

РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ	ANALYSES, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF ENGINES
<i>Малозёмов А.А., Кукис В.С., Гимазетдинов Р.Р.</i> Разработка математической модели и программного обеспечения для имитационного моделирования поршневых ДВС	<i>Malozymov A.A., Kukis V.S. and Ghimazetdinov R.R.</i> 3 Mathematical model and software for reciprocating engine simulation
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	CONSTRUCTION MATERIALS
<i>Иванов Д.А., Зюкин В.С., Колосков А.А.</i> Изменение механических свойств элементов конструкции авиационной техники под действием нестационарных дозвуковых воздушных потоков	<i>Ivanov D.A., Zyukin V.S. and Koloskov A.A.</i> 10 Nonstationary subsonic air currents as a factor affecting mechanical properties of aircraft components
ТОПЛИВО. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	FUEL. LUBRICANTS
<i>Плотников С.А., Зубакин А.С.</i> Анализ процесса сгорания генераторного газа и его смеси с бензином в поршневом двигателе	<i>Plotnikov S.A. and Zubakin A.S.</i> 14 Combustion of generator gas and its mixture with gasoline in a reciprocating engine
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ	POWER PLANTS
<i>Смирнов А.В., Бондарев А.В., Александров С.В., Болбышев Э.В.</i> Разработка дизельных теплоэлектростанций с активными котлами утилизаторами высокотемпературного кипящего слоя	<i>Smirnov A.V., Bondarev A.V., Alexandrov S.V. and Bolbyshev E.V.</i> 19 Development of diesel power plants with active waste heat boilers featuring high-temperature fluidized bed
<i>Бондарев А.В., Болбышев Э.В., Смирнов А.В.</i> Автоматизация угольных котлов малой мощности с топками высокотемпературного кипящего слоя и рециркуляцией дымовых газов	<i>Bondarev A.V., Bolbyshev E.V. and Smirnov A.V.</i> 24 Automation of low-powered boilers featuring high-temperature fluidized bed and flue gas recirculation
ГИПОТЕЗЫ И ДИСКУССИИ	HYPOTHESES AND DISCUSSIONS
<i>Дунаев А.В., Пустовой И.Ф.</i> Механизмы образования триботехнических покрытий при использовании геомодификаторов трения	<i>Dunaev A.V. and Pustovoy I.F.</i> 29 Mechanism of formation of antifriction coating with geomodifiers
НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ	ENGINE BUILDING NEWS
Новые технологии в двигателестроении (материалы конгресса CIMAC-2016)	35 Modern technologies in engine building (based on CIMAC -2016 papers)
ИНФОРМАЦИЯ	INFORMATION
Рефераты статей	55 Synopsis

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

ПРЕДПРИЯТИЯ

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

НИИ

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

ВУЗЫ

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

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 (2005–2018 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» (www.elibrary.ru) и включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

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

Сдано в набор 03.09.2018
Подписано в печать 22.09.2018
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7
Зак. 33. Тираж 700 экз.
Цена договорная

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

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

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

**ДВИГАТЕЛЕ
СТРОЕНИЕ**

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

© Журнал «Двигателестроение». 2018. № 3 (273)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОРШНЕВЫХ ДВС

А.А. Малозёмов, д.т.н., доц., В.С. Кукис, д.т.н., проф., Р.Р. Гимазетдинов, инженер
Южно-Уральский государственный университет

В статье изложены результаты работ по созданию математической модели и программного обеспечения для имитационного моделирования поршневого двигателя внутреннего сгорания. Модель основана на методе энергетического и массового баланса, теории бондграфов и представляет собой библиотеку элементов, описывающих процессы в системах и механизмах двигателя. Созданная математическая модель и программное обеспечение обеспечивают высокую скорость, достоверность и точность расчета, что подтверждено экспериментальными данными и сравнением с зарубежными аналогами, возможность сопряженного расчета стационарных и транзитных мультидоменных процессов в различных системах и механизмах двигателя.

Эффективность процесса создания новых и модернизации существующих моделей поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС) во многом зависит от качества проводимых расчетов. Современные расчетные методики реализованы в виде программного обеспечения (ПО), которое позволяет инженеру, не вдаваясь в детали математического описания и численных методов решения, быстро и качественно формировать расчетные модели, вводить исходные данные, визуализировать и анализировать результаты расчета. В настоящее время для ускорения разработки и постановки на производство новых образцов ПДВС, все чаще дорогостоящие и трудоемкие натурные испытания заменяют расчетными экспериментами с использованием имитационных моделей [1], к которым могут быть отнесены коммерческие программы AVL Boost, Ricardo Wave, GT-Suite, LMS AMESim и т. д., а также некоммерческие разработки вузов — OpenWAM (Universitat Politècnica de València [2]), GASYDYN (Politecnico di Milano [3]), ALLBEA (УГАТУ [4]) и др. В настоящей статье приведены результаты разработки, целью которой являлось создание имитационной математической модели ПДВС и ее реализация в виде ПО для решения задач, возникающих при выполнении научно-иссле-

тельских и опытно-конструкторских работ в Южно-Уральском государственном университете.

ПДВС представляет собой сложную структурированную динамическую систему элементов, относящихся к различным областям физики и химии, связанных между собой как физическими, так и информационными связями. Учитывая особенности конструкции и режимов функционирования ПДВС, имитационная модель должна быть:

- мультидоменной, включающей математическое описание газо- и гидродинамических, термодинамических, механических и химических процессов в системах и механизмах двигателя;
- сопряженной, то есть процессы в системах и механизмах ПДВС должны считаться параллельно на каждом шаге модельного времени;
- транзитной, позволяющей определять параметры как дискретного, так и непрерывного состояния моделируемой системы в динамике.

В современных имитационных моделях ПДВС используются направленные связи между элементами, что обусловлено применением языков, реализующих императивную парадигму программирования. Такой подход не в полной мере отражает физическую сущность процессов, так как в реальном двигателе они происходят параллельно, а не последовательно и возникает необходимость применения обратных связей для моделирования воздействия элемента на себя. Поэтому в ходе разработки была использована императивная парадигма программирования, реализованная на языке Modelica [5] и нашедшая отражение в особенностях математического описания процессов. В модели используется подход, основанный на бондграфах [6], узлами которых являются элементы, а бондами — связи. Этот подход отражает процессы перераспределения энергии и массы в динамической системе, что соответствует специфике моделирования ДВС.

Математическая модель представляет собой библиотеку подмоделей (классов), описывающих процессы в отдельных элементах ПДВС. Она включает группы, систематизированные по физической сущности процессов: газовая динамика, гидродинамика, теплопередача, механика. Пара-

метризированным классам поставлены в соответствие графические изображения, из которых методом «drag and drop» (аналогично зарубежному ПО) составляется расчетная схема двигателя, что повышает удобство создания и наглядность имитационной модели. Каждая группа включает математическое описание различных видов граничных условий, базовых и комплексных элементов, которые могут соединяться между собой, при этом аказуальным соединениям соответствует система балансовых уравнений (на примере элементов газовой динамики):

$$\sum_1^p \left(\frac{dG_p}{dt} \right) = 0, \quad (1)$$

где G — масса газа; t — время; p — номер соединения (порта).

$$P_1 = P_2 = \dots = P_p, \quad (2)$$

где P — давление.

В данном примере массовый расход газа является потоковой переменной, а давление — потенциальной переменной. Дополнительно через порты передаются переменные состояния. Для классов газовой динамики ими являются температура, удельная энтальпия и вектор концентрации компонентов газа, который, в простейшем случае, имеет один элемент — массовую концентрацию продуктов сгорания. Для уравнений газовой динамики базовыми классами являются «объем» и «сопротивление», которые чередуются между собой (здесь и далее в кавычках приводятся названия классов). В классе «объем» на основе известных потоковых переменных реализован метод вычисления потенциальных переменных и переменных состояния. В классе «сопротивление» на основе известных потенциальных переменных реализован метод вычисления потоковых переменных.

Для расчета процессов в «объемах» используется метод энергетического и массового баланса. Уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$\sum_1^p \left(\frac{dH_p}{dt} - \frac{dG_p}{dt} \cdot u(T, \bar{C}) \right) + \sum_1^i \left(\frac{dQ_{in i}}{dt} \right) + \sum_1^j \left(\frac{dQ_{out j}}{dt} \right) + \frac{dU}{dt} + P \cdot \frac{dV}{dt} = 0, \quad (3)$$

где p — номер порта; H — энтальпия через порт; T — температура газа; $\bar{C}$ — концентрация компонентов (вектор); u — удельная внутренняя энергия газа (функция от температуры и состава газа); i — номер внутреннего источника или стока энергии; $Q_{in i}$ — энергия внутреннего источника или стока; j — номер внешнего источника или стока энергии; $Q_{out j}$ — энергия внешнего источника или стока; U — внутренняя энергия газа; V — объем газа; G_p — внешние источники массы газа.

Поток энтальпии определяется через поток массы и переменные состояния газа:

$$\frac{dH_p}{dt} = \frac{dG_p}{dt} \cdot f(h(T, \bar{C})) \quad (4)$$

где h — удельная энтальпия газа (функция от температуры и состава газа); f — функция, зависящая от направления потока переменных через порт.

Массовый баланс газа в «объеме» описывается системой уравнений:

➤ суммарная масса газа в дифференциальной форме:

$$\frac{dG}{dt} + \sum_1^p \left(\frac{dG_p}{dt} \right) + \sum_1^i \left(\frac{dG_{in i}}{dt} \right) = 0, \quad (5)$$

где $G_{in i}$ — внутренние источники массы;

➤ суммарная масса газа в интегральной форме:

$$G = \sum_1^i G_i, \quad (6)$$

где G_i — масса i -го компонента газа;

➤ масса i -го компонента газа в дифференциальной форме:

$$\frac{dG_i}{dt} = \sum_1^p \left(\frac{dG_p}{dt} \cdot f(C_i) \right), \quad (7)$$

➤ концентрация i -го компонента газа:

$$C_i = \frac{G_i}{G}. \quad (8)$$

Внутренним источником массы, например, для камеры сгорания или подогревателя воздуха на впуске, могут быть продукты сгорания, тогда:

$$\frac{dG_{in i}}{dt} = G_m \cdot \frac{dX}{dt} \cdot (1 - L_t), \quad (9)$$

где G_m — масса топлива; L — масса воздуха, необходимого для сгорания 1 кг топлива; X — доля сгоревшего топлива.

Температура газа в объеме определяется из выражения

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dU}{dt} \cdot \frac{1}{c_v(T, \bar{C}) G}, \quad (10)$$

где c_v — теплоемкость газа при постоянном объеме (функция от температуры и состава газа).

Потомками родительского класса «объем» являются «цилиндр», «труба», «разветвление» и др., которые наследуют его методы и свойства и добавляют свои, например, «цилиндр» добавляет метод расчета тепловыделения в результате сгорания топлива. В математической модели используются альтернативные методы расчета тепловыделения — И.И. Вибе, модифицированный Woschni и Anisits [7], и Н.Ф. Разлейцева [8], включающий определение концентрации оксидов

азота и сажевых частиц в продуктах сгорания.

Расход газа в базовом классе «сопротивление» описывается уравнением

$$\frac{dG}{dt} = \frac{P_1 \cdot v}{R \cdot f(T)} \cdot A \cdot C_D, \quad (11)$$

где P_1 — давление газа перед сопротивлением; C_D — коэффициент потока; A — площадь поперечного сечения; v — скорость течения газа через сопротивление:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot R \cdot f(T)}{k-1} \cdot \left(1 - \frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (12)$$

где k — показатель адиабаты; P_2 — давление газа за сопротивлением; R — газовая постоянная.

Массовый баланс потоковых переменных класса «сопротивление» для портов:

$$\sum_i \frac{dG_p}{dt} = 0. \quad (13)$$

Баланс переменных состояния класса «сопротивление» для портов:

$$\bar{C}_p = \text{const}; \quad (14)$$

$$T_p = \text{const}; \quad (15)$$

$$h_p(T, \bar{C}) = \text{const}. \quad (16)$$

Потомки родительского класса «сопротивления» — клапаны различных типов, в том числе с механическим приводом, входы и выходы в элементы.

Важным элементом любой газодинамической системы является труба, соединяющая элементы расчетной схемы. В разработанных математической модели и ПО используется два класса труб — статическая и динамическая. «Статическая труба» является потомком базовых классов «объем» и «сопротивление», применяется в случаях, когда волновыми эффектами можно пренебречь (критерий Куранта–Фридрихса–Леви $Co > 0,5$). Методы класса «сопротивление» необходимы для связывания различных типов элементов, чтобы обеспечить выполнение требования к их чередованию (в противном случае система уравнений имитационной модели будет иметь разрыв рассчитываемых переменных). «Статическая труба» дополнительно учитывает диссипативные эффекты, связанные с газодинамическим трением. Потеря давления ΔP в результате газодинамического трения описывается уравнением Darcy–Weisbach:

$$\Delta P = \lambda(\text{Re}) \cdot \frac{l \cdot \rho \cdot \bar{v}^2}{2 \cdot d}, \quad (17)$$

где $\lambda(\text{Re})$ — коэффициент трения, зависящий от

числа Рейнольдса Re ; l — длина трубы; d — диаметр трубы; ρ — плотность газа; v — средняя скорость потока.

Если критерий Куранта–Фридрихса–Леви $Co < 0,5$, применяется класс «динамическая труба». В основе математической модели класса «динамическая труба» лежит уравнение Эйлера, для численного решения которого используется метод Годунова С.К. [9]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + S = 0, \quad (18)$$

где U — вектор консервативных переменных; F — вектор потоковых переменных; S — источники или стоки энергии (диссипативные параметры).

Класс «турбина» является потомком класса «сопротивление», так как реализует метод вычисления потока газа при известных значениях потенциальных переменных. Математическая модель [10] основана на предположении, что энтальпия газов, проходящих через турбину, преобразуется в момент на ее валу. Изменение энтальпии:

$$\frac{dH}{dt} = (f(h_1(T, \bar{C})) - h_c(T_c, \bar{C})) \cdot \frac{dG}{dt} \cdot \eta_{\text{turb}}, \quad (19)$$

где η_{turb} — изэнтропийный КПД турбины; h_1 — удельная энтальпия газа на входе в турбину; h_c и T_c — удельная энтальпия и температура газа в выходном сечении соплового аппарата, соответственно.

Потенциальные переменные h_c и T_c определяются из системы уравнений газовой динамики с учетом режима течения:

$$h'_c = f(h_1(T, \bar{C})) + \rho \cdot (f(h_1(T, \bar{C})) - f(h_2(T, \bar{C}))) \quad (20)$$

где ρ — степень реактивности турбины; h_2 — удельная энтальпия газа после турбины (в объеме за выходным сечением соплового аппарата), «'» — индекс временного значения переменных:

$$h'_c = h(T'_c, \bar{C}_1) \quad (21)$$

$$P'_c = P_1 \cdot \left(\frac{T'_c}{f(T_1)} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (22)$$

где C_1 , P_1 и T_1 — концентрация компонентов, давление и температура газа на входе в турбину, соответственно; P'_c — давление газа в выходном сечении соплового аппарата.

Действительные значения переменных находятся в зависимости от режима течения. Момент M на валу турбины:

$$M = \frac{dH}{dt} \cdot \frac{1}{w}, \quad (23)$$

где w — угловая скорость вала турбины.

Коэффициент полезного действия (КПД) для класса «турбина» может быть задан в табличной или аналитической форме в зависимости от перепада давлений и расхода газа либо рассчитан по формуле (с учетом ограничения диапазона изменения КПД) [10]

$$\eta_{\text{turb}} = \eta_{\text{turb max}} \cdot \left(1 - \frac{BSR - BSR_{\eta \text{ max}}}{BSR_{\eta \text{ max}}} \right), \quad (24)$$

где $\eta_{\text{turb max}}$ — максимальный КПД турбины; BSR — коэффициент окружной скорости; $BSR_{\eta \text{ max}}$ — коэффициент окружной скорости при максимальном КПД турбины.

Математическая модель не допускает обратного течения газа. «Турбина» может быть соединена не только с «компрессором», но и с любым механизмом, например с кривошипно-шатунным.

Математическая модель компрессора основана на предположении, что механическая энергия, передаваемая на его колесо, преобразуется в работу, которая определяется из системы уравнений баланса энтальпии газа [10]:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot f(T_1) \cdot \left(\pi_{kc}^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right), \quad (25)$$

где π_{kc} — степень повышения давления (отношение давления в выходном сечении соплового аппарата к давлению на входе P_1); T_1 — температура на входе в компрессор;

$$\frac{dH}{dt} = (f(h(T_2, C_2)) - f(h(T_1, C_1))) \cdot \frac{dG}{dt}; \quad (26)$$

$$\frac{dH}{dt} = -M \cdot \eta_{\text{compr}} \cdot w, \quad (27)$$

где η_{compr} — изэнтропийный КПД компрессора; M — момент, подведенный к колесу компрессора.

