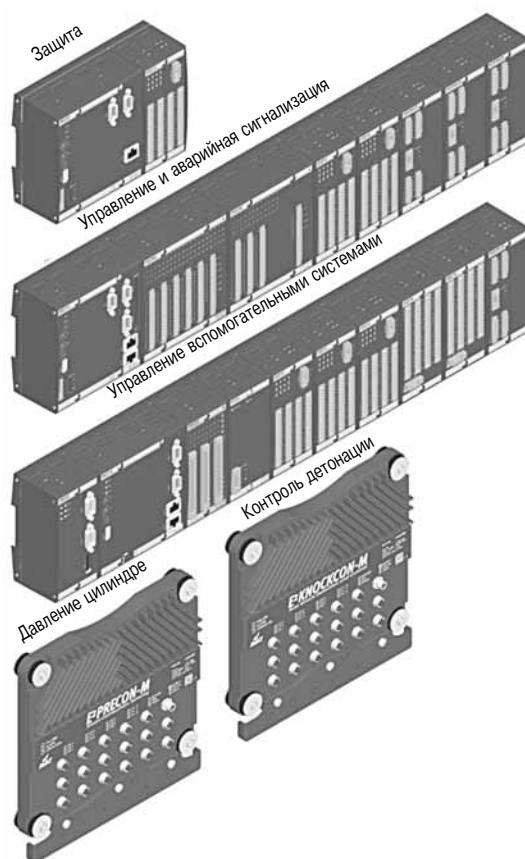


**Рис. 4.** Компоненты ECS для главного судового двухтопливного двигателя мощностью 10 МВт

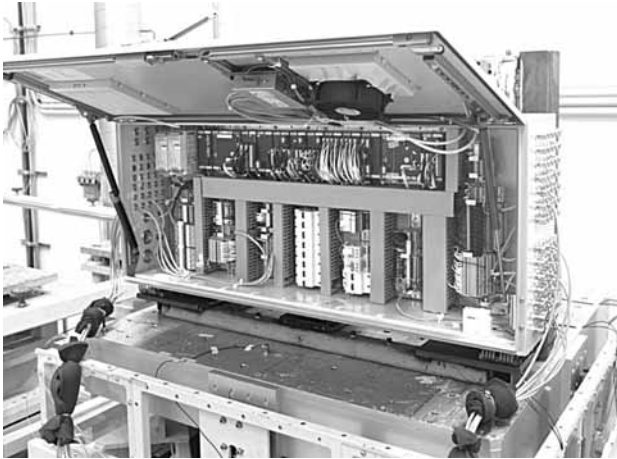


Рис. 5. Пульт управления двигателем на вибростенде

установленном непосредственно на двигателе. Испытания на вибростенде подтвердили соответствие системы жестким требованиям в части вибростойкости (рис. 5).

#### Заключение

Создание «умного двигателя», который, с одной стороны, может быть интегрирован в общую сеть с гибридными или виртуальными приложениями, а с другой — способен сам собирать данные и направлять их в центральный блок для анализа стало возможным благодаря разработкам AVAT. «Смартификация» открывает большие возможности для совершенствования продуктов, что позволит существенно ускорить новые разработки. В этом процессе основная роль отводится программному обеспечению.

С учетом этих обстоятельств AVAT в сотрудничестве с «Bachmann Electronic GmbH» существенно

изменил номенклатуру и характер своей продукции. Устройства, программные модули и сервисы, созданные с помощью новой платформы openECS, могут быть адаптированы для конкретных производителей двигателей и проектантов станций, которые используют профессиональные инструменты при создании программного обеспечения высокого уровня или захотят обеспечить себе такую возможность в будущем. Чтобы начать новую разработку, достаточно в исходный код ввести шаблоны типичных конфигураций двигателей или ECS конкретных двигателей с учетом их назначения.

Ключевым условием разработки новой платформы была всесторонняя оценка возможных проблем при написании, обновлении и поставке программного обеспечения во взаимодействии с конечным пользователем. Только так можно минимизировать количество ошибок, существенно облегчить и автоматизировать работу по созданию нового двигателя. Экономичный подход при разработке процессов и инструментов является не только необходимым условием ускорения создания новых изделий. Он также способствует рождению новых форм сотрудничества, при которых все ресурсы разработчика могут быть в дальнейшем использованы при выполнении более крупных проектов.

#### Литература

1. Porter M.E. and Heppelmann J.E. «How smart, connected products are transforming competition» Harvard Business Review, 11/2014.
2. see [www.plcopen.org](http://www.plcopen.org)

**ОРГАНИЗАЦИЯ СОВМЕСТНОЙ ПОДДЕРЖКИ  
ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ ПЛАТФОРМЫ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ДАННЫХ**

*Takashi Fujii, DIESEL UNITED LTD.*

*Junichi Hirata, ClassNK*

*Koji Takasaki, Kyushu University*

**Реферат**

Впечатляющий рост вычислительной мощности компьютеров и совершенствование алгоритмов самообучения, создали возможности для более тонких методов поиска неисправностей и технической диагностики, основанных на анализе больших массивов данных, или «биг-дата» («Big Data Analysis»). Получаемые при этом результаты широко используются в разных областях, в частности, для поиска наиболее надежных и экономичных решений.

В существующих судовых силовых установках имеющиеся системы диагностики в большинстве случаев значительного экономического эффекта не приносят, поскольку:

- в машинном отделении находится большое количество различных механических систем разных производителей, каждая из которых имеет собственную систему диагностики;

- разработка систем диагностики для небольших устройств обычно не ведется, так как экономически нецелесообразна;

- форматы данных, используемых в КИП для механического оборудования, не стандартизованы, что тормозит развитие многоцелевых систем.

Для решения упомянутых проблем разработана универсальная диагностическая платформа, обладающая функциями автоматического обнаружения отказов, диагностики, а также поиска и устранения неисправностей.

Алгоритм автоматического обнаружения отказов, основан на самообучении и определен оптимальный метод применения этого алгоритма для каждой конкретной судовой системы. Полученные данные измерения и результаты диагностики по каждому виду оборудования интегрированы с функциями управления и техобслуживания. Стандартизованы алгоритмы управления указанной выше информацией и ее эффективного использования.

Результаты эксплуатационных испытаний, проведенных в присутствии многих производителей механического оборудования, позволили получить предпосылки для создания системы комплексной диагностики всего оборудования машинного отделения. Эти испытания вполне оправдали ожидания разработчиков. Предыдущая версия системы в последние годы прошла ряд испытаний на борту действующих судов, при этом большинство проблем было решено, что дока-

зывает эффективность принятой концепции.

Производители судового оборудования могут использовать разработанную платформу применительно к тем видам оборудования, для которых специализированные системы диагностики ранее не выпускались в силу экономической нецелесообразности. Данная платформа поможет эксплуатационникам использовать единую систему для управления разных видов оборудования, оперативно получая при этом квалифицированные диагностические консультации от производителей.

Настоящее исследование выполнено с целью повысить точность анализа данных и обеспечить более надежную и экономичную работу оборудования с использованием результатов диагностики. Дальнейшей целью является создание платформы, применимой к оборудованию не только машинных отделений, но и судна в целом — задача значительно более масштабная, нежели демонстрация разнообразных диагностических возможностей.

**1. Введение**

Для решения проблем автоматической диагностики различных видов оборудования, размещенного в машинном отделении судна, была разработана система CMAXS LC-A с соответствующей функциональностью, успешно прошедшая проверку в реальных условиях эксплуатации.

Система CMAXS LC-A имеет функциональный блок анализа неисправностей (аномалий) и диагностики технического состояния (ТС).

В CMAXS LC-A используются численные показатели (индексы) ТС устройств, функций и деталей, причем не только главного двигателя, но и других видов судового оборудования.

CMAXS LC-A имеет встроенный алгоритм анализа неисправностей с самообучением по результатам поиска неисправностей и диагностики ТС.

Кроме того, по результатам диагностики CMAXS LC-A может автоматически планировать ремонтно-профилактические работы.

**2. CMAXS LC-A**

На рис. 1 приведена блок-схема и алгоритм диагностики оборудования системой CMAXS LC-A. Показано, что CMAXS LC-A не только дает численную оценку выявленной аномалии и ставит диагноз, но и оперативно выводит на экран соответствующие инструкции по проверке и ремонту.