Расход газа может быть задан известной характеристикой компрессора, либо, в отсутствие таких данных, определяться уравнением [10]

$$\frac{dG}{dt} = \left(\frac{D_{\text{compr}}}{2} \right)^3 \cdot \frac{P_1 \cdot \pi \cdot w \cdot \varphi}{R \cdot T_1}, \quad (28)$$

где D_{compr} — диаметр колеса компрессора; φ — безразмерный коэффициент потока.

КПД компрессора может быть задан его характеристикой, либо определен по формуле [10]

$$\eta_{\text{compr}} = \varphi \cdot \frac{2 \cdot \varphi_{\eta \text{ compr max}} - \varphi}{\varphi_{\eta \text{ compr max}}^2} \cdot \eta_{\text{compr max}}, \quad (29)$$

где $\eta_{\text{compr max}}$ — максимальный КПД компрессора; $\varphi_{\eta \text{ compr max}}$ — безразмерный коэффициент потока при максимальном КПД компрессора.

Температура газов на выходе из соплового аппарата T_c равна температуре в портах соединений T_1 и T_2 (для входного порта это не имеет значения, так как в модели не допускается обратное дви-

жение газа, но это необходимо для замыкания системы уравнений):

$$T_1 = T_2 = T_c = f(T_1) \cdot \left(\pi_{kc}^{\frac{k-1}{k}} + 1 \right). \quad (30)$$

Соответственно, удельная энтальпия h_1 и h_2 в портах:

$$h_1 = h_2 = h(T_c, C_1) \quad (31)$$

Основными классами гидравлических схем также являются «объем» и «сопротивление». Уравнение энергетического и массового баланса для объема жидкости выглядят аналогично (1–16), но с учетом несжимаемости жидкости. Поточковой переменной является расход жидкости, потенциальной — давление, переменная состояния одна — температура, так как теплоемкость и компонентный состав жидкости приняты постоянными.

В основе математического описания теплообмена и теплопередачи классов, реализующих методы газо- и гидродинамики, лежит уравнение Фурье–Кирхгофа:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (32)$$

где λ — коэффициент теплопередачи; ρ — плотность; c — теплоемкость.

Для приведения уравнения (32) к виду обычного дифференциального уравнения первого порядка используется метод конечных разностей, число узлов расчетной сетки может быть любым. Уравнение (32) может быть использовано совместно с граничными условиями любого рода. Класс «не знает» — тип граничных условий, которые для него задаются величиной переменных в портах. Поточковой переменной является плотность теплового потока, потенциальной переменной — температура. Методы расчета теплообмена и теплопередачи (основной элемент — «стенка») реализованы как для базовых классов («объем», «труба»), так и для комплексных мультидоменных классов («цилиндр», «теплообменники», «блок» и др.).

На рис. 1 показан фрагмент имитационной модели ПДВС, иллюстрирующий энергетические и массовые потоки, механические связи в подсистеме «отсек двигателя». Гильза цилиндра моделируется двухмерной осесимметричной сеткой с тремя термодинамическими портами, связывающими ее с рабочим телом в камере сгорания, охлаждающей жидкостью, газом в картере двигателя. Удельные тепловые потоки и потенциальные температуры каждого порта представляют два вектора, сформированные из соответствующих величин каждого граничного элемента расчетной сетки. Такая детализация позволяет адекватно опи-

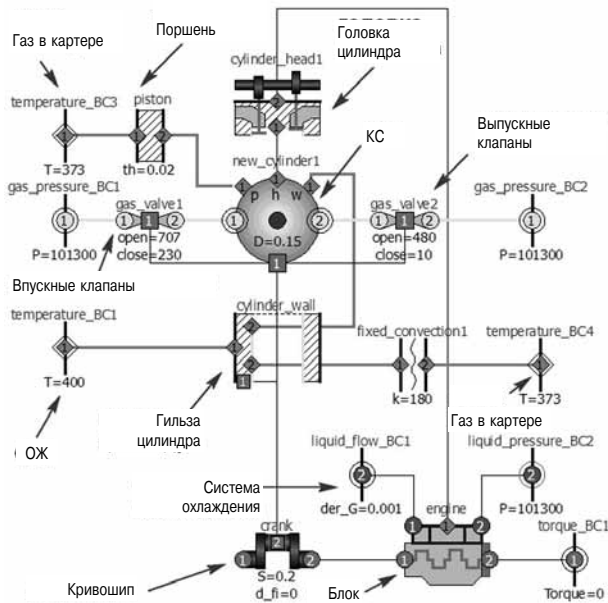


Рис. 1. Подсистема «отсек двигателя»
(фрагмент имитационной модели ПДВС)

сать термодинамические процессы ПДВС на транзитных режимах, включая такие сложно моделируемые, как предпусковая подготовка и пуск.

В основе математического описания теплообменников различных типов лежит метод, основанный на определении среднелогарифмического перепада температур (LMTD) [11]:

$$LMTD = F \cdot \frac{T_{A1} - T_{B2}}{\ln \left(\frac{T_{A1} - T_{B2}}{T_{A2} - T_{B1}} \right)}, \quad (33)$$

где T_{A1} , T_{A2} , T_{B1} , T_{B2} — температура среды на входе (1) и выходе (2) контуров A (горячий) и B (холодный) теплообменника соответственно; F — фактор, учитывающий конфигурацию теплообменника.

LMTD-метод применим только для режимов работы, близких к стационарным, то есть при соблюдении условий:

$$\left. \begin{aligned} T_{A1} &> T_{A2}, \\ T_{B1} &< T_{B2}, \\ T_{A2} &> T_{B1}, \\ T_{A1} - T_{A2} &\neq T_{B2} - T_{B1} \end{aligned} \right\}. \quad (34)$$

Поэтому для существенно нестационарных условий вместо LMTD вычисляется средний арифметический перепад температур.

Механические элементы, реализованные в математической модели и ПО, бывают двух видов: вращающиеся и поступательно движущиеся. Потокотой переменной для вращающихся элементов является момент, потенциальной — угол

поворота, базовые классы — «масса», обладающая инерцией и «пружина». Для поступательно движущихся элементов потокотой переменной — сила, потенциальная — перемещение, базовые классы — «инерция» и «пружина». Также важными элементами являются жесткие и нежесткие «стержни» и «валы».

Наибольший интерес представляет класс «инерция», который используется в качестве родительского для описания коленчатого вала, маховика, ротора турбокомпрессора и т. д. Единственной независимой переменной, как для класса «инерция», так и для всей математической модели двигателя, является время. Полный (от начала расчета) угол поворота φ и, соответственно, угловая скорость w — функции от времени:

$$w = \frac{d\varphi}{dt}, \quad (35)$$

ускорение:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\sum_1^p M_p}{J}, \quad (36)$$

где J — момент инерции; M_p — момент на каждом p -порту (портов может быть неограниченное количество).

Кинематика кривошипа и поршня описывается математической моделью, которая несколько отличается от традиционных (например, [12]) так как:

- основана на точных геометрических соотношениях и дифференциальных уравнениях движения (без разложения в ряд Фурье), решаемых численными методами;

- величина угла поворота не выражена явно — $\varphi = t \cdot w$ (как принято в известных математических моделях, основанных на императивной парадигме), а получается в ходе решения системы уравнений (35) и (36), что является особенностью декларативной парадигмы, исходное положение коленчатого вала задается как начальное условие в уравнении (35).

Для имитационного моделирования ПДВС целесообразно использовать комплексные классы, такие как «блок» (см. рис. 1), который включает часть кривошипно-шатунного механизма, маховик, блок цилиндров и рубашку системы охлаждения. Это объединение обусловлено желанием облегчить работу пользователей с ПО, скомпоновав в одном классе параметры и математическое описание взаимосвязанных процессов динамики двигателя, потерь на трение, теплообмена в рубашке. Как динамический объект, «блок» полностью наследует методы класса «инерция» как термодинамический объект — наследует методы соответствующих термодинамических и гидродинамических классов

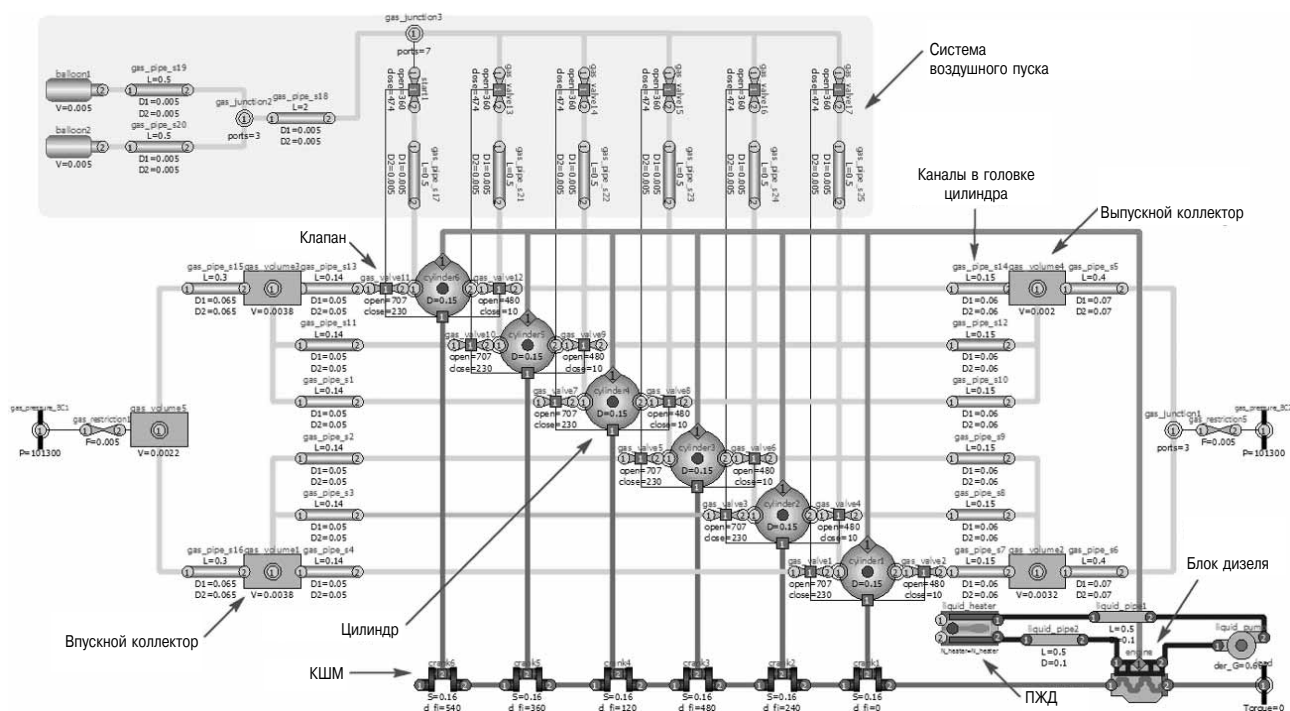


Рис. 2. Имитационная модель шестицилиндрового дизеля типа ЧН15/16 с системой воздушного пуска

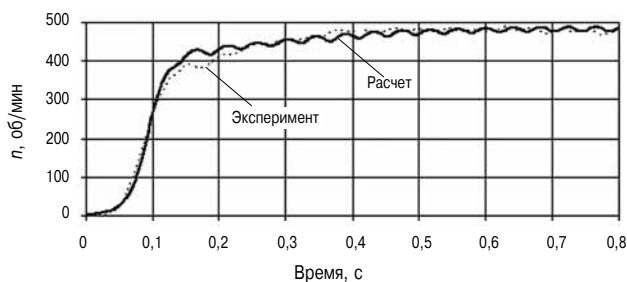


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по частоте вращения коленчатого вала (n) при прокручивании двигателя 6ЧН15/16 сжатым воздухом

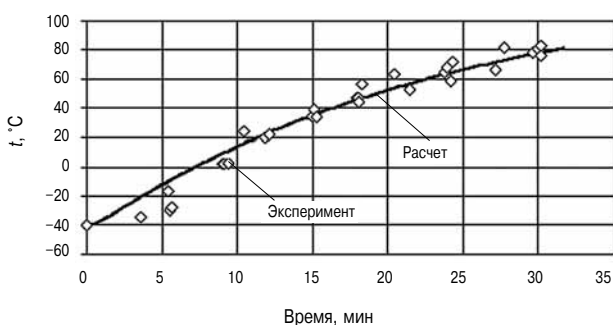


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по температуре охлаждающей жидкости (t) при предпусковом разогреве двигателя типа 12ЧН15/18 подогревателем ПЖД-600

и представляет собой четырехмассовую систему:

- массу блока, обладающую теплоемкостью и обменивающуюся энергией с системами охлаждения, смазки, газами в картере и окружающей средой посредством конвекции;

- объемы жидкости, масла и газа в картере, также обладающие теплоемкостью и обменивающиеся массой и энтальпией с элементами систем охлаждения и смазки и энергией с массой двигателя, стенками гильз цилиндров и окружающей средой.

Потери на трение в классе «блок» описаны моделью SLM (Shayler, Leong, Murphy) [13], которая учитывает их зависимость от частоты вращения, температуры и вязкости масла.

Для подтверждения достоверности математической модели были выполнены тестовые расчеты и верификация. На рис. 2 показан пример имитационной модели шестицилиндрового V-образного (угол развала – 60°) 4-тактного дизеля типа 6ЧН15/16, созданной в разработанном ПО (газотурбинный наддув и охлаждение наддувочного воздуха, согласно рекомендациям фир-

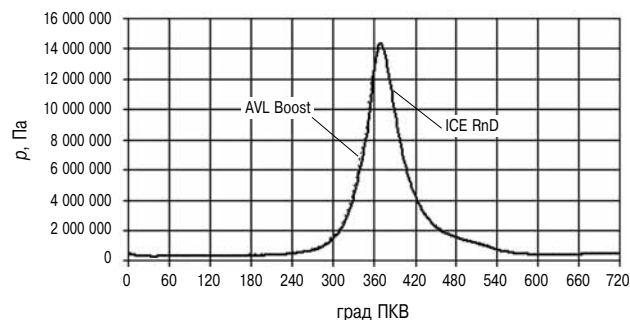


Рис. 5. Сравнение результатов расчета индикаторного давления (p) в камере сгорания двигателя типа 6ЧН15/16 с применением AVL Boost и разработанного ПО (Model)

мы Ricardo [14], имитировались граничными условиями). На рис. 3 показано сравнение расчетных и экспериментальных данных по моделированию динамики прокручивания коленчатого вала двигателя типа 6ЧН15/16 сжатым воздухом на режиме пуска, на рис. 4 — сравнение экспериментальных и расчетных данных по динамике предпускового разогрева двигателя типа 12ЧН15/18.

На рис. 5 приведены индикаторные диаграммы давления газов в камере сгорания дизеля 6ЧН15/16, полученные в результате расчета с использованием разработанного ПО и AVL Boost, которое широко применяется в отрасли. Модели были максимально идентичны по параметрам, схеме и настройкам расчета. Модельное время расчета составило 1 с (16 полных циклов, на рисунке показан последний), машинное — 25–30 с (как для AVL Boost, так и для созданного ПО).

Таким образом, разработанные математическая модель и ПО для имитационного моделирования ПДВС:

- позволяют выполнять сопряженный расчет стационарных и транзитных мультидоменных процессов в ПДВС, их системах и механизмах;
- обладают точностью, функциональными возможностями и скоростью расчета, не уступающими

зарубежным аналогам и достаточными для выполнения текущих и перспективных научно-исследовательских и опытно конструкторских работ;

➤ обеспечивают возможность быстрого и удобного для пользователя создания сложных многоуровневых моделей на основе библиотеки готовых классов с применением графического интерфейса и технологии «drag and drop» относительно простого создания, параметризации и имплементации в ПО новых классов на основе базовых, быстрой корректировки математических моделей, визуализацию результатов.

Разработанное ПО используется в текущих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах ЮУрГУ по созданию новых и модернизации существующих дизелей ООО «ЧТЗ-Уралтрак» типа ЧН15/18, ЧН15/16, ЧН13/15 [15, 16, 17].

Работа выполнена при методической и научной поддержке фирмы AVL (г. Грац, Австрия) (Agreement for Use of Simulation Software AVL BOOST, AVL CRUISE, AVL EXCITE and AVL FIRE between SUSU (Chelyabinsk, Russia) and AVL LIST GmbH (Graz, Austria)) в части, касающейся верификации разработанных математических моделей и программного обеспечения.

Литература

1. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука / Р. Шеннон; пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского. — М.: Мир, 1978. — 418 с.
2. Payri F. Modifications to the method of characteristics for the analysis of the gas exchange process in internal combustion engines / F. Payri, J.M. Corberan, F. Boada, // 105/86 IMechE 1986 Proc. Instn. Mech. Engrs. 1986, Vol. 200, № D4, P. 259–266.
3. Onorati A. Secondary air injection in the exhaust after-treatment system of S.I. engines: 1D fluid dynamic modeling and experimental investigation / A. Onorati, G. Ferrari, G. D'Errico // SAE Technical Paper 2003-01-0366, 2003 P. 87–98.
4. Еникеев Р.Д. Проектирование и реализация пакета программ для анализа и синтеза сложных технических объектов / Р. Д. Еникеев, А. А. Черноусов / Вестник УГАТУ. — 2012. — Т. 16. — № 5 (50). — С. 60–68.
5. Fritzson P. Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 3.3: A cyber-physical approach / P. Fritzson, Wiley-IEEE Press, 2015, 1256 p.
6. Borutzky W. Bond graph methodology / W. Borutzky, Springer, 2010, 678 p.
7. Woschni G. Eine methode zur vorausberechnung der andernung des brenn-verlaufs mittelschnellaufender dieselmotoren bei geanderten betriebsbedingungen / G. Woschni, F. Anisits // MTZ № 34, 1973, p. 78–96.
8. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизации процесса сгорания в дизелях / Н.Ф. Разлейцев. — Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1980. — 169 с.
9. Годунов С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики / С.К. Годунов / Матем. сб., 47(89):3 (1959). — С. 271–306.
10. Eriksson L. Modeling and control of engines and drivelines / L. Eriksson, L. Nielsen / Chichester: Wiley, 2014, 589 p.
11. Serth W. Process heat transfer principles, applications and rules of thumb / W. Serth, G. Lestina / Oxford: Elsevier, 2014. — 616 p.
12. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей / А.И. Колчин, В.П. Демидов. — М.: Высшая школа, 2008. — 496 с.
13. Shayler J. Contributions to engine friction during cold, low-speed running and the dependence on oil viscosity / J. Shayler, D. Leong, M. Murphy // SAE Paper 2005-01-1654, 2005, Fall Technical Conference, P. 103–115.
14. Zander L. Exhaust System Warm-Up Analysis Using The WAVE Code / L. Zander, E. Bradamante / Материалы фирмы Ricardo, G?teborg, Sweden, 25 p.
15. Бондарь В.Н. Математическая модель и программное обеспечение для имитационного моделирования дизеля на режимах предпусковой подготовки и пуска / В.Н. Бондарь, А.А. Малоземов, В.С. Кукис // Научград. Наука, производство, общество. — 2017. — № 2 (12), — С. 50–68.
16. Бондарь В.Н. Математическая модель процессов в системе пуска дизеля сжатым воздухом / В.Н. Бондарь, А.А. Малоземов, В.С. Кукис // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. Научный журнал. Вып. 1–2. — Новосибирск: ФГБОУ ВО «СГУВТ». — 2017. — С. 64–70.
17. Рождественский Ю.В. Разработка методик виртуального моделирования высокофорсированного двигателя специального назначения / Ю.В. Рождественский, Е.А. Задорожная, А.А. Малоземов и др. // Безопасность критичных инфраструктур и территорий. Материалы VII Всероссийской конференции с международным участием и XVII школы молодых ученых. — Екатеринбург: ФГБУН Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем и машин» Уральского отделения РАН. — 2016. — С. 166–170.

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДОЗВУКОВЫХ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ

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

Представлены результаты исследования изменения механических свойств металлических конструктивных элементов авиационной техники и авиационных двигателей при воздействии нестационарных воздушных потоков.

Найдены оптимальная продолжительность и интенсивность обработки. Показано, что методы повышения механических свойств, обеспечивающих надежность элементов конструкции воздушных судов с использованием нестационарных воздушных потоков применимы не только при их изготовлении, но и в процессе эксплуатации, технического обслуживания и восстановительного ремонта.

Установлено, что продолжительное воздействие нестационарных воздушных потоков в условиях эксплуатации воздушного судна способствует снижению механических свойств элементов конструкции авиационной техники и авиадвигателей.



и недостатки, очерчены рамки, в которых она действует, установлены причины, порождающие тот или иной результат. Все это требует проведения широкомасштабных экспериментальных и теоретических исследований, анализа полученных результатов и выдачи соответствующих рекомендаций.

В ходе проведенного исследования изменения механических свойств металлических конструктивных элементов авиационной техники при воздействии нестационарных воздушных потоков, воздействие нестационарными воздушными потоками на поверхность изделий осуществлялось с использованием газоструйных генераторов колебаний параметров потока на основе свистков Гальтона и Гавро, а также генераторов, основывающихся на перекрытии потока газа.

Исследования проводились на образцах и изделиях из металлических материалов более 40 марок, используемых при изготовлении элементов конструкции воздушных судов, авиадвигателей и аэродромной техники [1–10].

В зависимости от размеров изделий и особенностей используемых газоструйных генераторов, обрабатываемые изделия размещались либо в рабочей камере, либо снаружи генерирующего пульсирующие дозвуковые воздушные потоки устройства и подвергалось воздействию газовых импульсов, обладающих частотой от нескольких сотен до нескольких тысяч герц (в зависимости от частоты собственных колебаний обрабатываемого изделия) продолжительностью от нескольких минут до часа и более. Звуковое давление при этом варьировалось от 40 до 140 дБ.

Истоки неисправностей элементов конструкции воздушных судов и авиационных двигателей, снижающих эффективность эксплуатации воздушного транспорта, заключаются в недостаточной надежности элементов конструкции, связанной с несовершенством используемых методов повышения их конструктивной прочности, механических и эксплуатационных свойств.

Повышение эффективности и безопасности авиаперевозок может быть реализовано посредством использования новейших технологий, направленных на управление готовностью технических средств, а также разработки мер по оптимизации сроков профилактических проверок и ремонтов за счет учета фактора влияния внешней среды на элементы конструкции воздушных судов и аэродромной техники, оборудования и механизмов при прогнозировании технического состояния.

Использование на практике той или иной методологии оправдано лишь в том случае, если доказана ее эффективность, выявлены достоинства

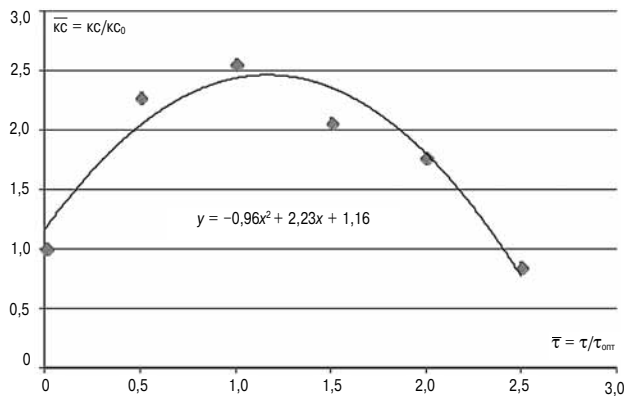


Рис. 1. Зависимость относительной ударной вязкости от относительного времени обдува

Для стальных изделий обработка пульсирующими дозвуковыми воздушными потоками (газоимпульсная обработка) осуществлялась как после окончательной термической обработки, такой как нормализация, закалка с последующим низким, средним или высоким отпуском, так и в сочетании с процессами термообработки при их осуществлении. Также газоимпульсная обработка применялась к деформационно-упрочненным стальным изделиям, нашедшим широкое применение в аэродромной технике. Подобным же образом обрабатывались изделия и образцы из термически упрочняемых и неупрочняемых титановых, алюминиевых, магниевых сплавов, а также сплавов на основе меди и цинка.

Техническим результатом стали существенное повышение показателей пластичности и ударной вязкости, в том числе при низких температурах, в сравнении со стандартно обработанными изделиями, с сохранением или получением более высоких прочностных свойств. На рис. 1 представлена зависимость ударной вязкости конструкционных металлических материалов от времени обработки нестационарными дозвуковыми воздушными потоками. Здесь $K\sigma$ — значение ударной вязкости обдутого образца, τ — продолжительность обдува, мин, $K\sigma_0$ — значение ударной вязкости необдутого образца, $\tau_{\text{опт}}$ — оптимальная

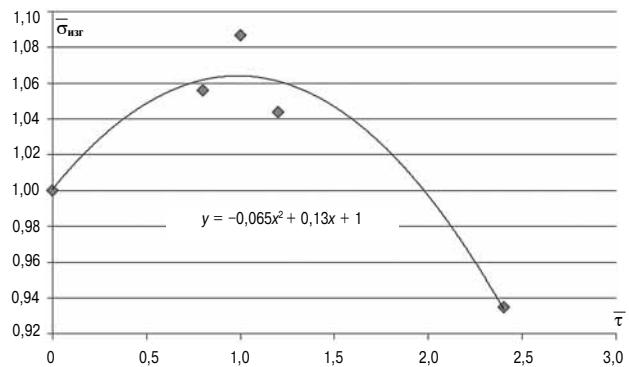


Рис. 2. График зависимости относительной изгибной прочности $\sigma_{\text{изг}} = \sigma_{\text{изг}} / \sigma_0$ от относительного времени обдува $\tau = \tau / \tau_{\text{опт}}$

продолжительность обдува, при котором значение ударной вязкости максимально.

При определении оптимального времени обдува можно использовать формулу $\tau_{\text{опт}} = K_{\text{топт}} \cdot 20$, где 20 — характерное время обдува, мин, $K_{\text{топт}}$ — значение поправочного коэффициента для различных сочетаний скорости обдува V и частоты колебаний натекающего потока (табл. 1), где $M = V / a$, $\bar{f} = f / f_0$, a — скорость звука в потоке.

В ходе исследований существенное внимание было уделено возможности повышения механических свойств крепежа, применяемого в авиационной и аэродромной технике, как существенного элемента, влияющего на безопасность. На графике рис. 2 представлена зависимость изгибной прочности стального болта М6 от продолжительности обработки дозвуковым пульсирующим воздушным потоком с частотой пульсаций 500 Гц и звуковым давлением 40 дБ. Болты располагали вдоль потока, обдув осуществлялся со стороны головки. Наибольший рост изгибной прочности составил 8,7 % и не сопровождался снижением пластичности и ударной вязкости. После 25 минут обдува наблюдается снижение положительного эффекта, а после 50 минут обдува прочность становится ниже, чем у необработанного. Это означает, что при длительном воздействии натекающих на головки болтов воздушных потоков в процессе эксплуатации воздушного судна, их прочностные свойства могут снижаться. То же относится и к другим элементам конструкции воздушных судов, испытывающих воздействие натекающих воздушных потоков.

В ходе оценки возможности сокращения продолжительности газоимпульсной обработки за счет увеличения скорости газового потока установлено, что для элементов конструкции воздушных судов и аэродромной техники, изготовленных из конструкционных среднеуглеродистых сталей, типа 40, 40Х, 40ХС и др. при частоте пульсаций до 1000 Гц установлено следующее:

Таблица 1

Значения поправочного коэффициента $K_{\tau \text{ опт}}$ при определении оптимального времени обдува

$\bar{f} \backslash M$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,05	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
0,1	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8
0,2	1,1	1,0	0,9	0,8	0,87	0,6
0,3	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
0,4	0,9	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5
0,5	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5

При скорости потока V менее 20 м/с продолжительность обдува, обеспечивающая максимальный положительный эффект составляет более 30 минут. При скорости потока 200 м/с продолжительность обдува, обеспечивающая максимальный положительный эффект, достигает минимального значения, составляющего 10 мин и дальнейшее увеличение скорости потока в дозвуковой области не приводит к ее снижению, при том, что высоким скоростям потока соответствуют наибольший уровень шума.

При частоте пульсаций воздушного потока менее 1000 Гц оптимальная продолжительность обработки при скорости пульсирующего воздушного потока V может быть определена при помощи следующей эмпирической зависимости:

$$\tau_{\text{опт}} = 0,005 \cdot V^2 - 0,2 \cdot V + 30.$$

Зависимость оптимальной продолжительности обработки от скорости воздействующего на изделие пульсирующего воздушного потока представлена на графике рис. 3.

$$V_{200} / V_{20} = 10 \text{ и } \tau_{20} / \tau_{200} = 2,62.$$

Таким образом, при увеличении скорости пульсирующего воздушного потока в 10 раз продолжительность обдува, обеспечивающая максимальный положительный эффект, возрастает лишь в 2,6 раза при практически тех же достигаемых значениях показателей механических свойств.

Полученную эмпирическую зависимость оптимальной продолжительности обработки от скорости воздействующего на изделие пульсирующего воздушного потока можно использовать для элементов конструкции воздушных судов и аэродромной техники из сплавов на основе цветных металлов, таких как алюминий, магний, титан, никель, бериллий, медь, цинк и других при использовании соответствующего поправочного коэффициента, учитывающего отношение ско-

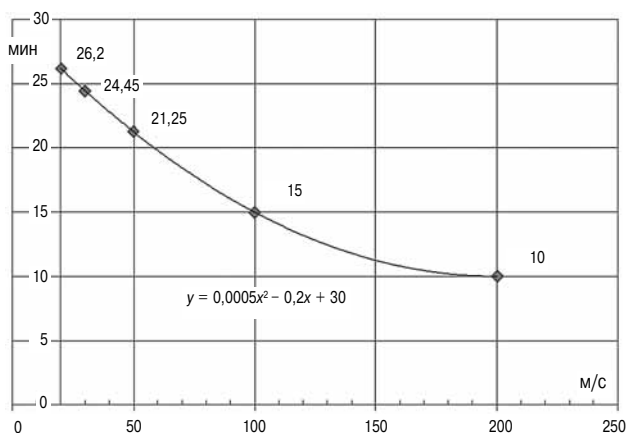


Рис. 3. Зависимость оптимальной продолжительности обработки от скорости воздействующего на изделие пульсирующего воздушного потока

рости звука в сплавах на основе данного металла от скорости звука в стали.

Продолжительность обдува, обеспечивающая максимальный положительный эффект в случае сплава на основе цветного металла, будет равна:

$$\tau_m = k_m \cdot \tau_c,$$

где $\tau_c = \tau_{\text{опт}}$ для стали $= 0,005 \cdot V^2 - 0,2 \cdot V + 30$; $k_m = a_c / a_m$ — отношение скорости звука в стали a_c к скорости звука в сплаве на основе данного металла a_m .

Таблица 2

Значения поправочных коэффициентов для определения оптимальной продолжительности обработки элементов конструкции воздушных судов и аэродромной техники из сплавов на основе цветных металлов

Основа сплава	Al	Be	Mg	Cu	Ni	Zn	Ti
k_m	0,99	0,39	1,1	1,41	1,02	1,36	1,22

Значения поправочных коэффициентов k_m представлены в таблице 2.

При этом установлено, что наибольший рост пластичности и вязкости наблюдается в направлении обдува при газоимпульсной обработке.

Разработана технология, позволяющая обеспечить требуемую изотропию свойств изделия за счет последовательного обдува в нескольких направлениях.

Была поставлена задача восстановления прочностных свойств металлических элементов конструкции воздушных судов, снизившихся в результате действия натекающих на них в процессе эксплуатации воздушных потоков.

Решение поставленной задачи достигается тем, что металлический элемент конструкции воздушного судна, прочностные свойства которого снизились в результате натекания на него воздушного потока в эксплуатации, подвергают воздействию пульсирующего дозвукового воздушного потока, имеющего частоту 400–2000 Гц и звуковое давление 40–140 дБ при комнатной температуре в направлении, противоположном направлению воздействия натекающего воздушного потока в процессе эксплуатации.

Так, в результате продолжительного натекания нестационарных воздушных потоков со стороны головки стального болта М6, являющегося крепежным элементом воздушного судна, его изгибная прочность снизилась с 939 до 861 МПа или более чем на 8 %.

Обработка данного болта пульсирующим дозвуковым воздушным потоком, имеющим частоту 500 Гц и звуковое давление 40 дБ в течение 20 минут в продольном направлении со стороны

торца болта, позволила восстановить его изгибную прочность до исходного значения.

Механические волны, генерируемые пульсациями газового потока при взаимодействии с изделием, воздействуя на дислокационную структуру материала металлического изделия, способны оказывать влияние на его прочностные свойства.

С точки зрения дислокационной теории заблокированным перед препятствиями дислокациям легче двигаться в направлении, противоположном к их движению при исходном воздействии.

Поэтому с целью устранения неблагоприятного расположения дислокаций в элементах конструкций воздушных судов и авиадвигателей (включая крепеж), возникающих под действием натекающих воздушных потоков, эффективна их обработка пульсирующим газовым потоком в направлении, противоположном направлению воздействия.

При обработке используются среднечастотные колебания, так как высокочастотные (более 2000 Гц) колебания переносят малую долю энергии.

Таким образом, был получен технический результат, а именно восстановление прочностных свойств металлического элемента конструкции воздушного судна.

Полученные данные свидетельствуют о положительном влиянии обработки пульсирующим газовым потоком на статическую и динамическую прочность изделий при условии ее продолжительности, не превышающей определенное время, зависящее от размера обрабатываемого изделия и амплитудно-частотных характеристик газового потока (отношение частоты колебаний газового потока к частоте собственных колебаний изделия).

Экспериментально установлено, что дискретное воздействие нестационарного воздушного потока на элемент конструкции воздушного судна той же суммарной продолжительности, что и непрерывное, обеспечивает аналогичный технический результат, то есть эффект от воздействия нестационарных воздушных потоков накапливается структурой материала.

Методы повышения механических свойств, обеспечивающих надежность элементов конструкции воздушных судов и авиадвигателей с использованием газоимпульсной обработки применимы

не только при их изготовлении, но и в процессе эксплуатации, технического обслуживания и восстановительного ремонта. Вместе с тем установлено, что продолжительное воздействие нестационарных воздушных потоков, которое имеет место при эксплуатации воздушного судна, способствует снижению механических свойств элементов конструкции авиационной техники, обеспечивающих надежность.