Символ о на рис. 1 обозначает блок из алгоритма, параметра и контента по каждому процессу. Отдельные компоненты системы разработаны на основании прошлого опыта и инженерных принципов. Однако все реальные физические явления предусмотреть невозможно, поэтому специалисты выполнили углубленный и расширенный анализ на основании вновь полученного опыта и инфор-

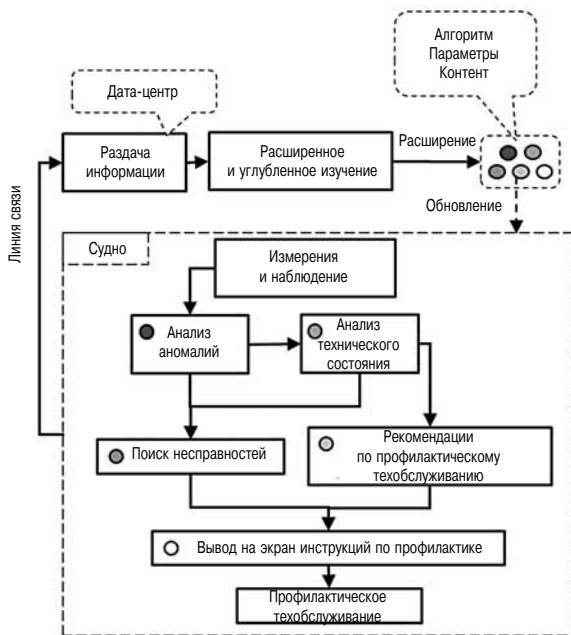


Рис. 1. Структурная схема CMAXS LC-A

мации, с целью создания более тонких алгоритмов и повышения точности параметров. Была также разработана карта желательных видов ремонта и обновления судовых систем. Это позволяет создавать новые механизмы по мере накопления опыта.

### 3. Анализ больших данных

#### Анализ больших данных применительно к задачам технической диагностики

Основная задача диагностики — профилактическое техобслуживание оборудования с целью минимизации рисков и отказов. Система получает информацию от чувствительных элементов, таких, как, например, датчики давления, температуры, вибрации, расхода, вязкости, и т. п. Объем этой информации очень велик, поэтому она носит название «больших данных». При этом информация об отказах (которая и является целью анализа) в число «больших данных» входить не может. К тому же отказ — это некое явление, причина которого на момент его возникновения неизвестна, в чем и состоит принципиальное отличие такого рода данных от данных, получаемых в результате измерений. Именно поэтому определять причины отказов непосредственно по результатам измерений довольно сложно.

Поскольку отказ оборудования является техническим феноменом, очень важно анализировать данные, руководствуясь инженерными принципами, основанными на технических характеристиках оборудования.

В CMAXS LC-A реализована концепция двухступенчатого анализа: «анализ аномалий» + «анализ ТС».

Первым шагом является анализ аномалий. Можно сказать, что анализ аномалий сводится к оценке величины расхождения между измеренной величиной и ее нормальным значением. Поскольку система использует данные измерений, она может применить метод статистического анализа непосредственно. Так как результат анализа аномалий впоследствии используется при анализе ТС, достоверность величины, рассчитанной на первом шаге, непосредственно влияет на точность окончательного диагноза.

#### Анализ аномалий

Для анализа аномалий чаще всего применяются следующие методы:

- метод, использующий определение заданного порогового значения;
- метод, использующий определение отклонений;
- метод, использующий математическую модель;
- метод, использующий сравнение записей данных с данными, которые характерны для нормального состояния;
- метод статистических процедур, основанный на предполагаемом характере распределения;
- метод, использующий корреляцию между величинами.

В CMAXS LC-A используются все перечисленные выше методы, причем в каждом случае выбирается метод, наиболее подходящий для выполнения текущей задачи анализа.

В CMAXS LC-A применена программа IBM Anomaly Analyzer for Correlational Data (ANACONDA), которая представляет собой алгоритм обучения для распределенной структуры, основанный на корреляции. Данный алгоритм устойчив к изменениям и возмущениям, так как базируется на функциональных соотношениях между измеряемыми величинами, и может анализировать аномалии даже при наличии сильных возмущений (погодные условия и состояние моря), непосредственно влияющих на работу главного судового двигателя.

Кроме того, используются методы анализа, основанные на инженерных соображениях, как, например, корреляция между измеряемыми величинами, анализ отклонения с учетом разброса и анализ тренда волнения. Все это позволяет выбрать тот алгоритм, который лучше других подходит для целей измерений и для целей диагностики.

#### Анализ технического состояния

На втором шаге рассчитываются величины, характеризующие техническое состояние оборудования. Как отмечено выше, очень важно анализировать данные, руководствуясь инженерными принципами, причем анализ должен вы-

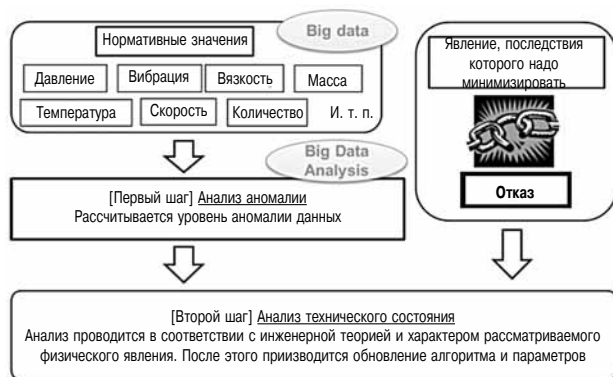


Рис. 2. Последовательность анализа аномалий и ТС

полняться в соответствии с алгоритмом, учитывающим конструкцию данного вида оборудования и его параметры, на основании имеющегося опыта и результатов измерений.

СМАХS LC-A может автоматически проводить анализ ТС по результатам каждого измерения и численного показателя (индекса) аномалии, рассчитанного путем анализа аномалии (см. рис. 2). В СМАХS LC-A «индекс ТС» рассчитывается для данного ТС. Индекс ТС — это безразмерная величина, которая представляет собой количественное выражение ТС устройства, детали или функции. Эта величина настроена так, чтобы в «параметрах» заданный уровень предупредительного сигнала был на отметке «пять», а уровень аварийного сигнала — на отметке «семь».

На рис. 3 показан пример диагностирования прорыва газов через выпускной клапан. Чтобы описать этот случай, был применен диагностический алгоритм для определения причины произошедшего перед этим события. Как видно на рис. 3, индекс ТС начинает расти за три дня до того, как механики заметят неисправность и заменят выпускной клапан, тогда как ТС продолжает ухудшаться до аварийного уровня, что

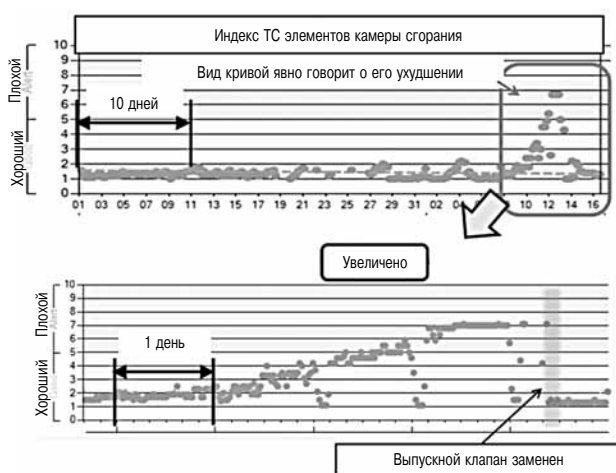


Рис. 3. Индекс ТС элементов камеры сгорания

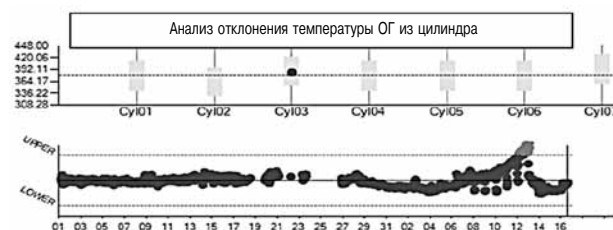


Рис. 4. Анализ температуры отработавших газов на выходе из цилиндра



Рис. 5. Анализ температуры в подпоршневом пространстве цилиндра

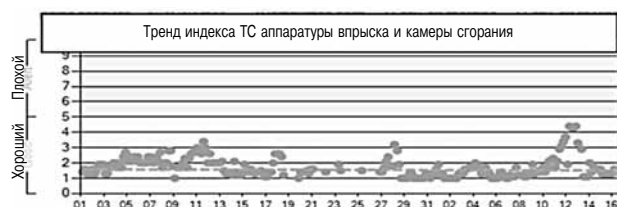


Рис. 6. Индекс состояния системы впрыска и рабочего процесса

механики подтверждают через полтора дня. Как видно из данного примера, система позволяет четко уловить тенденцию ухудшения ТС, поскольку непрерывно ведет расчет индекса ТС, представленный в виде графической функции времени.