Результаты проведенных исследования показали, что для существенного, в том числе негативного изменения структуры и свойств материалов элементов конструкции авиационной техники при натекании на них нестационарных воздушных потоков в процессе эксплуатации не требуется значительной скорости потока или звукового давления.

Литература

1. *Иванов Д.А.* Повышение конструктивной прочности материалов за счет воздействия пульсирующих дозвуковых низкочастотных газовых потоков: монография. — СПб.: Изд-во СПбГУСЭ, 2008. — 123 с.
2. *Булычев 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 термической 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.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ГЕНЕРАТОРНОГО ГАЗА И ЕГО СМЕСИ С БЕНЗИНОМ В ПОРШНЕВОМ ДВИГАТЕЛЕ

С.А. Плотников, д.т.н., профессор кафедры
А.С. Зубакин, аспирант
Вятский государственный университет

Проведены стендовые испытания искрового двигателя 1Ч6,8/5,4 при работе на бензине, генераторном газе и их смеси. Определены регулировочные, экономические и эффективные показатели работы двигателя. Выполнена обработка индикаторных диаграмм двигателя по методике ЦНИДИ с построением графиков тепловыделения. Установлено, что добавка до 70 % генераторного газа не ухудшает эффективных показателей двигателя, снижает его теплонапряженность, улучшает экологические показатели.

Традиционные углеводородные топлива, такие как бензин или дизельное топливо (ДТ) становятся менее доступным из-за уменьшения запасов нефти, сложности ее добычи и переработки. Значимым фактором является также энергетическая политика. Вполне приемлемая альтернатива бензину как топливу — генераторный газ (ГГ). Его использование позволяет заменить бензин в установках с ДВС, для которых снижение максимальной мощности не так критично, поскольку ее снижение может достигать 40 % [1, 2]. К таким установкам относятся стационарные двигатели для привода насосов, электрогенераторы и т. д. Генераторный газ, произведенный из отходов древесины, обладает низкой стоимостью и общедоступностью. Оборудование для его производства компактно и легко масштабируемо [2]. Из недостатков можно отметить низкую удельную теплоту сгорания, изменения химического состава при хранении. Эффективная работа ДВС на ГГ обеспечивается настройкой системы зажигания, модернизацией системы подачи топлива [3], для чего требуется детальное изучение процесса сгорания.

Анализ проведенных работ [2, 4] выявил недостаточно полные данные по процессу сгорания генераторного газа в ДВС. Это связано с несовершенством технической и материальной базы в начале и середине прошлого века. В настоящее время очень много внимания уделяется процессам сгорания природного газа, водорода и их смесей [4] и необоснованно мало — процессу сгорания

ГГ. Отсутствие в современной литературе материалов, описывающих работу ДВС на ГГ, несомненно тормозит дальнейшее использование данного альтернативного топлива.

Необходимо также отметить возможность снижения вредных выбросов при сгорании ГГ, и поскольку постоянное ужесточение экологических требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами (ОГ) касается не только транспортных средств, но и стационарных двигателей. Соответственно, применение ГГ — один из возможных способов повысить экологический класс двигателя [2].

Цель данной работы — исследование возможных пределов замены бензина на ГГ или его смесь с бензином с целью экономии нефтяного топлива без существенного снижения эффективных показателей ДВС, а также улучшения его экологических показателей.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- создание соответствующего испытательного стенда;
- разработка модернизированной системы питания и зажигания двигателя;
- проведение стендовых испытаний ДВС на ГГ и его смесях с бензином;
- исследование рабочего процесса на основе данных индицирования и характеристик тепловыделения.

Известно, что вне зависимости от вида сырья для получения ГГ, его химический состав примерно следующий (табл. 1).

Увеличение доли водорода H_2 в топливе обычно приводит к повышению его детонационной стойкости, замедлению процессов поджигания и горения смеси. Наличие большого количества азота N_2 в составе топлива также снижает скорость сгорания смеси. Таким образом, влияние

Таблица 1

Химический состав генераторного газа

Наименование сырья	Горючие компоненты, %				Балласт, %		
	H_2	C_nH_m	CO	CH_4	O_2	N_2	CO_2
Древесные чурки, $\omega = 20\%$	14–	0,1–	18–	2,1–	1,4–	48–	8–
	18	0,3	22	2,5	1,8	52	10

отмеченных компонентов на показатели процесса сгорания достаточно неопределенно.

Ранее выполненными исследованиями установлено, что химический состав генераторного газа достаточно нестабилен. Это усложняет расчет процесса его сгорания, а также получение устойчивых моторных характеристик. Для исключения отмеченного влияния все исследования проводились на древесном угле, показатели которого соответствовали ГОСТ 7657–84. Для получения генераторного газа был использован газогенератор (рис. 1, а) оригинальной конструкции [5–7].

В эксперименте использовался искровой двигатель воздушного охлаждения 1Ч6,8/5,4 в составе модернизированного испытательного стенда (рис. 1) на основе КИ-541 ГОСНИТИ. Запись индикаторных диаграмм производилась при помощи цифрового комплекса DiaMag-2 (рис. 2), включающего 6-канальный осциллоскоп, датчик индицирования, установленный в головке блока (рис. 2, поз. 1). Полученный цифровой сигнал в дальнейшем обрабатывался соответствующим программным обеспечением. Для защиты датчика

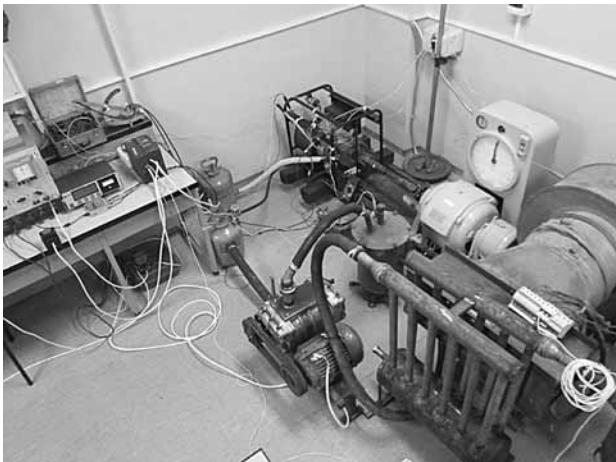


Рис. 1. . Общий вид испытательного стенда

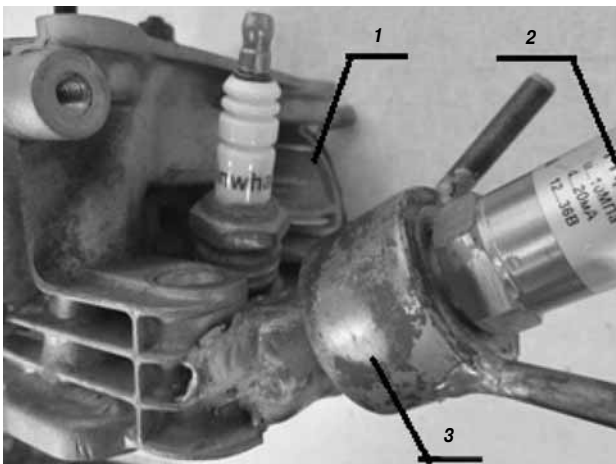


Рис. 2. Головка блока цилиндров:

1 — головка блока; 2 — холодильник; 3 — датчик давления

давления от высокой температуры использовался жидкостный теплообменник (рис. 2, поз. 3).

Положение ВМТ коленчатого вала определялось индуктивным датчиком типа 2112-3847010, определение момента искрообразования осуществлялось датчиком типа DIS-6. Температура отработавших газов (ОГ) измерялась термопарой TP-01A, объемы генераторного газа и воздуха измерялись расходомерами Вентури, состав ОГ — газоанализатором «Инфракрас» с функцией вывода результатов в графическом виде на компьютер. Системе зажигания была придана возможность регулирования угла опережения зажигания. Генераторный газ подавался через смеситель типа «тройник». Дополнительная подача бензина осуществлялась с помощью карбюратора, установленного последовательно со смесителем [3].

Первый этап стендовых испытаний предусматривал определение регулировочной характеристики двигателя по установочному углу опережения зажигания (рис. 3).

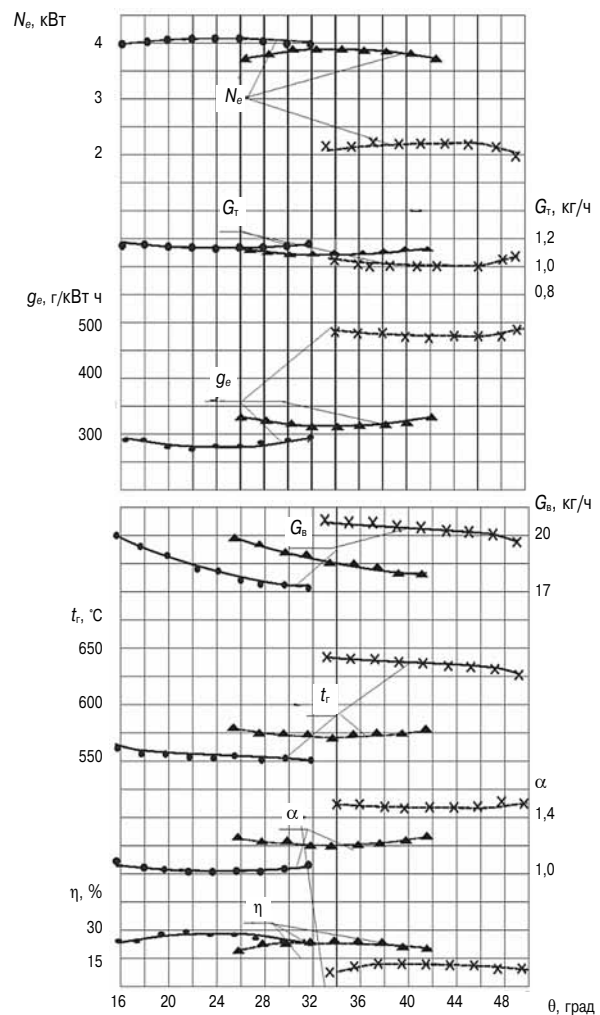


Рис. 3. Регулировочная характеристика двигателя 1Ч6,8/5,4 при $n = 3000$ об/мин:

● — бензин; × — генераторный газ; ▲ — 30 % бензин + 70 % генераторный газ

Оптимальное значение установочного угла опережения зажигания θ_z для различных видов топлива определялось по значениям наименьшего удельного эффективного расхода топлива g_e и максимального значения эффективной мощности N_e для каждого вида топлива. Характеристика снималась не менее чем при восьми значениях θ_z с шагом два градуса поворота коленчатого вала (ПКВ).

Как видно из графиков (рис. 3), максимальное значение эффективной мощности $N_e = 4,1$ кВт достигается при $\theta_z = 25^\circ$ в случае работы на бензине, для генераторного газа, соответственно, эти значения равны $N_e = 2,3$ кВт при $\theta_z = 40^\circ$. При ра-

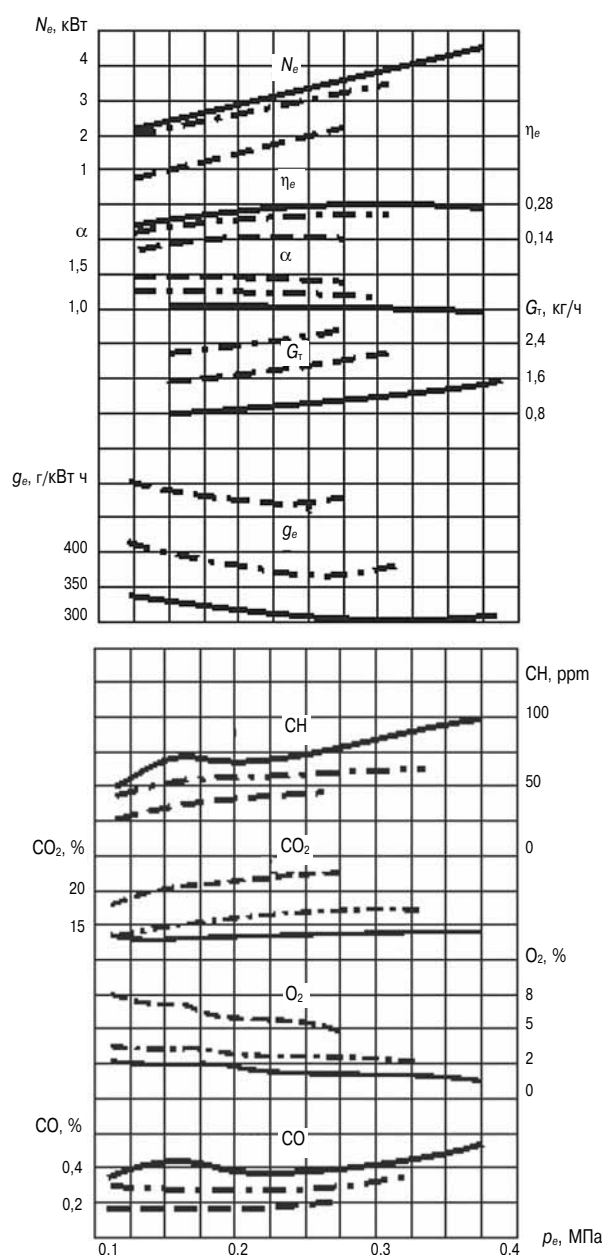


Рис. 4. Нагрузочные характеристики двигателя 1C6,8/5,4:
— бензин; -- генераторный газ;
- · - 30 % бензин + 70 % генераторный газ

боте на смесевом топливе максимальное значение эффективной мощности составляет $N_e = 3,6$ кВт при $\theta_z = 34^\circ$. Минимальные значения удельного эффективного расхода топлива достигаются при этих углах и составляют, соответственно, $g_e = 275$ г/кВт·ч, $g_e = 468$ г/кВт·ч и $g_e = 329$ г/кВт·ч. Увеличение удельного эффективного расхода ГГ можно объяснить его пониженной теплотой сгорания.

Следующий этап стендовых испытаний предусматривал снятие нагрузочных характеристик при частоте вращения $n = 3000$ об/мин. Характеристики снимались при оптимальных углах опережения зажигания для каждого вида топлива (рис. 4).

Как видно, работа двигателя на ГГ приводит к снижению его эффективной мощности на 45 % (рис. 4) в сравнении с работой на бензине. В то же время снижение эффективной мощности двигателя при его работе на смеси 70 % ГГ и 30 % бензина составляет всего 15 %.

Работа по нагрузочным характеристикам дает возможность оценить изменение состава ОГ при работе ДВС на различных видах топлива.

Видно, что содержание углекислого газа CO_2 в ОГ при работе на ГГ больше, чем на бензине, что, очевидно, связано со значительным содержанием CO_2 в исходном топливе. В то же время выбросы оксидов углерода CO в ОГ при работе на ГГ ниже, чем на бензине. Это можно объяснить более полным сгоранием топлива.

Влияние добавок ГГ на эффективные и экологические показатели работы двигателя 1C6,8/5,4 можно рассмотреть и по скоростным характеристикам (рис. 5). Как видно, во всем рассматриваемом скоростном диапазоне имеет место снижение эффективной мощности, увеличение значений часового и удельного эффективного расходов топлива. При работе двигателя на ГГ снижение мощности составляет 47 %, а при работе на смеси 70 % ГГ и 30 % бензина всего лишь 13 %. Соответственно, увеличение роста удельного эффективного расхода топлива составляет 70,2 и 19,6 %.

Во всем рассматриваемом скоростном диапазоне имеет место снижение выбросов CO и несгоревших углеводородов C_nH_m .

На рис. 6 приведены совмещенные индикаторные диаграммы работы двигателя на различных видах топлива при $n = 3000$ об/мин и оптимальных значениях θ_z .

В случае работы ДВС на бензине, оптимальным значением установочного угла опережения зажигания следует считать $\theta_z = 25^\circ$. Максимальное давление цикла при этом достигается при угле поворота коленчатого вала 11–13° после ВМТ и составляет $p_z = 3,65$ МПа.