В данном случае, с целью обнаружения неисправности и оценки ее причины был использован специальный метод для анализа отклонения температуры отработавших газов на рис. 4, и температуры в подпоршневом пространстве — на рис. 5.

Результаты анализа температуры отработавших газов свидетельствуют о явно аномальном уровне этого параметра, однако анализ температуры в подпоршневом пространстве показывает распределение на нормальном уровне. Это означает, что, хотя температура отработавших газов превышает допустимую, условия впрыска топлива и рабочего процесса остаются на нормальном уровне. Далее, СМАХS LC-A показывает худший индекс состояния элементов камеры сгорания по сравнению с индексом состояния системы впрыска и рабочего процесса (рис. 6).

Заранее формируется список целевых показателей диагностики состояния с учетом харак-

теристик объектов диагностирования и полученных данных, после чего выполняется автоматическая диагностика с применением алгоритмов и параметров, соответствующих каждому из объектов диагностирования. По мере накопления практического опыта и результатов исследований происходит непрерывное расширение списка объектов диагностирования и совершенствование алгоритмов диагностирования.

#### Поиск и устранение неисправностей

Для своевременного обнаружения ухудшения ТС в CMAXS LC-A включена функция поиска и устранения неисправностей (рис. 7). На основании информации, получаемой от системы аварийно-предупредительной сигнализации, результатов анализа аномалий и диагностики ТС, эта функция автоматически генерирует список элементов и деталей, считающихся наиболее вероятной причиной отказа. Кроме того, по каждому объекту автоматически формируется инструкция для дальнейших действий персонала. Для каждого из элементов, в которых возможен отказ, такие инструкции автоматически собираются и выводятся на экран, что облегчает поиск и устранение неисправностей.

Это особенно актуально для двигателей с электронными системами управления, где из-за большого числа соединений поиск нужной клеммы занимает много времени. При этом также существенно сокращается время на восстановление, поскольку в инструкции автоматически выводятся координаты нужной клеммы.

Одним из основополагающих принципов CMAXS LC-A является саморазвитие. Это значит, что обеспечена возможность расширения всех алгоритмов, причем алгоритм поиска и устранения неисправностей должен отличаться особо высокой надежностью, что достигается использованием концепции нейронной сети.

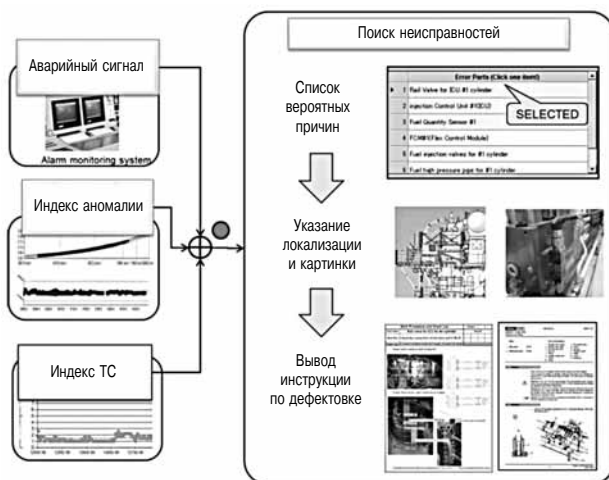


Рис. 7. Поиск и устранение неисправностей в CMAXS LC-A

#### Функция профилактики

В состав CMAXS LC-A включена функция профилактического техобслуживания (рис. 8). Если составлен график профилактического техобслуживания, на экран выводятся карта необходимых проверок, перечень запчастей и другая информация.

Кроме того, расписание профилактического техобслуживания и фактические результаты выводятся на экран. Информация организована так, что разобраться в ней достаточно просто.

Информация по управлению техобслуживанием важна также для диагностических целей. Хотя технология анализа больших данных непрерывно развивается, количество установленных датчиков ограничено, следовательно, ограничено и то количество физических процессов, о которых можно судить по информации общего характера (давление, температура и т. п.). Поэтому для диагностики ТС особую важность приобретают такие параметры, как например, величина износа, которые измеряются при осмотре и техобслуживании. Данные измерений импортируются через CMAXS LC-A и обрабатываются как элементы диагностического алгоритма.

Далее, определяется рекомендуемый график техобслуживания, который может оперативно обновляться по результатам диагностики, с учетом развития диагностических методов и нормативной базы.

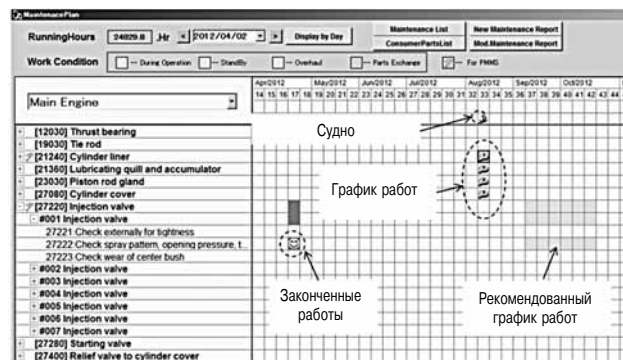


Рис. 8. Планировщик техобслуживания в CMAXS LC-A

#### 4. Реальный пример диагностики ТС

Мы обладаем более чем пятилетним опытом работ в области создания средств диагностики, который лег в основу CMAXS LC-A. Здесь хотели бы привести несколько примеров диагностирования и показать, как шло совершенствование систем.

##### Анализ аномалий

Рассмотрим применение системы диагностики на примере двухтактного главного судового двигателя большой мощности. Двигатель оборудован двумя турбокомпрессорами с байпасом отрабо-

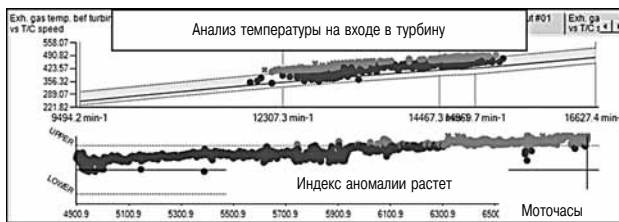


Рис. 9. Анализ температуры отработавших газов на входе ТК

тавших газов, который служит для более эффективной рекуперации тепла. На стадии анализа аномалий наблюдается значительное превышение допустимых значений температуры газов на входе и на выходе турбокомпрессора. На рис. 9 показан пример анализа аномалий, основанного на соотношении между частотой вращения ротора турбокомпрессора и температурой газов на входе в турбокомпрессор, приведенной к условиям ISO. Вид нижней кривой явно указывает на усиление аномалии со временем.

На рис. 10 показана картина развития аномалии по входной температуре газов, рассчитанная с помощью алгоритма самообучения IBM ANACONDA. Наблюдается усиление аномалии со временем, как и на рис. 9. После выполнения работ по техобслуживанию и ремонту (время работ обозначено жирной линией) уровень аномалии снизился.

Хотя уровень аномалии по температуре отработавших газов на входе ТК существенно возрос, анализ отклонения температуры отработавших газов на выходе из цилиндра показывает, что эта величина остается в пределах нормы (рис. 11). Хотя данные на рис. 11 относятся только к первому цилиндру, для остальных цилиндров результаты аналогичны. Это позволяет предположить отсутствие отказа, способного повлиять на температуры газов по всем цилиндрам, поскольку данный анализ аномалий диагностирует также изменения корреляции между цилиндрами.