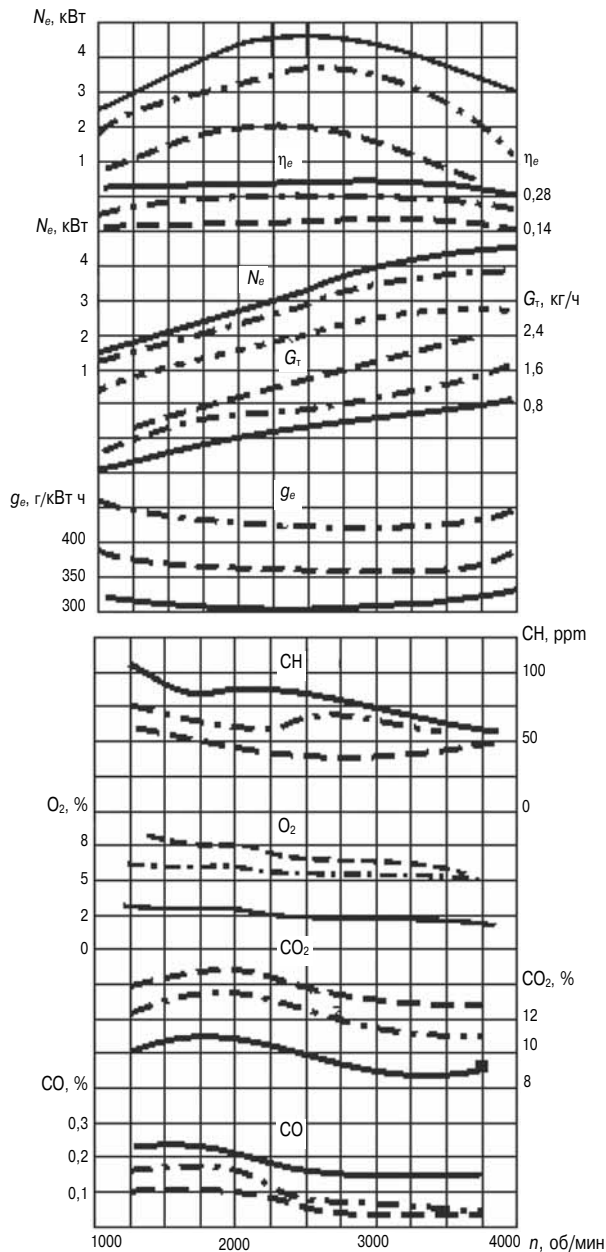


Рис. 5. Скоростные характеристики двигателя 1C6,8/5,4:
— бензин; -- генераторный газ;
- · - 30 % бензин + 70 % генераторный газ

Работа на ГГ вызывает смещение максимального давления цикла вправо от ВМТ, что требует увеличения угла опережения зажигания θ_z до величины 40° . Максимальное давление цикла при этом снижается до величины $p_z = 2,13$ МПа.

При использовании смеси 70 % ГГ и 30 % бензина оптимальное значение θ_z составляет угол, равный $\theta_z = 32^\circ$ ПКВ. Максимальное давление цикла $p_z = 3,27$ МПа соответствует 12–14° поворота коленчатого вала после ВМТ.

Анализ характеристик тепловыделения (рис. 7) показывает значительное увеличение времени горения ГГ по сравнению с бензином почти на

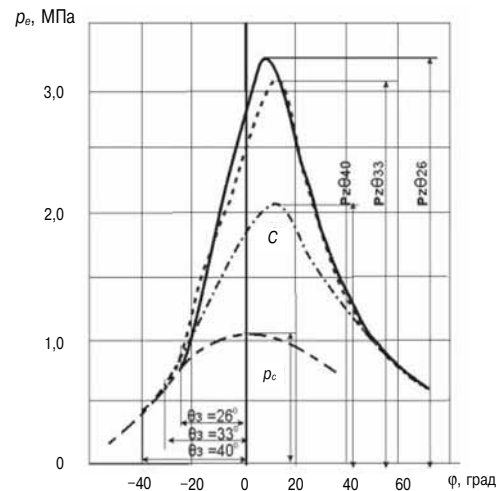


Рис. 6. Индикаторные диаграммы двигателя 1C6,8/5,4 при $n = 3000$ об/мин:
— бензин; -- генераторный газ;
- · - 30 % бензин + 70 % генераторный газ

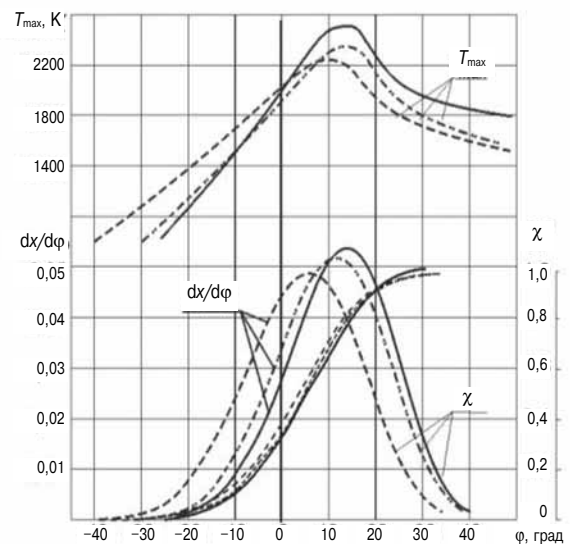


Рис. 7. Характеристики тепловыделения двигателя 1C6,8/5,4 при $n = 3000$ об/мин:
— бензин; -- генераторный газ;
- · - 30 % бензин + 70 % генераторный газ

76 %. Так, при нахождении поршня в ВМТ доля выделившегося тепла χ для бензина составляет 0,39, для чистого ГГ — 0,34 и для смеси 70 % ГГ и 30 % бензина — 0,37 соответственно.

Снижение скорости горения топлива и тепловыделения при работе на ГГ объясняется замедлением скорости горения топлива вследствие большого количества азота в составе топлива, который является инертным газом.

Замедление скорости горения и тепловыделения объясняют снижение значений максимальной среднemasовой температуры цикла. Так, при работе на чистом бензине $T_z = 2540$ К, при

работе на чистом ГГ $T_z = 2230$ К, а в случае работы на смеси 70 % ГГ и 30 % бензина $T^* = 2360$ К.

Анализ индикаторных диаграмм и характеристик тепловыделения подтверждают достоверность данных стендовых испытаний двигателя [8] и нахождение оптимальных значений углов θ_z .

Выводы

1. Добавка ГГ в топливо замедляет скорость горения смеси и соответственно изменяет динамику тепловыделения.

2. В результате проведенных исследований на двигателе 1Ч6,8/5,4 установлены значения оптимальных углов опережения зажигания — при работе на бензине $\theta_z = 26^\circ$, на генераторном газе $\theta_z = 40^\circ$, на смеси бензина и ГГ $\theta_z = 34^\circ$. При ука-

занных значениях углов θ_z достигаются значения эффективной мощности $N_{e \text{ бенз}} = 4,1$ кВт, $N_{e \text{ ГГ}} = 2,3$ кВт, $N_{e \text{ смесь}} = 3,6$ кВт соответственно.

2. Работа двигателя на ГГ нецелесообразна ввиду значительного — до 45 % — снижения эффективной мощности. Работа двигателя на смеси 30 % бензина и 70 % ГГ вызывает снижение мощности не более чем на 10–15 %, что вполне приемлемо. При этом имеет место экономия углеводородного топлива в объеме до 70 %.

5. Применение смеси 30 % бензина и 70 % ГГ для работы двигателя позволяет снизить выбросы СО на 24 %, несгоревших углеводородов C_nH_m — на 28 % во всех рассматриваемых нагрузочных и скоростных диапазонах работы двигателя.

Литература

1. Плотников С.А., Зубакин А.С., Коротков А.Н. Исследование электростанции, работающей на альтернативном топливе. Улучшение эксплуатационных показателей сельскохозяйственной энергетики // Мат. IX межд. науч.-практ. конф. «Наука—Технология—Ресурсосбережение». — Киров, 2016. — С. 220–224.
2. Coal and Biomass Gasification. Santanu De Avinash Agarwal, V. S. Moholkar Bhaskar Thallada Editors Energy, Environment and Sustainability. Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9>
3. Плотников С.А., Бузиков Ш.В., Карташевич А.Н., Зубакин А.С. Определение количественных характеристик двигателя бытовой электростанции при использовании генераторного газа в качестве альтернативного топлива // Проблемы региональной энергетики [Электронный ресурс]. — 2017. — № 2 (34). — С. 105–111.
4. Technology roadmap-bioenergy for heat and power (2012). International Energy Agency. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/2012_Bioenergy_Roadmap_2nd_Edition_WEB.pdf. Accessed Aug. 2016.

5. Плотников С.А., Острецов В.Н., Киприянов Ф.А., Палицын А.В., Зубакин А.С., Коротков А.Н. Система питания двигателя внутреннего сгорания генераторным газом. — Патент РФ № 2605870, МКИ F02B43/08.

6. Бирюков А.Л., Плотников С.А., Картошкин А.П., Зубакин А.С., Шушков Р.А. Разработка газогенератора для применения на мобильных энергетических средствах // Известия международной академии аграрного образования. — Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского регионального отделения Международной общественной организации «Международная академия аграрного образования», 2017. — № 35. — С. 15–18.

7. Плотников С.А., Острецов В.Н., Малков Н.Г., Палицын А.В. Система питания дизеля на композитном топливе. — Патент РФ № 2638693, МПК F02M 43/00. — 5 с., 1 ил.

8. Плотников С.А., Зубакин А.С. Исследование показателей работы двигателя 1Ч6,4/5,8 при работе с добавками генераторного газа // Будущее технической науки : сб. мат. XVI Межд. молодежн. науч.-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — Нижний Новгород, 2017. — С. 399–400.

РАЗРАБОТКА ДИЗЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С АКТИВНЫМИ КОТЛАМИ УТИЛИЗАТОРАМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ

А.В. Смирнов д.т.н., ВИ(ИТ), Санкт-Петербург

А.В. Бондарев, к.т.н., С.В. Александров, инженер, Э.В. Болбышев, инженер
ВА МТО, Санкт-Петербург

В статье представлен обзор технических решений конструкции силовой установки с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя. Разработана математическая модель и получены расчетные технические характеристики теплоэнергетической установки с подачей отработавших газов дизель-генератора в топочное устройство. Показана возможность экономии твердого топлива и снижения выбросов вредных веществ при сохранении тепловой мощности котла.

В настоящее время одним из приоритетных направлений модернизации систем тепло- и электроснабжения считается применение установок для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии.

Одним из вариантов применения данной технологии является использование комбинированных установок на базе дизель-генератора и активного котла-утилизатора (ДТЭС АКУ), где предусмотрена подача отработавших газов дизеля с температурой 400–450 °С и высоким содержанием кислорода в топку котла. При этом с отработавшими газами вносится теплота и кислород для сжигания котельного топлива, что обеспечивает экономию топлива при сохранении тепловой мощности котла. По данному направлению известны работы Скокова С.Н. и Юферева Ю.В. по разработке ДТЭС АКУ, в которых в качестве активного котла-утилизатора использовался котел на дизельном топливе [1–4].

В настоящей работе рассмотрены характеристики установки ДТЭС АКУ, в которой в качестве активного котла-утилизатора используется угольный котел высокотемпературного кипящего слоя (ВТКС), разработка и исследования которого в последние годы активно ведется специалистами научной школы профессора Смирнова А.В. [5].

Технология ВТКС позволяет обеспечить высокие экономические и экологические показатели котла:

➤ эффективность выгорания топлива в зависимости от его типа и конструкции топочной камеры составляет 95–98 %;

➤ коэффициент полезного действия котлоагрегата достигает 80–83 %;

➤ диапазон изменения нагрузки составляет 30–100 % за счет узкой наклонной подвижной решетки;

➤ обеспечивается снижение выбросов оксида азота за счет внутритопочных методов их подавления.

На кафедре двигателей и тепловых установок Военного института (инженерно-технического) — ВИ(ИТ) разработано новое техническое решение по созданию силовой установки с активным котлом-утилизатором, на которое получен патент на изобретение № 2650018. Принципиальная схема силовой установки представлена на рис. 1 [6].

Силовая установка с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя (ДТЭС АКУ ВТКС) включает в себя котлоагрегат с топкой высокотемпературного кипящего слоя 2, с наклонной к горизонту подвижной колосниковой решеткой 7, поверхностями нагрева 9, дутьевыми зонами первичного 5 и вторичного воздуха 6, питателем 8, эжектором возврата уноса 10. К впускному патрубку 11 котла-утилизатора 2 подключен дутьевой вентилятор 15, а к выпускной трубе 3 дизель-генератора 1 подключен газоход перепуска отработавших газов в атмосферу 13 с глушителем шума 14. На линии нагнетания 12 дутьевого вентилятора 15,

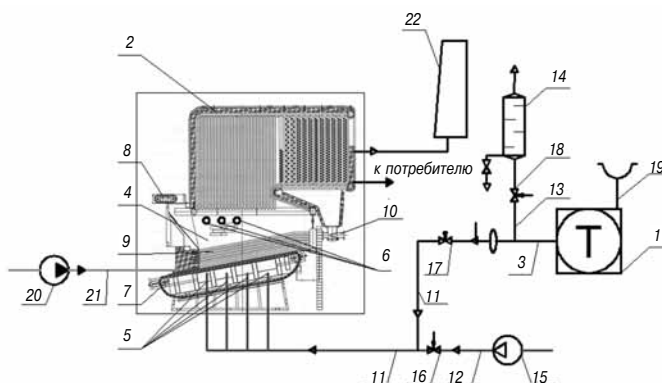


Рис. 1. Силовая установка с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя и дизель-генератором

газовпускном патрубке котла-утилизатора и на газоходе перепуска отработавших газов в атмосферу 13 установлены устройства регулирования расхода сред (задвижки) 16, 17, 18.

Для создания высокотемпературного кипящего слоя дутьевым вентилятором 15 по линии нагнетания 12 воздух подается в газовпускной патрубок 11, где он смешивается с отработавшими газами дизель-генератора и поступает в первичную 5 и вторичную 6 дутьевые зоны. Дымовые газы удаляются из котла-утилизатора через дымовую трубу 22.

Для оценки эффективности работы ДТЭС АКУ ВТКС необходимо учитывать две важные основные технологические особенности котла с топкой высокотемпературного кипящего слоя.

Первая особенность состоит в жестком ограничительном требовании по поддержанию гидродинамического режима кипящего слоя. При сжигании топлива в высокотемпературном кипящем слое добавление отработавших газов дизель-генератора в топочное устройство может существенно нарушить гидродинамику топочных процессов котлоагрегата. Например, для ДТЭС АКУ ВТКС, состоящей из котла КВП-1,74 ВТКС тепловой мощностью на номинальной нагрузке 1,74 МВт (1,5 Гкал/ч) и дизель-генератора АД-60/Т-400Р номинальной электрической мощностью 60 кВт подача отработавших газов в количестве 960 м³/ч (что составляет 30 % от объемного расхода дутьевого воздуха для котла) приведет к возрастанию скорости смеси воздуха и отработавших газов с 6,19 до 8,9 м/с.

При этом возможно нарушение устойчивого горения в кипящем слое. Частицы твердого топлива уносятся из объема топочного устройства и осаждаются в золоуловителе, что приводит к резкому увеличению потерь теплоты от механической неполноты сгорания унесенного топлива. Таким образом, для поддержания гидродинамики кипящего слоя и нормального режима горения топлива в котле расход первичного дутьевого воздуха необходимо уменьшить на величину, равную расходу отработавших газов дизель-генератора. При этом в топку котла будет подаваться газовая смесь, состоящая из дутьевого воздуха в объеме 2040 м³/ч и отработавших газов дизеля в объеме 960 м³/ч. То есть суммарный объемный расход смеси воздуха и отработавших газов должен быть таким же, как и расход первичного воздуха автономно работающего котла без дизеля.

Вторым принципиальным ограничительным условием совместной работы дизеля и АКУ ВТКС является ограничение по минимальному значению коэффициента избытка воздуха в топке котла. Очевидно, что при подаче в воздуховод

первичного воздуха определенного объемного расхода отработавших газов дизеля и одновременного снижения на эту величину объемного расхода дутьевого воздуха действительный объемный расход кислорода, поступающего в топку для горения, будет снижаться. Это обусловлено тем, что объемное содержание кислорода в отработавших газах дизеля составляет не более 10–11 %, в то время как содержание кислорода в дутьевом воздухе равно 21 %. В результате при подаче в топку смеси воздуха и отработавших газов дизеля следует ожидать снижения коэффициента избытка воздуха в топке котла. Данный фактор является положительным для устойчивости процесса горения твердого топлива в кипящем слое, так как при снижении коэффициента избытка воздуха будет снижаться температура горения и, как следствие, уменьшаться вероятность шлакования колосниковой решетки.

Вместе с тем существует ограничение по нижнему пределу коэффициента избытка воздуха, равному 1,15–1,2. При значениях ниже предельных резко увеличивается потеря теплоты от химической неполноты сгорания топлива. Поэтому возникает важная практическая задача оценки величины максимально возможного расхода отработавших газов дизеля, подаваемых в топку котла ВТКС, при котором будет обеспечено горение твердого топлива в кипящем слое с минимальным значением потерь теплоты от химической неполноты сгорания. Решение этой задачи позволяет определить величину максимально возможного внесения теплоты с отработавшими газами дизеля в топку котла ВТКС, и, как следствие, величину максимально возможной экономии котельного топлива.

Для определения максимально возможного расхода отработавших газов дизеля, замещающих часть дутьевого воздуха, предлагается следующая математическая модель.

Коэффициент избытка воздуха в топке котла ВТКС может быть определен по известной формуле:

$$\alpha = \frac{V_{\text{возд.}}^{\text{д}}}{V_0}, \quad (1)$$

где $V_{\text{возд.}}^{\text{д}}$, V_0 — действительный и теоретически необходимый расход воздуха для сгорания 1 кг топлива, м³/кг.