Метод анализа отклонений, применяемый в CMAXS LC-A (см. выше), позволяет учесть разбросы между отдельными цилиндрами в зави-

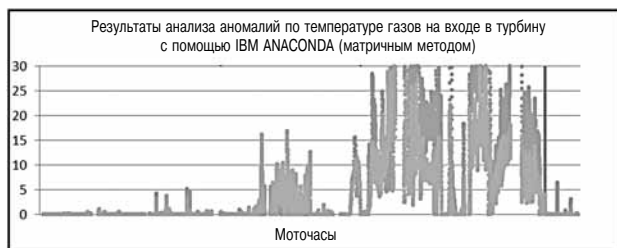


Рис. 10. Анализ температуры отработавших газов на входе ТК

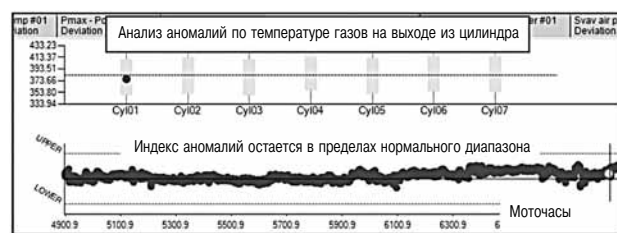


Рис. 11. Анализ температуры отработавших газов на выходе из цилиндра

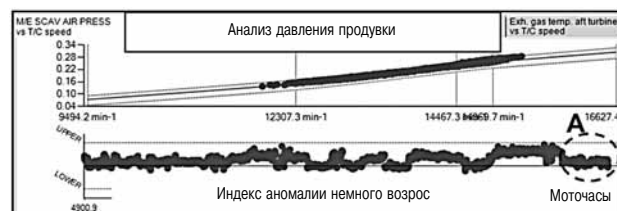


Рис. 12. Анализ давления продувки

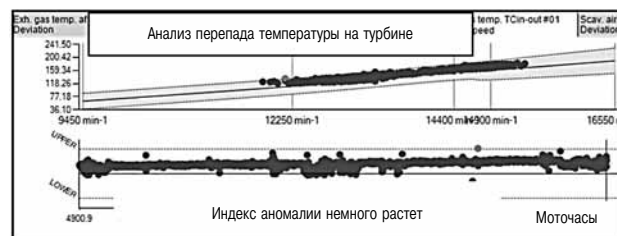


Рис. 13. Анализ перепада температур отработавших газов на турбокомпрессоре

симости от схемы их расположения и повысить точность анализа аномалий. Это видно, например, из рис. 11, где распределение температуры по отдельным цилиндрам не одинаковы.

На рис. 12 показан результат анализа аномалий на основе корреляции между частотой вращения ротора турбокомпрессора и давлением продувки. Хотя уровень аномалии несколько возрастает, этот рост незначителен по сравнению с динамикой аномалии по температуре отработавших газов. В зоне «А» уровень аномалии снижается из-за открытия (вручную) байпаса отработавших газов.

На рис. 13 показан результат анализа аномалий на основе корреляции между перепадом температур отработавших газов на турбине и частотой вращения турбокомпрессора. Данная величина определяет тепловой перепад на турбине и является косвенным показателем ее КПД. Как видно, уровень аномалии вырос незначительно, следовательно, можно предположить, что КПД турбины не снизился.

#### Анализ технического состояния

Этот результат анализа ТС выполнен с помощью алгоритма технической диагностики CMAXS LC-A. Он свидетельствует об ухудшении ТС системы турбонаддува (рис. 14).

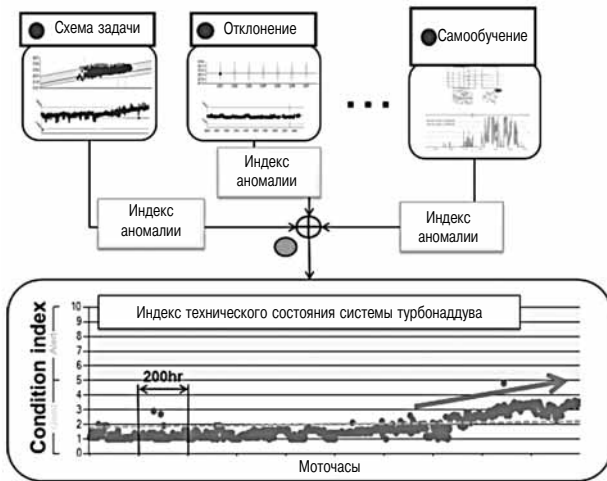


Рис. 14. Анализ ТС системы турбонаддува

#### Углубленный и расширенный инженерный анализ

Чтобы усовершенствовать алгоритм самодиагностики, поскольку в результате данного анализ причина ухудшения ТС не была устранена, инженеры выполнили более детальный анализ.

Рост температуры отработавших газов может быть вызван различными причинами, обычно это: увеличение энергии на входе из-за роста расхода топлива; недостаток воздуха для сгорания; изменение теплового баланса.

На рис. 15 приведено сравнение характеристик развиваемой главным двигателем мощности от заданного сигнала топливopодачи (аналог циклового впрыска топлива), из которого можно понять, изменился ли расход топлива. Фактически расход топлива изменился незначительно, и стало ясно, что не это было причиной роста температуры отработавших газов. Также было рассмотрено влияние низшей теплотворной способности топлива.

Далее, как показано на рис. 16, было исследовано соответствие расхода воздуха, расчи-

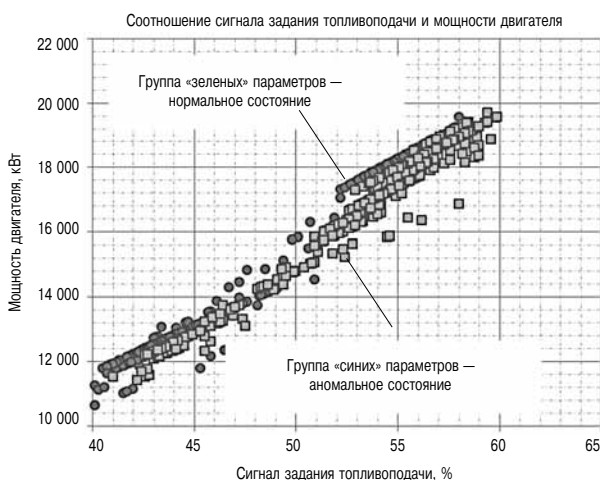


Рис. 15. Анализ расхода топлива

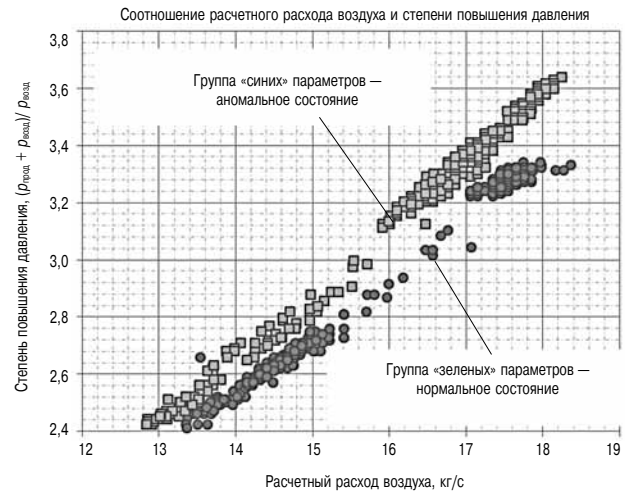


Рис. 16. Соотношение расхода воздуха и степени повышения давления



Рис. 17. Грязевые отложения на сопловых лопатках

танного по известным характеристикам турбокомпрессора и степени повышения давления. Здесь разница оказалась значительной. Соотношение между расходом воздуха и давлением продувки в аномальных условиях значительно выше нормы, что свидетельствует о возможном загрязнении газозоудного тракта на стороне выпуска.

Поскольку противодействие за турбокомпрессором не превышает нормы, стало ясно, что повышение давления вызвано загрязнением газозоудного тракта турбины.

Механики проверили состояние защитной решетки в газозоудном коллекторе перед турбокомпрессором и сам турбокомпрессор. Было обнаружено сильное загрязнение периферической части соплового аппарата (рис. 17).

После очистки и промывки соплового аппарата нормальные параметры работы двигателя были восстановлены.

#### Верификация алгоритмов

В результате диагностики CMAXS LC-A было зафиксировано ухудшение ТС системы турбонад-

дува, но фактическое состояние системы оказалось еще хуже, чем уровень индекса ТС, рассчитанный CMAXS LC-A. Для выяснения причины такого расхождения потребовался инженерный анализ, проведенный специалистами.

Это был первый в практике применения CMAXS LC-A случай, когда была получена подробная информация о загрязнении соплового аппарата. В результате углубленного анализа выяснилось, что диагностический алгоритм нуждается в совершенствовании, как и список параметров для диагностики.

После этого было решено разделить объект диагностирования (турбокомпрессор) на две категории — сторона турбины и сторона компрессора.

Как показано на рис. 18, результаты диагностирования условий на стороне турбины и на стороне компрессора отражают данное событие после доработки алгоритма. Результаты диагностирования можно сформулировать следующим образом.

➤ Очевидно, что причина отказа находится на стороне турбины.

➤ Можно четко установить момент, с которого началось развитие данной аномалии.

➤ Расчетный показатель ТС соответствует фактическому состоянию тракта на стороне турбины.

В результате были обновлены параметры и структура алгоритма поиска и устранения неисправностей, а также обновлена инструкция по обследованию объекта при подозрении на аналогичный отказ.

Как показано на этом примере, при возникновении каждого нового события все алгоритмы, параметры и весь контент подлежат обновлению для всех аналогичных судов, что необходимо для поддержания функциональности диагностического алгоритма.

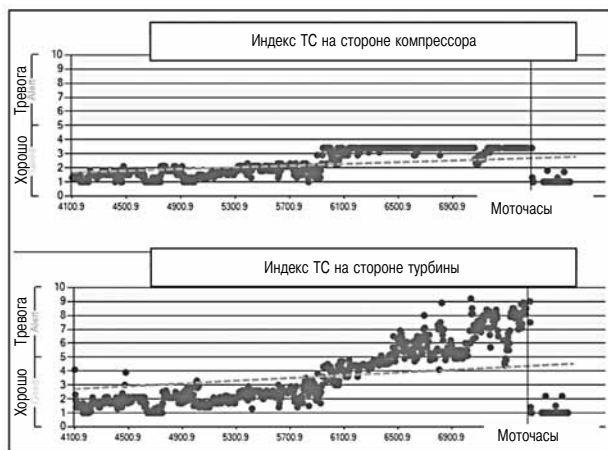


Рис. 18. Анализ ТС системы турбонаддува

Следует также отметить, что, несмотря на выполненную незадолго до этого сухую очистку газового тракта турбины в полном объеме, было обнаружено загрязнение периферийной части соплового аппарата, причем лопатки были загрязнены не по всей ширине, а лишь наполовину. Это может свидетельствовать о недостаточной эффективности сухой очистки, поэтому во избежание рецидивов рекомендовано увеличить число циклов очистки с одного до четырех.

## 5. Недостающие датчики

Несмотря на совершенствование алгоритмов с учетом физики рассматриваемых явлений, область диагностики и достоверность результатов все еще ограничены количеством и качеством датчиков. Точность результатов может быть повышена за счет увеличения количества датчиков и/или создания новых специальных датчиков.

В качестве примера приведем алгоритм обнаружения задира поршневого кольца главного двигателя. Это стало возможным на самой ранней стадии развития дефекта благодаря установке нескольких весьма полезных датчиков, и позволило сделать ряд важных выводов.

В цилиндре, о котором идет речь, по периферии верхней части цилиндровой втулки были установлены четыре датчика температуры и TF-детектор (рис. 19). TF-детектор непрерывно измеряет содержание металлического порошка в масле, сливаемом из цилиндра. Использование TF-детектора обеспечивает непрерывный контроль ТС пары трения «поршневое кольцо—втулка цилиндра», определяемого по содержанию металла в масле.

Как видно из рис. 20, внезапно выросло содержание металлического порошка в сливаемом

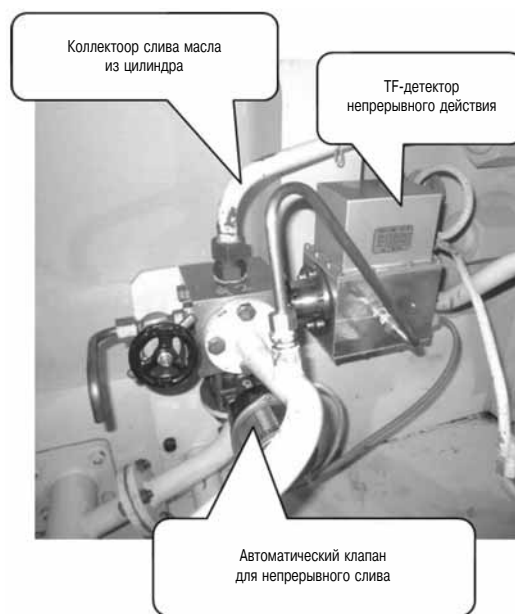


Рис.19. Онлайн TF-детектор

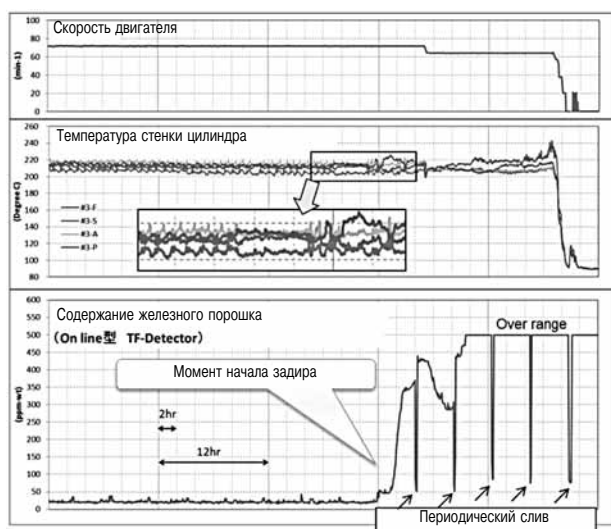


Рис. 20. Задиры поршневого кольца — запись процесса

из цилиндра масле, что свидетельствует о задирах поршневых колец.

Температурная кривая стенки гильзы цилиндра содержит остrokонечные всплески. Они соответствуют моментам прохождения зоны датчика замком поршневого кольца. Малая амплитуда скачка температуры объясняется тем, что в двигателе использованы кольца с газоплотным замком. Из графика можно заключить, что замок поршневого кольца последовательно проходит мимо четырех датчиков температуры, и что кольцо вращается. Цикл поворота составляет 40~45 минут. Судя по наблюдениям, этот период стал короче обычного. Скорее всего, это означает, что уплотняющие свойства кольца по каким-то причинам снижаются. Одна из возможных причин состоит в уменьшении газоплотности при прохождении к области формирующегося задира. Однако этот факт впервые был обнаружен более чем за год до инцидента, следовательно, для предсказания появления задира этого недостаточно.

При этом если посмотреть на содержание металлического порошка в сливаемом масле, то этот параметр, находившийся на уровне порядка 25 ppm, внезапно подскочил выше 500 ppm, что даже превосходит рабочий диапазон датчика. В данном случае масло для анализа забирается непосредственно из нижней части цилиндра, поэтому можно предположить, что задиры случились минут за десять до резкого скачка содержания железа в масле. Температура втулки начала расти только через 20 часов после

этого события. Однако рост температуры был небольшим, и неясно, был ли он следствием задира.

Приведенный пример показывает, что с помощью разного рода специальных датчиков можно собирать информацию, позволяющую глубже понять суть явления и обеспечить возможность автоматической диагностики. Увеличение количества точек измерения очень важно для анализа данных, кроме того, оно позволит достичь точности измерений, необходимой для анализа аномалий и диагностики ТС с учетом развития новейших технологий математического анализа. Поэтому нам представляется, что спросом в дальнейшем будут пользоваться не столько сверхточные датчики, сколько датчики, достаточно дешевые, надежные и удобные для монтажа.