Формулу (1) можно записать в следующем виде:

$$\alpha = \frac{V_{\text{O}_2}^{\text{д}} + V_{\text{N}_2}^{\text{д}}}{V_{\text{O}_2}^{\text{т}} + V_{\text{N}_2}^{\text{т}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{O}_2}^{\text{д}}$, $V_{\text{N}_2}^{\text{д}}$ — действительные расходы кислорода и азота в воздухе для горения 1 кг топлива, м³/кг; $V_{\text{O}_2}^{\text{т}}$, $V_{\text{N}_2}^{\text{т}}$ теоретически необходимые расходы

кислорода и азота в воздухе для горения 1 кг топлива, м³/кг;

Очевидно, что определить значение коэффициента избытка воздуха по формуле (1) для котла ВТКС в составе комбинированной установки ДТЭС АКУ ВТКС не представляется возможным, так как в топку котла подается не воздух, а смесь воздуха и отработавших газов дизеля. Поэтому для решения задачи предлагается использовать коэффициент избытка кислорода.

Тогда для котла ВТКС, работающего автономно на воздухе без дизеля, коэффициент избытка кислорода можно определить по формуле

$$\alpha_k = \frac{V_{O_2}^{\text{д}}}{V_{O_2}^{\text{т}}} \quad (3)$$

Коэффициент избытка кислорода в смеси воздуха и отработавших газов дизеля можно определить по формуле

$$\alpha_k^{\text{см}} = \frac{V_{O_2}^{\text{д.смеси}}}{V_{O_2}^{\text{т}}}, \quad (4)$$

где $V_{O_2}^{\text{д.смеси}}$ — действительный расход кислорода в смеси на горение 1 кг топлива, м³/кг;

$$V_{O_2}^{\text{смеси}} = (1-r) \cdot K_{O_2 \text{возд}}^{\text{д}} \cdot V_{\text{см}}^{\text{д}} + r \cdot K_{O_2 \text{газов}}^{\text{д}} \cdot V_{\text{см}}^{\text{д}}, \quad (5)$$

$$V_{O_2}^{\text{т}} = V_0 \cdot K_{O_2 \text{возд}}, \quad (6)$$

где $K_{O_2 \text{возд}}^{\text{д}}$, $K_{O_2 \text{газов}}^{\text{д}}$ — объемные доли содержания кислорода в воздухе (0,21) и в отработавших газах дизеля (0,1) по результатам газового анализа;

$$K_{O_2 \text{возд}}^{\text{д}} = \frac{V_{O_2 \text{возд}}^{\text{д}}}{V_{\text{рецид.д}}^{\text{д}}}, \quad (7)$$

$$K_{O_2 \text{газов}}^{\text{д}} = \frac{V_{O_2 \text{газов}}^{\text{д}}}{V_{\text{рецид.газ}}^{\text{д}}}. \quad (8)$$

r — степень замещения воздуха отработавшими газами, определяемая по формуле

$$r = \frac{V_{\text{рецид.газ}}^{\text{д}}}{V_{\text{см}}^{\text{д}}}, \quad (9)$$

где $V_{\text{см}}^{\text{д}}$ — расход смеси отработавших газов и воздуха.

$$V_{\text{см}}^{\text{д}} = V_{\text{возд}}^{\text{д}} = V_{\text{рецид.газ}}^{\text{д}} + V_{\text{возд}}^{\text{рецид.д}}, \quad (10)$$

$V_{\text{рецид.газ}}^{\text{д}}$ — расход отработавших газов дизеля;
 $V_{\text{возд}}^{\text{д}}$, $V_{\text{рецид.возд}}^{\text{д}}$ — расходы воздуха для котла в автономном режиме и в смеси с отработавшими газами дизеля.

Теоретически необходимый расход воздуха для горения твердого топлива составляет

$$V_0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p, \quad (11)$$

где O^p , H^p , S^p , C^p — элементарный состав твердого топлива.

По формулам (4–11) для состава твердого топлива выполнены многовариантные расчеты коэффициента избытка кислорода для котла, работающего на смеси дутьевого воздуха и отработавших газов дизель-генератора АД-60/Т-400Р на номинальной нагрузке котла при значениях степени замещения воздуха отработавшими газами в диапазоне от 0 до 30 %.

Данные, приведенные на рис. 2, показывают, что при работе котла КВП-1,74 ВТКС в составе ДТЭС АКУ ВТКС предельно допустимое снижение коэффициента избытка кислорода в топке до 1,3 достигается при степени замещения воздуха отработавшими газами дизеля величиной, равной 30 %. Указанная степень замещения обеспечивается подачей отработавших газов

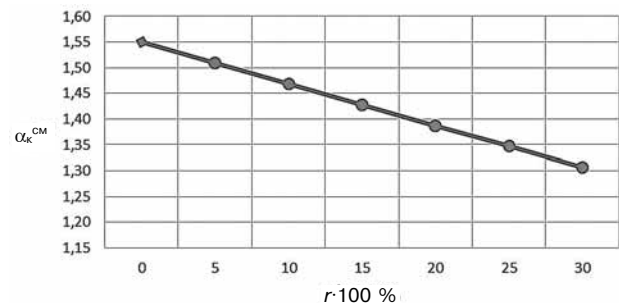


Рис. 2. Изменение коэффициента избытка кислорода α_k от степени замещения воздуха отработавшими газами дизель-генератора мощностью 60 кВт для котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной нагрузке

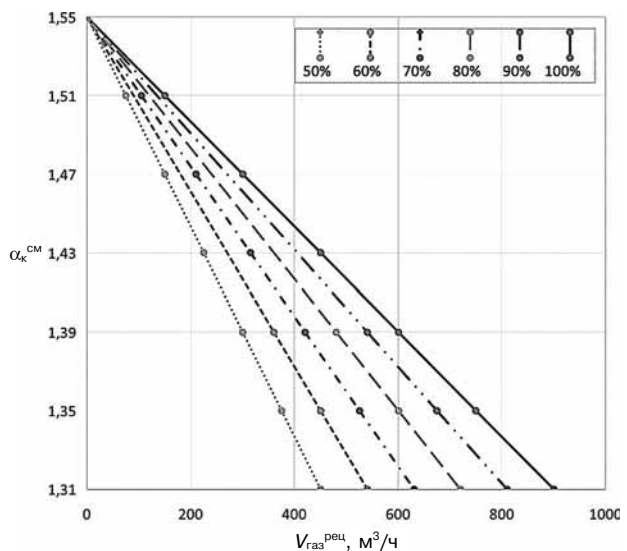


Рис. 3. Номограмма зависимостей коэффициента избытка кислорода α_k от объема замещения воздуха отработавшими газами дизель-генератора мощностью 60 кВт для котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной и долевых нагрузках (от 50 до 100 %)

дизеля в объеме 900–960 м³/ч, что соответствует работе дизель-генератора АД-60/Т-400Р на номинальной нагрузке. Результаты расчетов показали, что при работе котла КВП-1,74 ВТКС в составе ДТЭС АКУ ВТКС на долевых нагрузках степень замещения воздуха отработавшими газами дизель-генератора АД-60/Т-400Р, работающих с максимальной нагрузкой 60 кВт будет избыточной и приведет к недопустимому падению коэффициента избытка кислорода с соответствующим увеличением потерь теплоты от химической неполноты сгорания твердого топлива.

На рис. 3 приведены результаты определения максимально допустимой подачи отработавших газов дизеля в трубопровод дутьевого воздуха котла КВП-1,74 ВТКС в составе ДТЭС АКУ ВТКС при его работе на долевых нагрузках.

По аналогичной методике можно рассчитать значения коэффициента избытка кислорода для рециркуляции уходящих газов котла КВП-1,74 ВТКС с исходным содержанием кислорода в

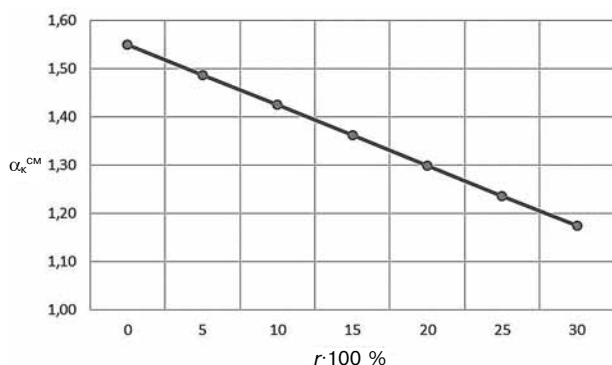


Рис. 4. Изменение коэффициента избытка кислорода α_K от степени рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной нагрузке

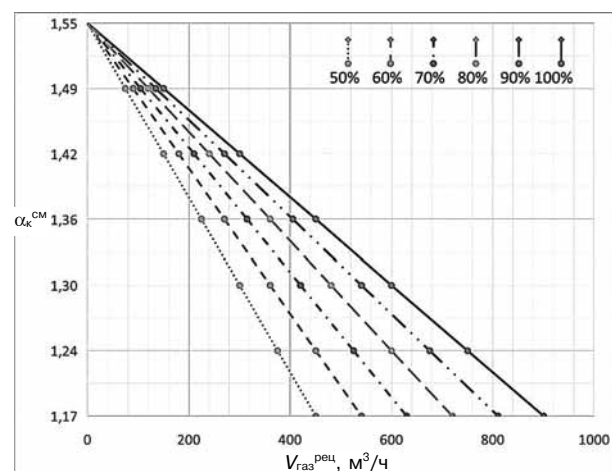


Рис. 5. Изменение коэффициента избытка кислорода α_K от объемов рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС при работе на долевых нагрузках (от 50 до 100 %)

уходящих газах 4 %, а также значения объемов рециркуляции на номинальных и долевых нагрузках (от 50 до 100 %).

Результаты расчетов приведены на рис. 4, 5.

Для решения задачи оценки экономии котельного топлива при работе котла в составе ДТЭС ВТКС необходимо определить расход твердого топлива для котла ВТКС в автономном режиме и с замещением воздуха отработавшими газами дизеля.

Расход B_1 твердого топлива с теплотой сгорания Q_p^H для котла ВТКС тепловой мощностью Q_1 , работающего в автономном режиме определяется по формуле

$$B_1 = \frac{Q_1}{\eta_1 \cdot Q_p^H}. \quad (12)$$

При использовании котлоагрегата в составе ДТЭС с АКУ ВТКС выхлопные газы дизель-генератора в объеме V_r направляются в топку котла и вносят дополнительное количество теплоты $Q_{г.вых}$. Расход топлива котлом B_2 при этом сокращается на величину, равную количеству топлива, при сжигании которого выделилось бы такое же количество теплоты, которое было внесено отработавшими газами ДВС. При этом КПД и тепловая мощность котлоагрегата остаются неизменными и равными η_1 и Q_1 соответственно.

Тогда расход топлива B_2 при работе котла с замещением воздуха отработавшими газами дизеля можно определить по формуле

$$B_2 = \frac{Q_1 - Q_{г.вых}}{\eta_1 \cdot Q_p^H}, \quad (13)$$

$$Q_{г.вых} = V_r \cdot c \cdot t, \quad (14)$$

где c — средняя теплоемкость отработавших газов дизеля, ккал/м³/ч; t — температура отработавших газов дизеля, 450 °С.

Экономия ΔB котельного топлива при работе котла ВТКС с замещением воздуха отработавшими газами дизеля можно определить по формуле

$$\Delta B = B_1 - B_2. \quad (15)$$

Если в формуле (15) заменить B_1 и B_2 их значениями из формул (12) и (13) соответственно, то величину ΔB можно определить по формуле

$$\Delta B = \frac{Q_{г.вых}}{\eta_1 \cdot Q_p^H}. \quad (16)$$

В процентном выражении величину экономии котельного топлива при работе котла ВТКС совместно с дизелем можно определить по формуле

$$\Delta B\% = \frac{\Delta B}{B_1} \cdot 100\%. \quad (17)$$

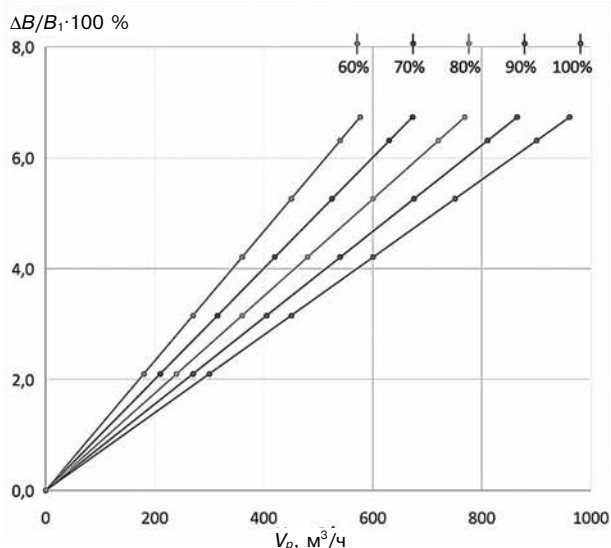


Рис. 6. Изменение экономии твердого топлива (в %) от объема замещения воздуха отработавшими газами при работе на номинальной и долевых нагрузках котла

Результаты расчетов экономии котельного топлива при работе котла КВП-1,74 ВТКС с замещением воздуха отработавшими газами дизель-генератора АД-60/Т-400Р приведены на рис. 6. Они показывают, что при работе ДТЭС АКУ ВТКС возможно получить экономию котельного топлива до 7 %.

На рис. 7 приведен аналогичный график зависимостей экономии котельного топлива (в %) от объема рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной и долевых нагрузках котла, из которого следует что экономия котельного топлива может составлять

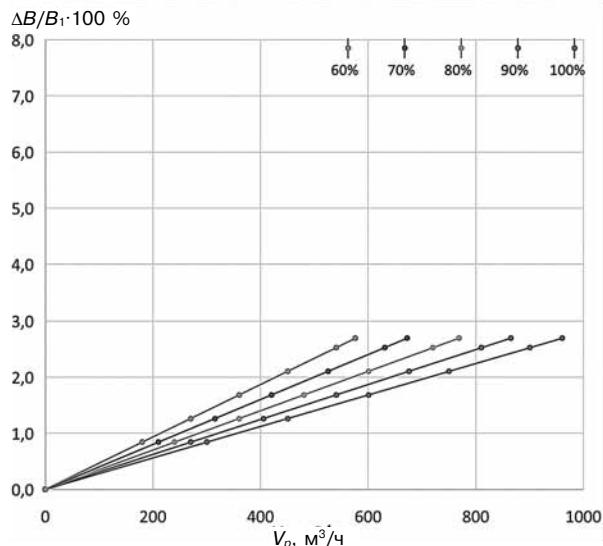


Рис. 7. График зависимостей процента экономии топлива котла от объема рециркуляции уходящих газов котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальной и долевых нагрузках котла

до 2,8 %, что значительно ниже, чем при совместной работе котла и дизель-генератора. Это можно объяснить тем, что температура газов на выходе из котла составляет 180 °С, а на выходе из дизель-генератора — 450 °С.

Для подтверждения выполненных расчетов планируется провести экспериментальные исследования на установке ДТЭС АКУ ВТКС и на котле КВП — 1,74 ВТКС с рециркуляцией уходящих газов на учебно-исследовательской котельной на учебном полигоне ВИ(ИТ) ВА МТО.

Литература

1. Юферев Ю.В., Смирнов А.В., Синатов С.А. Перспективы развития дизельных теплоэлектростанций с активными котлами-утилизаторами // Водоснабжение и санитарная техника. — 1991. — № 6. — С. 7–8.
2. Юферев Ю.В., Смирнов А.В., Синатов С.А. Оценка надежности дизельной теплоэлектростанции с АКУ. // Двигателестроение. — 1989. — № 2. — С. 17–19.
3. Антонович Д.В., Юферев Ю.В., Смирнов А.В. Особенности работы котла-утилизатора с кипящим слоем на отходящих газах ДВС. В сб. «4-й международный конгресс по тепломассообмену». Минск: Изд-во ИТМО. — Т. 3. — С. 105–107.
4. Синатов С.А., Юферев Ю.В., Смирнов А.В. Перспективы развития дизельных теплоэлектростанций

с активными котлами утилизаторами. // Водоснабжение и санитарная техника — 1991. — № 6. — С. 7–8.

5. Смирнов А.В., Бондарев А.В., Рода И.С., Карпов М.А. Практический опыт проектирования, строительства и реконструкции угольных котельных малой мощности по технологии высокотемпературного кипящего слоя // Инженерные системы. — 2006. — № 4 (25). — С. 8–12.

6. Смирнов А.В., Александров С.В., Бондарев А.В. Силловая установка с активным котлом утилизатором высокотемпературного кипящего слоя. Патент на изобретение. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 06.04.2018 г. №2650018 С1, бюл. № 10.