## 6. CMAXS LC-A как платформа

Данная система с самого начала создавалась как комплексная система диагностики и планирования техобслуживания всего судового оборудования. Начав с разработки алгоритма, основанного на ноу-хау в части главных судовых двигателей большой мощности, впоследствии были проведены на практике проверка эффективности системы, точность диагностики и ее жизнеспособность для поддержки пользователей. После главного судового двигателя алгоритмы диагностики адаптированы к дизель-генераторам, силовой турбине и к опорам гребного вала.

Убедившись в возможности и целесообразности применения настоящей системы не только к главному двигателю, но и к другим видам судового оборудования, совместно с производителями разных видов судового оборудования были разработаны и реализованы планы поддержки пользователей.

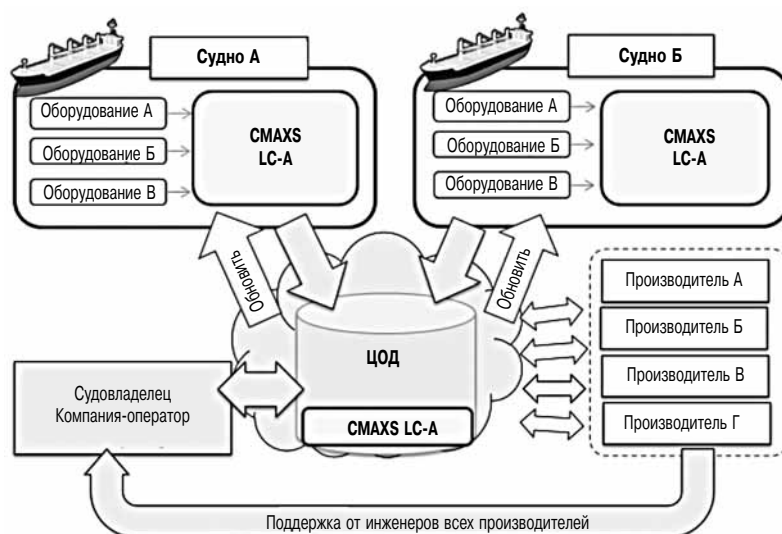


Рис. 21. Блок-схема CMAXS LC-A

Блок-схема системы, изображенная на рис. 21, показывает, что центр обработки данных (ЦОД) используется в качестве платформы, а судовая команда, судовладелец, компания-оператор и производители другого судового оборудования через CMAXS LC-A получают доступ к современной системе диагностики и ко всей необходимой им информации. Таким образом, CMAXS LC-A способствует внедрению современных технологий диагностики и совершенствованию судового оборудования, размещенного в машинном отделении.

Управление ЦОД осуществляется нейтральным оператором — судовым дата-центром, учредителем которого является третья сторона — классификационное общество ClassNK. Партнеры, вновь присоединившиеся к сообществу, также получают доступ к CMAXS LC-A. Таким образом, CMAXS LC-A используется в качестве общей платформы для всех сегодняшних и будущих участников.

#### **7. Заключение**

CMAXS LC-A — это система, рожденная совместными усилиями сторон, которые ощутили потребность в современных технологиях анализа аномалий и диагностики ТС главных судовых двигателей. Главный судовой двигатель является сложным объектом для автоматической диагно-

стики, поэтому поставленная задача потребовала больших усилий для того, чтобы сделать программу достаточно универсальной, основываясь на инженерных принципах. Результатом стала система, охватывающая, помимо главного двигателя, и другие виды судового оборудования. Для всеобъемлющей поддержки судовой силовой установки в сотрудничестве со всеми заинтересованными сторонами используются облачные технологии хранения данных и организованы необходимые коммуникации между изготовителями оборудования и наземными службами.

Используя этот механизм, планируется дальнейшее совершенствование систем диагностики для создания надежной базы оперативного планирования профилактики и своевременного обновления рабочих инструкций по мере модернизации оборудования и программного обеспечения.

---

#### **Литература**

1. *Tsuyoshi Ide*, Pro Vision, Vol. 78, № Summer 2013. — P. 28–33.
2. *Tsuyoshi Ide*, Masashi Sugiyama, «Anomaly Detection and Change Detection» 2015. — P. 127–143.

**3 марта 2019 года г. на 72-м году скоропостижно скончался  
профессор кафедры ДВС и автоматики СЭУ  
ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова  
член редакционной коллегии  
журнала «Двигателестроение»**

## **Александр Семенович Пунда**



Морская академия, факультет судовой энергетики, кафедра двигателей внутреннего сгорания и автоматики судовых энергетических установок понесли тяжелую и невосполнимую утрату. Скончался профессор, декан судомеханического факультета Морской академии ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. Он был одним из тех, чьим трудом создавалось признание профессионализма выпускников университета в России и за рубежом. Александр Семенович был безгранично предан своей профессии, отличался принципиальностью, требовательностью и доброжелательностью.

Александр Семенович поступил на судомеханический факультет ЛВИМУ им. адм. С.О. Макарова в 1965 году. После окончания училища обучался в аспирантуре. Вся его трудовая деятельность была связана с кафедрой ДВС и АСЭУ судомеханического факультета: с 1973 г. он инженер, с 1975 г. — ассистент кафедры, после защиты кандидатской диссертации в 1980 г. — доцент кафедры и с 1998 г. профессор кафедры.

Исключительно плодотворной была его деятельность на посту декана судомеханического факультета с 1989 по 2009 г. Его непосредственным и важным участием было обеспечено признание международным морским сообществом дипломов судовых механиков, подготовленных в России. Александр Семенович совместно с коллегами-судоводителями создавал действующую в настоящее время систему подготовки специалистов морского флота, которая признана ИМО и соответствует ее требованиям.

За последние 45 лет все будущие судовые механики прошли через школу Александра Семеновича. Он не только преподавал им важнейшую основополагающую дисциплину СДВС, но и воспитывал в них инженеров, не жалея ни сил, ни времени. За годы преподавательской деятельности он подготовил тысячи морских специалистов.

Александру Семеновичу были присвоены звания почетного работника транспорта России, почетного работника морского флота.

Ушел из жизни профессионал, знаковый преподаватель факультета Морской академии и просто хороший человек, которого нам всем будет очень не хватать.

*Коллектив факультета судовой энергетики, кафедра двигателей внутреннего сгорания  
и автоматики судовых энергетических установок,  
редакция журнала «Двигателестроение»  
выражают глубокое соболезнование родным и близким Александра Семеновича*

УДК 621.431

**Столяров С.П. Системные проблемы Российского дизелестроения (взгляд из морского технического университета) // Двигателестроение. — 2019. — № 1. — С. 3–8.**

**Ключевые слова:** судовая энергетическая установка, дизели, импортозамещение, проектирование, статус главного конструктора, долгосрочное планирование, экспертиза проектов, подготовка инженерных кадров.

Рассматриваются системные проблемы Российского судового дизелестроения, ставшие причиной стагнации отрасли. Предлагается ввести жесткий контроль реализации программ импортозамещения, ограничить типаж дизелей, применяемых на флоте; обеспечить дизелестроительные заводы заказами в объеме, достаточном для устойчивого развития; повысить статус главных конструкторов на ведущих дизелестроительных заводах; обеспечить экспертный контроль за выполнением программ, финансируемых государством; реформировать систему подготовки инженерных кадров в области энергетического машиностроения.

УДК 621.43

**Мягков Л.Л., Сивачев В.М. Математическое моделирование сопряженного теплообмена в системе охлаждения среднеоборотного дизеля // Двигателестроение. — 2019. — № 1. — С. 9–13.**

**Ключевые слова:** среднеоборотный дизель, теплонпряженность, система охлаждения, режим пузырькового кипения, численное моделирование, вычислительная гидродинамика, снижение температуры деталей ЦПГ.

Рост теплонпряженности крышек и втулок цилиндров при форсировании среднеоборотных дизелей может стать причиной образования термоусталостных трещин в деталях камеры сгорания. Результаты математического моделирования сопряженного теплообмена в системе охлаждения среднеоборотного дизеля Д500 показали, что нормализация теплового состояния деталей камеры сгорания может быть достигнута интенсификацией теплообмена в полостях охлаждения за счет организации режима пузырькового кипения охлаждающей жидкости. Табл. 2. Ил. 5. Библ. 19 назв.