АВТОМАТИЗАЦИЯ УГОЛЬНЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ТОПКАМИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПЯЩЕГО СЛОЯ И РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

А.В. Бондарев, к.т.н., Э.В. Болбышев, инженер,
ВА МТО, Санкт-Петербург
А.В. Смирнов д.т.н., ВИ(ИТ), Санкт-Петербург

Рассмотрены перспективы применения и основные направления повышения эффективности твердотопливных котлов малой мощности, работающих по технологии высокотемпературного кипящего слоя (ВТКС). Для повышения устойчивости работы котлов с ВТКС и рециркуляцией дымовых газов на установившихся и переходных режимах разработана система автоматического регулирования процесса горения твердого топлива на базе многоканального программируемого контроллера. Рабочие параметры автоматизированных котлов с ВТКС усовершенствованной конструкции и их динамические характеристики при работе на переходных режимах исследованы методами численного моделирования с использованием разработанной математической модели. Показано, что процесс горения твердого топлива в котлах ВТКС с рециркуляцией дымовых газов, в сравнении с котлами без рециркуляции, характеризуется улучшенными параметрами переходных процессов, а именно сокращением времени запаздывания на возмущающие воздействия, меньшей продолжительностью переходных процессов при оптимальных значениях коэффициента избытка воздуха в диапазоне от 1,15 до 1,25.

Теплоснабжение небольших городов, населенных пунктов и объектов различных ведомств в России обеспечивается от котельных малой мощности. Их количество достигает десятков тысяч. В основном это твердотопливные котельные, большинство которых построено в 60–80 годах XX в. и укомплектованы чугунными секционными и стальными котлами устаревших конструкций с топками ручного обслуживания. В них отсутствует механизация и автоматизация технологических процессов, эффективные системы газоочистки, основное оборудование значительно изношено и морально устарело.

Угли, поставляемые на твердотопливные котельные малой мощности, характеризуются низкой теплотворной способностью и высоким содержанием внешнего

балласта. В результате работа котлов сопровождается пониженной эффективностью сжигания твердого топлива, что приводит к снижению эффективности, высоким эксплуатационным затратами и неудовлетворительным экологическим показателям. Эксплуатация твердотопливных котельных характеризуется тяжелым ручным трудом обслуживающего персонала в условиях запыленных и загазованных помещений.

Перспективным направлением совершенствования твердотопливных котельных малой мощности является применение технологии высокотемпературного кипящего слоя (ВТКС).

В настоящее время на кафедре двигателей и тепловых установок Военного института (инженерно-технического) Военной Академии материально-технического обеспечения имени А.В. Хрулева (ВИ(ИТ) ВА МТО) накоплен значительный опыт разработки и промышленного изготовления высокоэффективных котлоагрегатов КВП-1,74-ВТКС, а также опыт проектирования, строительства и реконструкции угольных котельных с применением таких котлов [1, 4].

Применяемая в котле технология ВТКС позволяет достичь высоких экономических, технологических и экологических показателей:

- эффективность выгорания топлива составляет 95–98 %;

- коэффициент полезного действия котлоагрегата достигает 80–83 %;

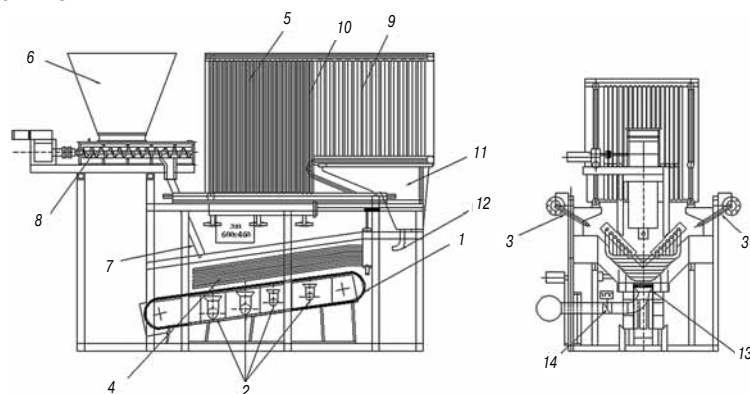


Рис. 1. Конструктивная схема модернизированного котла ВТКС с улучшенными характеристиками топочных процессов

➤ минимальные значения выбросов оксида азота, золовых и сажи веществ за счет внутритопочных методов их подавления (NO_x 170–220 мг/нм³; SO_2 3,8–4,3 мг/нм³; CO 0,8–1,2 мг/нм³, твердые частицы 1,7 мг/нм³).

Наряду с положительными результатами в ходе экспериментальных исследований выявлен ряд недостатков, которые препятствуют устойчивой работе котла ВТКС на статических и динамических режимах. Для устранения данных недостатков на кафедре разработана усовершенствованная конструкция котла ВТКС, на которую получен патент № 170747 «Котлоагрегат для сжигания твердого топлива в кипящем слое» [6].

В данной конструкции, наряду с прежними конструктивными элементами, подвижной колосниковой решеткой прямого хода 1, дутьевыми зонами первичного 2 и вторичного дутья 3, панелью охлаждения 4, газоплотными водотрубными секциями 5, 9, топливным бункером 6, наклонной плитой 7, перегородкой 10 из жаропрочной стали, бункером возврата уноса 11 с эжектором возврата уноса 12, применены новые конструктивные решения:

1. Рециркуляция дымовых газов 14 — для снижения температуры горения и предотвращения шлакования решетки.

2. Питатель шнекового типа 8 — для обеспечения равномерной (непорционной) подачи топлива и повышения устойчивости горения на установившихся режимах работы и качества переходных процессов на динамических режимах.

3. Воздуховоды в зонах вторичного дутья в виде щелевых сопел 3 — для создания более плотной воздушной завесы мелким фракциям топлива и уменьшения потерь теплоты от

механической неполноты сгорания топлива вследствие уноса.

4. Воздуховод в зоне первичного дутья под колосниковой решеткой изогнут до вертикального положения — для предотвращения смещения потока первичного воздуха в сторону и возникновения кратерного горения.

5. В надрешеточную поверхность нагрева добавлена дополнительная трубная секция 4 —

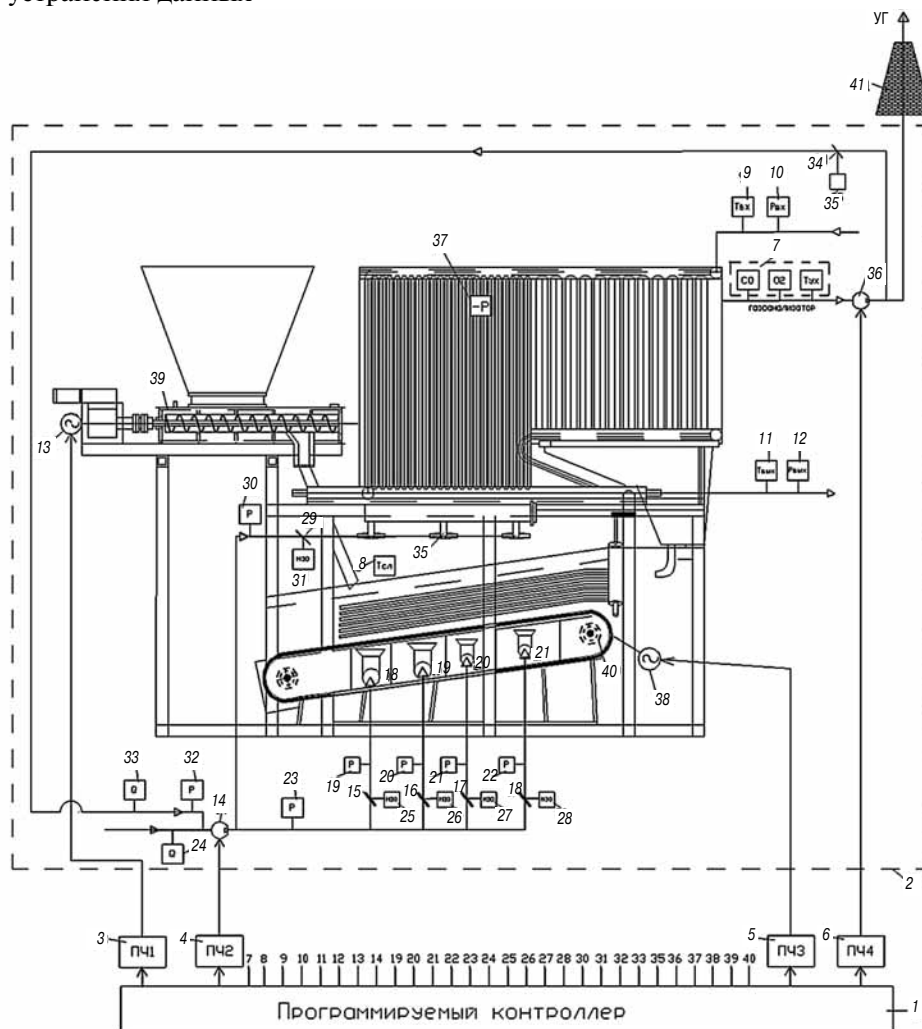


Рис. 2. Схема автоматизации котла ВТКС с рециркуляцией дымовых газов:

1 — программируемый контроллер; 2 — котлоагрегат с рециркуляцией уходящих газов; 3, 4, 5 и 6 — исполнительные механизмы с частотно-регулируемыми приводами; 7 — газоанализатор; 8 — датчик температуры кипящего слоя; 9, 10 — датчики температуры и давления воды на входе в котлоагрегат; 11, 12 — датчики температуры и давления воды на выходе из котлоагрегата; 13 — привод питателя; 14 — вентилятор для воздушной смеси; 15, 16, 17 и 18 — шибера для регулирования позонного первичного дутья; 19, 20, 21, 22 — датчики давления позонного первичного дутья; 23 — датчики давления (общего) первичного дутья; 24 — датчик расхода воздуха; 25, 26, 27 и 28 — исполнительные механизмы с электроприводом шибера регулирования позонного первичного дутья; 29 — шибера регулирования вторичного дутья; 30 — датчик давления вторичного дутья; 31 — исполнительный механизм с электроприводом шибера регулирования вторичного дутья; 32 — датчик давления рециркуляции уходящих газов; 33 — датчик расхода рециркуляции уходящих газов; 34 — шибера регулирования рециркуляции уходящих газов; 35 — исполнительный механизм электроприводом шибера регулирования уходящих газов; 36 — дымосос; 37 — датчик разряжения; 38 — привод колосниковой решетки; 39 — питатель топлива; 40 — колосниковая решетка; 41 — дымовая труба

для обеспечения оптимального теплосъема от кипящего слоя и стабилизации температуры.

Таким образом, предлагаемые конструктивные решения позволяют осуществить устойчивый режим работы котла на статических и динамических режимах.

Для обеспечения работы котла ВТКС в автоматическом режиме было разработано техническое решение «Система автоматического регулирования процесса горения котлоагрегата для сжигания твердого топлива в кипящем слое с рециркуляцией уходящих газов» (заявка на изобретение № 2018118920 от 22.05.2018). Схема такого решения приведена на рис. 2, где показано, что в программируемом логическом контроллере предусмотрен канал рециркуляции уходящих газов, соединенный с датчиком температуры кипящего слоя, исполнительным механизмом регулирования рециркуляции уходящих газов, датчиками контроля и безопасности на линии первичного дутья и рециркуляции.

Для подтверждения работоспособности конструктивного решения котла ВТКС с рециркуляцией дымовых газов проведены теоретические исследования переходных процессов.

Существует ряд аналитических моделей переходных процессов в котлах средней и большой мощности с топками НТКС и ЦКС, известны ряд моделей переходных режимов работы в котлах малой мощности с топками ВТКС при сжигании угля [2, 3], но в данных моделях не учитывается процесс рециркуляции уходящих газов и применение существующих моделей для новой конструкции котла представляется некорректным ввиду особенностей топочных устройств высокотемпературного кипящего слоя и инерционности их рабочих процессов.

Для моделирования переходных процессов котла ВТКС с рециркуляцией дымовых газов за основу принята известная математическая модель, разработанная Карповым М.А. [2].

Входными параметрами модели являются конструктивные параметры топочной камеры, физические свойства, расходы и температуры топлива и воздуха. Дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы в топке ВТКС, имеют вид:

$$M \cdot c_i \cdot \frac{dt_b}{dt} = V \cdot S^* \cdot Q_k \cdot j \cdot z - V \cdot S^* \cdot Q_2 \cdot j_2 \cdot z - B \left(1 - \frac{W^r}{100} - \frac{V^r}{100} \right) c_k (t_b - t_n) - B \frac{W^r}{100} \times - \quad (1)$$

$$\cdot w_{cm} \cdot F \cdot c_r \cdot (t_b - t_n) - k_n \cdot F_n \cdot (t_b - t_n) + \beta_n \cdot Q_n \cdot B \cdot \frac{V^r}{100};$$

$$V \cdot \rho_k \cdot \frac{dz}{dt} = B - V \cdot S^* \cdot j \cdot z; \quad (2)$$

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_r}{\delta}; \quad (3)$$

$$\alpha_\lambda = 6,53 \sigma \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_r \cdot T. \quad (4)$$

Переходные процессы описываются системой дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями для концентрации горючих $z[\tau]$ и температуры $tb[\tau]$. После интегрирования системы уравнений методом Коши получаем:

$$fz(\tau) = \frac{B}{jSV} \left(-e^{-\frac{jS\Phi}{\rho_k}} + 1 \right) + z_0 e^{-\frac{jS\tau}{\rho_k}}; \quad (5)$$

$$f\tau_b = \frac{BQ_i^r}{w_{cm} \cdot F_b \cdot c_r + k_n \cdot F_n} + \frac{1}{\left(-k_n \cdot F_n + w_{cm} \cdot F_b \cdot c_r + \frac{jSC_m M}{\rho_k} \right)} X \quad (6)$$

$$\left(e^{\frac{jS\tau}{\rho_k}} (BQ_i^r - jQ_i^r SV z) + e^{\frac{(k_n F_n + w_{cm} F_b c_r)}{c_m M}} \left(t_{b0} \left(-k_n \cdot F_n + w_{cm} \cdot F_b \cdot c_r + \frac{jSC_m M}{\rho_k} \right) Q_i^r SV(z_0) - \frac{BjQ_i^r SC_m M}{(k_n \cdot F_n + w_{cm} \cdot F_b \cdot c_r) \rho_k} \right) \right)$$

где M — масса слоя, кг; c_i, c_k, c_r — теплоемкость материала слоя, коксового остатка, продуктов сгорания Дж/кг К; t_b, t_n, t_n, t_n — температура частиц в слое, начальные температуры воздуха, топлива, температура тепловоспринимающей среды, К; V — объем кипящего слоя, м³; S — удельная поверхность реагирования частиц, 1/м; Q_k, Q_n — теплота сгорания коксового остатка и летучих частиц, ккал/кг; j, j_2 — удельный поток реагирующего углерода с кислородом и диоксидом углерода, кг/(м²с); z — концентрация горючих в слое, %; β_n — доля летучих передавшая теплоту слою; B — расход топлива, кг; V^r — выход летучих в рабочем состоянии, %; W^r — влажность топлива в рабочем состоянии, %; k_n — коэффициент теплопередачи в кипящем слое, Вт/(м²К); w — скорость сгорания газовой смеси на свободное сечение, м/мин; F_b — площадь попе-

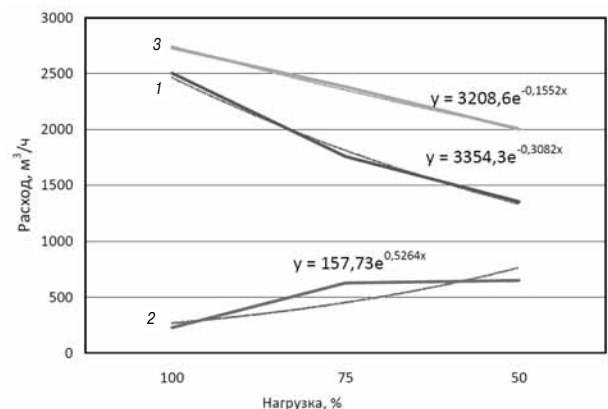


Рис. 3. Функциональные зависимости изменения расходов от нагрузки котла:

1 — изменение расхода воздуха; 2 — изменение расхода газов рециркуляции; 3 — изменение расхода газовой смеси

речного сечения топки, м^2 ; F_n — площадь поверхности теплообмена, м^2 ; ρ_k — плотность коксовых частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Отличительной особенностью данной модели с рециркуляцией дымовых газов является то, что в уравнении (1) теплового баланса включена составляющая расхода газовой смеси, учитывающая дополнительное количество тепла, внесенного в топку котла $w_{\text{см}} \cdot F \cdot c_f \cdot (t_b - t_b)$ с газами рециркуляции; дополнительной особенностью является то, что при составлении уравнений теплового и материального баланса теплота, выделяющаяся за счет сгорания топлива, раскладывается из теплоты сгорания коксового остатка и летучих частиц, затрачивается на подогрев коксового остатка, испарение влаги,

теплоотвод к поверхностям теплообмена и на подогрев продуктов сгорания до температуры слоя.

По разработанной математической модели с использованием программного обеспечения «Mathematica» выполнен расчет основных параметров переходных процессов при изменениях расходов топлива и газовой смеси.

На рис. 3 показаны расчетно-экспериментальные зависимости расходов воздуха, газов рециркуляции и газовой смеси в зависимости от нагрузки котлоагрегата КВП-1,74 ВТКС на номинальных и долевых режимах работы.