УДК 621.43

**Милаев С.Б. Оптимизация фазовых показателей сгорания в дизельных и газовых двигателях для снижения выбросов оксидов азота // Двигателестроение. — 2019. — № 1. — С. 14–19.**

**Ключевые слова:** дизели, газовые двигатели, фаза сгорания топлива, скорость тепловыделения, скорость отвода тепла, снижение выбросов оксидов азота.

Предложен метод снижения максимальных температур цикла за счет более позднего впрыска топлива, при совмещении фазы максимальной скорости сгорания топлива с фазой достижения максимальной скорости отвода тепла в стенки цилиндра. Экспериментально показана возможность снижения выбросов  $\text{NO}_x$  на 40–60 % при заданном значении расхода топлива. Метод нашел применение на среднеоборотных двигателях внедорожного класса типа Д49 и Д500 при работе на дизельном и газовом топливах. Ил. 9. Библ. 4 назв.

УДК 621.78

**Иванов Д.А., Зюкин В.С., Колосков А.А. Снятие остаточных напряжений в деталях авиадвигателей газоимпульсной обработкой // Двигателестроение. — 2019. — № 1. — С. 20–23.**

**Ключевые слова:** авиационные двигатели, тонкостенные детали, восстановительный ремонт, остаточные напряжения, газоимпульсная обработка.

В процессе восстановительного ремонта деталей авиадвигателей широко используются наплавка и приваривание вставок малой толщины аргонодуговой сваркой. Представлены результаты исследования, показывающие, что воздействие пульсаций воздушного потока без применения нагрева позволяет эффективно управлять остаточными напряжениями металлических элементов конструкций, в том числе устранить нежелательные растягивающие напряжения на поверхности тонкостенных металлических деталей, что уменьшает риск образования трещин в процессе их эксплуатации. Ил. 4. Библ. 10 назв.

УДК 621.43.057

**Плютников С.А., Смольников М.В., Шишкин Г.П. Расчет стабильности этанола-топливной эмульсии для применения в дизелях // Двигателестроение. — 2019. — № 1. — С. 24–27.**

**Ключевые слова:** дизельное топливо, этанола-топливная эмульсия, стабильность эмульсии, максимальный размер капель.

С использованием теории движения дисперсных капель в несущей среде получено аналитическое выражение для расчета стабильности этанола-топливной эмульсии (ЭТЭ) различного дисперсного состава. Расчетным методом определен максимальный размер капель водного раствора этанола ( $d = 0,058$  мм) в ЭТЭ, стабильность которой до коалесценции составляет не менее 60 мин. Результаты аналитического расчета подтверждены экспериментальными данными. На основании результатов проведенных исследований разработан метод расчета оптимального состава смесового топлива на основе ДТ и этанола с улучшенными эксплуатационными свойствами. Ил. 3. Библ. 12 назв.

УДК 332.82.42

**Прутичков И.О., Михайлов В.И., Камлюк В.В. Модули энергетической безопасности автономных объектов на базе комбинированных энергоустановок // Двигателестроение. — 2019. — № 1. — С. 28–32.**

**Ключевые слова:** энергетическая безопасность, автономные объекты, комбинированные энергоустановки, статические преобразователи электроэнергии, когенерация, аккумулялирование, автоматическое управление.

Рассматриваются вопросы обеспечения энергетической безопасности автономных объектов за счет применения мобильных модулей контейнерного исполнения, включающих комбинированные энергоустановки с двигателем-генераторами, аккумуляторами, солнечными батареями и статическими преобразователями энергии. Разработан действующий образец автоматизированного модуля на базе ДГУ мощностью 16 кВт, оборудованный системой автоматизированного дистанционного управления источниками, преобразователями и накопителями энергии с использованием отечественной элементной базы. Табл. 1. Ил. 3. Библ. 7 назв.

УДК 355.673:621.182/621.18

**Бондарев А.В. Экспериментальные исследования переходных процессов в котлах высокотемпературного кипящего слоя с рециркуляцией уходящих газов // Двигателестроение. — 2019. — № 1. — С. 33–37.**

**Ключевые слова:** котел высокотемпературного кипящего слоя, рециркуляция уходящих газов, твердое топливо, каменный уголь, фрезерный торф, переходные процессы.

Приведены результаты экспериментальных исследований переходных процессов котла с топкой высокотемпературного кипящего слоя и рециркуляцией уходящих газов. Переходные процессы реализованы за счет возмущающих воздействий изменения нагрузки (расхода топлива) в диапазоне 80–100 %. Показано, что динамические параметры котла при работе на различных твердых топливах с рециркуляцией уходящих газов значительно лучше, чем при отсутствии рециркуляции. Сравнение характеристик переходных процессов, полученных экспериментально и расчетным методом, показало удовлетворительную сходимость. Ил. 14. Библ. 5 назв.

УДК 621.43

**Системы автоматизации и диагностирования дизелей и газовых двигателей (материалы конгресса СИМАС-2016) // Двигателестроение. — 2019. — № 1. — С. 39–56.**

**Ключевые слова:** «умный двигатель», автоматическое управление, диагностика, устранение неисправностей, универсальная диагностическая платформа, открытое программное обеспечение, облачное хранение данных.

Развитие АТ-технологий открыли возможности для создания «умного двигателя», адаптированного к изменению внешних условий за счет применения систем электронного управления и контроля. Компанией «AVAT Automation GmbH» (Германия) в сотрудничестве с «Bachmann Electronic GmbH» разработана универсальная диагностическая платформа с открытым программным обеспечением OpenECS на базе промышленных контроллеров PLC, адаптированная к газовым двигателям. Компания «Diesel United Ltd» (Япония) на основе анализа больших массивов данных «Big Data Analysis» разработала диагностическую платформу универсального характера CMAXS LC-A для обнаружения и устранения неисправностей главных судовых двигателей, а также других видов судового оборудования, размещенного в машинном отделении. Для обеспечения надежности и поддержки оборудования используются облачные технологии хранения данных с организационной коммуникации между судном, изготовителями оборудования и наземными службами. Ил. 5. Библ. 2 назв.

UDC 621.431

**Stolyarov S.P. Core problems of engine building in this country (as seen from the Marine Technical University) // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 1. — P. 3–8.**

**Keywords:** marine power plant, diesel engine, import replacement, designing, design manager's status, long-term scheduling, design reviewing, home-made parts, manpower development, upgrading of educational standards.

The article discusses the system problems engine building in Russia that account for stagnation of the above industry. In the authors' view, the following measures are essential for the revival of engine building in Russia: to enforce tight control over implementation of import-substitution programs; to limit the scope of engine models certified for marine application; to provide engine builders with stock of orders sufficient for their sustainable development; to organize manufacturing of engine parts and units at dedicated facilities; to upgrade status of design managers at leading engine builders; to enforce effective expert supervision over implementation of state-financed programs; to reform the manpower development system in power engineering.

UDC 621.43

**Myagkov L.L. and Sivachev V.M. Mathematical modelling of combined heat/mass transfer in cooling system of a middle-speed diesel engine // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 1. — P. 9–13.**

**Keywords:** middle-speed diesel engine, thermal stresses, cooling system, nucleate boiling, numerical modelling, reducing temperature of combustion chamber components.

Increasing boost pressure in middle-speed diesel engines leads to higher thermal stresses in cylinder heads and liners, which, in turn, results in thermal fatigue crack in combustion chamber components, as well as scuffing of cylinder liner and piston surfaces. Alleviation of thermal conditions for combustion chamber components may be achieved through intensification of heat exchange in coolant cavities due to nucleate boiling of coolant. Mathematical simulation of heat- and mass-exchange in coolant cavities of type D500 engine shows that temperature of liquid in coolant cavities of cylinder heads and liners reaches saturation point. Surface boiling (nucleate boiling of the coolant) results in lower maximum temperatures of combustion chamber components. 5 tables, 5 ill., 19 ref.

UDC 621.43

**Milyaev S.B. Optimal phasing of fuel injection as a means to reduce NO<sub>x</sub> emissions from diesel and gas engines // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 1. — P. 14–19.**

**Keywords:** diesel engines, gas engines, fuel combustion phase, heat release rate, heat removal rate, reduction of NO<sub>x</sub> emissions.

Reducing NO<sub>x</sub> emissions from high-powered middle-speed diesel engines without compromising fuel economy is one of the prime challenges for engine designers. The authors offer later fuel injection as a method of reducing maximum cycle temperature, in such a way that time points of maximum combustion velocity and maximum rate of heat removal from gas to cylinder liner walls would coincide. Their experiments confirmed feasibility of reducing NO<sub>x</sub> emissions by 40–60 % without compromising fuel consumption. The method have been already implemented in middle-speed engines types D49 and D500 (both in diesel and gas engine versions) powering various off-road vehicles. 9 ill., 4 ref.

UDC 621.78

**Ivanov D.A., Zyukin V.S. and Koloskov A.A. Gas-impulsive treatment as a means of stress-relieving in aircraft engine parts // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 1. — P. 20–23.**

**Keywords:** aircraft engines, thin-walled parts, rebuilding, residual stress, non-stationary gas flow, gas-impulsive treatment, reliability improvement.

Such technologies as building-up welding and attaching thin insertions with argon arc welding are widely used for rebuilding of aircraft engine components. However, this method entails residual stresses, which cannot be relieved by heating a part in question without detrimental effect upon its metallic structure. As shown by this research, gas-impulsive treatment without heating is an effective means to control residual stress in metal parts. In particular, it enables removal of unwanted tension stresses on metal part surfaces, thus reducing the risk cracks formation. 4 ill., 10 ref.

UDC 621.43.057

**Plotnikov S.A., Smolnikov M.V., Shishkin G.P. Calculated stability of ethanol-fuel emulsion as combustible for diesel engine // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 1. — P. 24–27.**

**Keywords:** diesel fuel, ethanol-fuel emulsion, surfactants, stability of emulsion, maximum size of droplets, diesel bed tests.

Based on the theory of disperse droplets' movement, these authors derived mathematical expression for stability of ethanol-fuel emulsion (EFE). Furthermore, they calculated maximum size of droplets ( $d = 0,058$  mm) of water solution in EFE, whose minimum life before coalescence exceeds 60 min. The results of analysis are supported by experimental data. Based on the above analysis, a method was offered to define optimum composition of ethanol-based fuel mix with higher performance.

3 ill., 12 ref.

UDC 332.82.42

**Prutchnikov I.O., Mikhailov V.I. and Kamlyuk V.V. Uninterrupted power supply modules for stand-alone energy consumers based on hybrid power plants // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 1. — P. 28–32.**

**Keywords:** reliable power supply, stand-alone energy consumers, engine-generators, hybrid power plants, solid-state energy converters, cogeneration, accumulation, intellectual automatic control.

The article discusses issues of uninterrupted power supply for stand-alone energy consumers based on mobile modules containing hybrid power plants with engine-generators, accumulators, solar batteries and solid-state energy converters. A workable specimen of such module has been developed based on diesel-generator rated at 16 kW, equipped with automatic system for remote control of power sources, converters and energy storage devices. All the above equipment features Russian make components. 3 tables, 7 ref.

UDC 355.673:621.182/621.18

**Bondarev A.V. Experimental research on transients in boilers featuring high-temperature fluidized bed and off-gas recirculation // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 1. — P. 33–37.**

**Keywords:** power-generating boilers, high-temperature fluidized bed, off-gas recirculation, solid fuel, coal, milled peat, variable load, transients.

The results are presented of the research on transients in a boiler with high-temperature fluidized bed and off-gas recirculation. The transients have been initiated by controlled load (fuel flow) disturbances in the range of 80–100 %. The boiler was fired with milled coal (particle size 10–25 mm) and peat. It is shown that off-gas recirculation considerably improves transient characteristics of solid fuel boilers, including time to achieve steady state. The difference between experimental and calculated transient curves does not exceed 5%.

14 ill., 5 ref.

UDC 621.43

**Control & automation systems for diesel and gas engines (based on CIMAC-2016 papers) // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 1. — P. 39–56.**

**Keywords:** smart engine, automatic control, diagnostics, troubleshooting, universal diagnostics platform, open software, safe communication channels.

Recent advancement in IT-technologies and computer performance have been bringing us closer to the development of «smart engine», automatically adapted to operating conditions. Functions of Engine Control Systems (ECS) include online engine diagnostics, troubleshooting and online generating manuals on fault detection & rectification. «AVAT Automation GmbH» in cooperation with «Bachmann Electronic GmbH» developed universal diagnostic platform openECS based on various PLC (Programmable Logic Controllers) adapted to gas engines. The scope of the system functions includes online diagnostics of engine systems, prevention of detonation and misfires, and preventing the engine from exceeding critical limits. «Diesel United Ltd» (Japan) based on «Big Data Analysis» developed universal diagnostic platform CMAXS LC-A, which provides diagnostics, troubleshooting and fault rectification for marine main diesel engines and other equipment installed in a vessel. Cloud computing technologies are combined with the improvement of the communication environment between the ship and land through safe channels, which contribute into equipment reliability and timely support of operators. 5 ill., 2 ref.

## Вниманию авторов

Редакция обращает внимание авторов на тематическую направленность принимаемых к рассмотрению рукописей и необходимость выполнения требований по их оформлению.

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

Тематика публикаций определила следующие основные рубрики журнала:

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

Текст рукописи должен быть представлен в двух экземплярах на бумаге формата А4, гарнитура Times New Roman 12, через полтора интервала, с обязательным приложением электронной версии на CD (в формате Microsoft Word 2000/2003), полностью соответствующей оригиналу на бумаге. Формулы в электронной версии должны быть набраны с использованием редактора формул Microsoft Equation 3.0. За достоверность набора формул несет ответственность автор. При использовании в наборе специальных шрифтов последние прилагаются в электронном виде. Электронные копии иллюстраций представляются отдельными файлами в форматах: TIF, JPG (не менее 300 dpi, черно-белые полутоновые изображения).

Представляя рукопись статьи в редакцию, автор должен сообщить о ее предыдущих публикациях.

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

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

Для оперативного решения вопросов, связанных с подготовкой рукописи к публикации, а также для размещения электронной версии журнала в НЭБ должны быть представлены сведения об авторах:

- фамилия, имя, отчество (полностью);
- ученая степень и звание;
- полное наименование места работы;
- полный почтовый адрес;
- действующие контактные телефоны, e-mail).

Для представления авторов читателям желательно присылать цветные или черно-белые фотографии авторов размером не менее чем 3×4 см. Допускаются электронные копии в форматах TIF или JPG.

Обязательными приложениями к рукописи являются: реферат, в котором четко и сжато изложены основные цели и результаты работы объемом от 700 до 1200 знаков; код УДК; ключевые слова.

Заглавие статьи, название организаций, ФИО авторов, ключевые слова и реферат необходимо присылать на русском и английском языках.

Объем статьи не должен превышать 25 тыс. знаков, включая таблицы и список литературы. Иллюстрации в виде графиков, диаграмм, схем и фотографий оформляются в виде приложений к тексту рукописи. Все приложения к тексту рукописи представляются на отдельных листах, а в электронной копии — в виде отдельных файлов. Формулы, иллюстрации и таблицы должны быть пронумерованы в порядке упоминания и снабжены поясняющими (подрисовочными) подписями. Все обозначения на иллюстрациях должны быть объяснены (расшифрованы) в тексте или в подрисовочных подписях и соответствовать обозначениям в тексте.

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

В статьях желательно приводить только те математические формулы, которые необходимы для понимания существа вопроса, исключая их подробные выводы.

Все обозначения, встречающиеся в формулах, должны быть объяснены.

При написании формул необходимо использовать общепринятые обозначения физических величин по Международной системе единиц (ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин). Ссылки на цитируемые источники необходимо оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 05–2008.

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

Рукописи статей, поступившие в редакцию, рецензируются специалистами. Если у рецензента имеются обоснованные критические замечания, статья возвращается автору на доработку.

Редакция оставляет за собой право внесения в текст редакторских изменений, не искажающих смысла авторского текста. При поступлении в редакцию обоснованных критических замечаний, касающихся размещенного в журнале материала, редакция оставляет за собой право на их публикацию в порядке дискуссии.

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

Публикация в журнале учитывается ВАК в качестве печатного научного труда.

Рукописи, направленные в редакцию, авторам не возвращаются.

*Редакция журнала*