В результате численного решения данных дифференциальных уравнений определяется изменение температуры слоя в зависимости от различных возмущений — изменения подачи

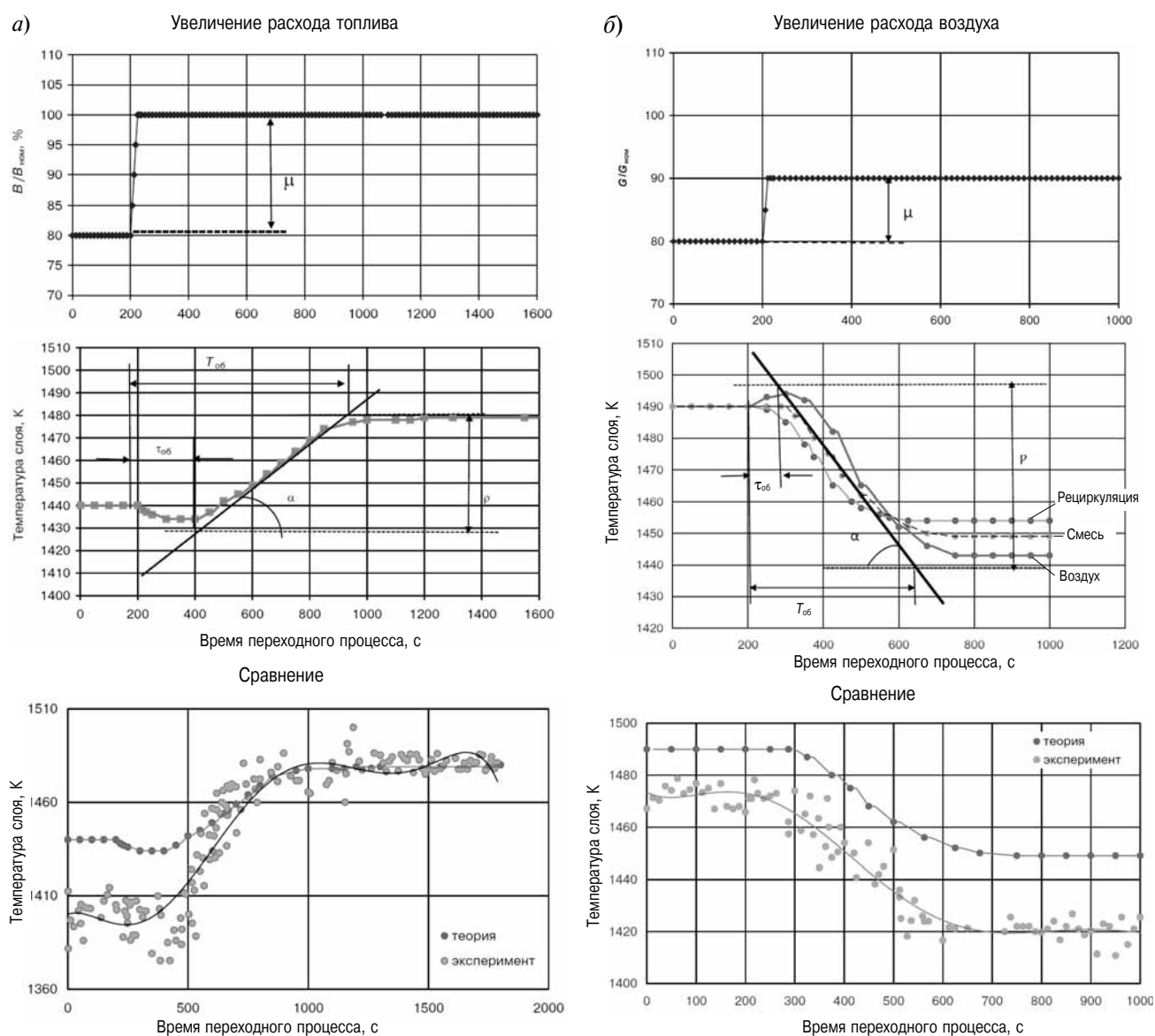


Рис. 4. Изменение температуры слоя при различных возмущающих воздействиях:

а — изменение температуры слоя при увеличении расхода топлива; б — изменение температуры слоя при увеличении расхода газовой смеси

топлива или воздуха. Расчеты выполнены для сжигания угля следующего фракционного состава: содержание углерода $C_p = 0,565$, водорода $H_p = 0,04$, серы $S_p = 0,05$, кислорода $O_p = 0,011$, азота $N_p = 0,015$, зольность $A_p = 0,095$, влажность $W_p = 0,17$, выход летучих $V_p = 0,46$.

В качестве примера на рис. 4 показана реакция котла на ступенчатое изменение расхода топлива от постоянного значения в заданный момент времени до постоянного значения по линейному закону в течение заданного промежутка времени Δt . На графиках представлены изменения температуры слоя при увеличении расхода топлива от 80 до 100 %. Также показана реакция котла на ступенчатое изменение расхода газовой смеси от постоянного значения $G_{ном}$ в заданный момент времени τ до постоянного значения G по линейному закону в течение заданного промежутка времени Δt . На графиках представлено изменение температуры слоя при увеличении расхода газовой смеси от 80 до 90 %. На рис. 4 также приведены графики переходных режимов работы котла малой мощности с высокотемпературным кипящим слоем КВП-1,74 ВТКС при изменении расхода топлива и воздуха без рециркуляции, полученные в диссертационной работе Проскурякова Д.А. [3].

При увеличении расхода топлива в начале переходного процесса наблюдается некоторое снижение температуры слоя из-за увеличения расхода тепла на испарение влаги и прогрев топлива. Затем температура возрастает по мере увеличения концентрации горючего в объеме слоя.

Увеличение расхода газовой смеси приводит к снижению температуры кипящего слоя в связи с увеличением доли тепла, расходуемого на нагрев большего количества воздуха, поступающего в топку.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что инерционность процесса при увеличении (уменьшении) подачи топлива в среднем в 1,5 раза (а продолжительность в 2 раза) выше, чем при изменении расхода воздуха. Этот

факт объясняется тем, что возмущения при изменении подачи топлива или воздуха по-разному влияют на изменение содержания горючих в кипящем слое, изменяется также и количество теплоты, вносимое в топку с данными средами.

Сравнительный анализ протекания переходных процессов в угольных котлах с рециркуляцией дымовых газов и без нее показывает улучшение качества основных динамических параметров, времени запаздывания $\tau_{об}$, разгона объекта $T_{об}$, коэффициента самовывравнивания $\rho_{об}$ при работе с рециркуляцией. Время запаздывания $\tau_{об}$ и коэффициент самовывравнивания $\rho_{об}$ значительно уменьшаются, так как в топку подается газоз-душная смесь с температурой 80–90°C. В результате уменьшается инерционность и продолжительность переходного процесса в среднем в 1,5 раза.

Выводы

1. В результате выполненных расчетов с использованием разработанной математической модели установлено, что горение топлива в котлах ВТКС с рециркуляцией дымовых газов на динамических режимах характеризуется улучшением качества переходных процессов по показателям времени запаздывания, времени разгона и коэффициента самовывравнивания, при оптимальном значении коэффициента избытка воздуха 1,15–1,25, в отличие от топок без рециркуляции, в которых значение коэффициента находится в пределах от 1,6–1,8 [3].

2. Установлен характер влияния возмущающих воздействий на температуру кипящего слоя, а также характер изменения режимных параметров топки ВТКС котла малой мощности с использованием рециркуляции уходящих газов при сжигании угля.

3. Полученные результаты могут быть использованы для разработки алгоритмов автоматического регулирования процесса горения в топке ВТКС с рециркуляцией дымовых газов угольного котла малой мощности и заложены в программируемый контроллер для автоматизированного управления топочными процессами.

Литература

1. 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).
2. Смирнов А.В., Карпов М.А. и др. Автоматизация котлов малой мощности с топками высокотемпературного кипящего слоя // Стройпрофиль. — 2004. — № 3(33).
3. Смирнов А.В., Проскуряков Д.А. и др. Экспериментальные исследования сжигания твердого топлива в котле малой мощности с топкой высокотемпературного кипящего слоя на переходных режимах работы // Инженерные системы. — 2009. — № 1(38). — С. 34–39.

4. Бондарев А.В., Морозов Б.И., Смолинский С.Н. Оценка технико-экономической эффективности реконструкции систем теплоснабжения с применением угольных котлов высокотемпературного кипящего слоя // Двигателестроение. — 2017. — № 4 (270). — С. 34–40.

5. Карпов М.А., Смирнов А.В., Юферев Ю.В., Воронов В.Ю., Кныш С.А. Котлоагрегат для сжигания угля в кипящем слое. Патент на полезную модель. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 20.05.2004 г. №38041. Бюл. № 14.

6. 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.

МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГЕОМОДИФИКАТОРОВ ТРЕНИЯ

А.В. Дунаев, к.т.н., с.н.с., «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Москва
И.Ф. Пустовой, инженер, ООО «РеалИнПроект», Санкт-Петербург

Для безразборного ремонта изношенных сопряжений трения различной гражданской и военной техники используются различные триботехнические составы. В России наиболее востребованы отечественные высокодисперсные порошки минералов группы серпентина — слоистые гидросиликаты или геомодификаторы трения (ГМТ). Технологии приготовления и эффективного применения ГМТ отработаны хорошо, но механизм образования триботехнических покрытий с помощью ГМТ в маслах, смазках и даже без них полностью не выяснен. Создание гипотезы образования триботехнических покрытий является целью настоящего исследования. Гипотеза предлагает следующий процесс образования трибопокрытий: активацию частиц минералов, абразивное открытие ими ювенильной, каталитически активной поверхности металлов; образование на активной поверхности металлов минеральной структуры; трибополимеризацию на минеральной структуре компонентов среды; наращивание покрытия без серпентинов и без масла адсорбцией углекислого газа уникально активными атомами углерода, возбуждаемыми трением.

Введение

За 25 лет развития Российской технологии «безразборного ремонта» практически любых узлов трения за счет ввода в смазку высокодисперсных порошков минералов группы серпентина, названных геомодификаторами трения (ГМТ), была показана ее эффективность и высокая рентабельность [1]. ГМТ-технология апробирована на миллионе изделий гражданского и военного машиностроения в РФ и за рубежом. Продолжается ее использование и развитие в Японии, Финляндии, Китае, Германии, Чехии. Ее апробация проведена во многих странах Европы, Азии, Латинской Америки. Эффективность этой технологии в прикладном плане очевидна, в то время как механизм работы геомодификаторов, несмотря на глубокие исследования, выполненные в Китае, Франции, Финляндии, России (РГУ им. И.М. Губкина), раскрыт лишь частично. Это породило несколько противоречивых гипотез.

Цель исследования

Цель исследования — создание гипотезы, объясняющей механизм образования триботехнических покрытий при вводе в масла серпентиновых трибосоставов — слоистых гидросиликатов магния, никеля, железа основной формулы $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ с незначительными примесями.

Анализом выявлено [1], что ранние гипотезы образования ГМТ-покрытий нагартовкой, образованием металлокерамики, диффузией компонентов серпентинов, ионообменом металлов и другие не состоятельны, так как не соответствуют свойствам и характеристикам покрытий:

- на их поверхностях до 90 % углерода ([1], рис. 1–3), мало исходных компонентов ГМТ и железа; скорость образования покрытия возрастает с введением углеродной сажи; ИК-спектроскопией в покрытии показаны связи C–H, C=O, C–O–C, O–H и немного ароматиков [2–4]; сопротивление 10–12 Ом/см; даже при незначительном воздействии электрического тока покрытие сгорает;

- стекловидная прозрачность, зеркальная чистота 14-го класса ($R_a \approx 0,07$ мкм [2], рис. 4, 5), высокие показатели микротвердости и антифрикционности [1, 2], оранжево-золотистый цвет, окрашиваемость [5], стойкость к травлению раствором азотной кислоты, нарастающая во времени прочность связи с подложкой, гидрофобность (угол смачивания водой 58°, на стали — 12° [5]), полярнее минерального масла (угол смачивания при нанесении тонкого слоя масла 85°), не смывается растворителями, окрашивается красителями.

Предпосылки к созданию гипотезы механизма образования ГМТ-покрытий

Кроме вышеприведенных свойств покрытий, следует учитывать условия их образования по показателям давления и температуры [1]: так, толщина покрытия на деталях ДВС — до 15 мкм, на шейках кривошипа тяжелых прессов — до 100 мкм, на зубьях шестерен (по данным ВМА им. Н.Г. Кузнецова и НПИФ «Энион-Балтика») — 200, 300, 600 и 1000 мкм; в стволах орудий при высоком давлении и температуре рост покрытий идет очень быстро, а при низких температурах воздуха ГМТ обработка узлов трения ДВС затруднена.

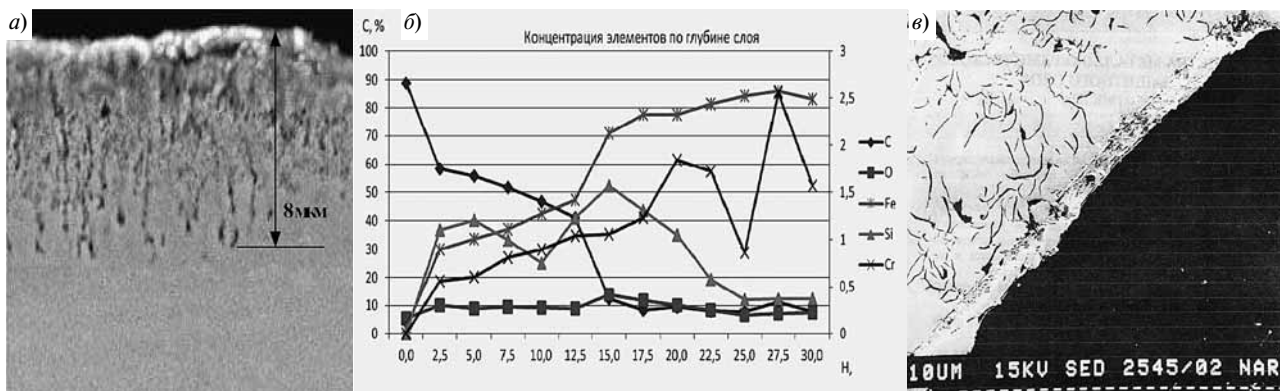


Рис. 1. Характеристики ГМТ-покрытия:

a — микрошлиф (4000х) среза гильзы цилиндра дизеля 16V280Z Китайского тепловоза DF-11 с пробегом 150 тыс. км после двойной обработки трибосоставами РВС; *б* — изменение химсостава покрытия по глубине покрытия по данным химического Центра Хельсинки (график Пустового И.Ф.): на поверхности преобладает углерод; *в* — шлиф гильзы цилиндров ДВС а/м «Волга» из ферритно-перлитного чугуна с некачественным трибопокрытием 25–50 мкм из-за загрязненного масла (обработка ДВС Пустовым И.Ф. при пробеге а/м 160 тыс. км, эксплуатация без масла в ДВС до 180 тыс. км, анализ шлифов в НПО «Прометей»)

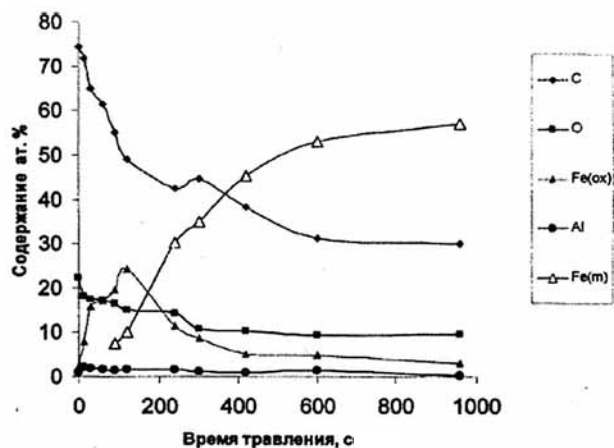


Рис. 2. Выявление травлением изменение элементного состава углеродсодержащего покрытия, образованного в трибопроцессе с алюминийсодержащей смазочной композицией по данным проф. Пичугина В.Ф. [3] (наверху поверхности трения преобладает углерод)

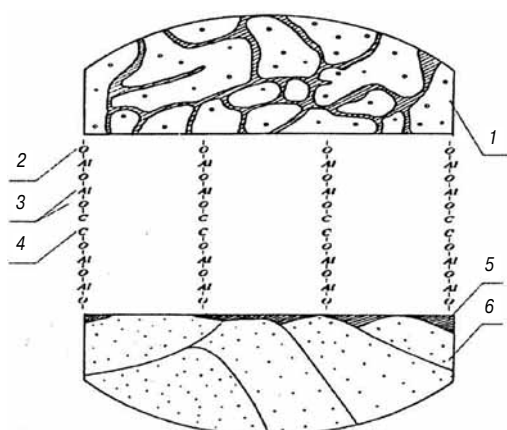


Рис. 3. Состав и строение покрытия на поверхностях пары антифрикционный сплав—сталь, работавшей в глицерине по данным проф. В.Ф. Пичугина [4]:

1 — сплав алюминия; 2 — кислород; 3 — окислы алюминия; 4 — углерод; 5 — алюминиевый сплав; 6 — сталь.

Примечание: сверху обеих деталей — углеродная пленка

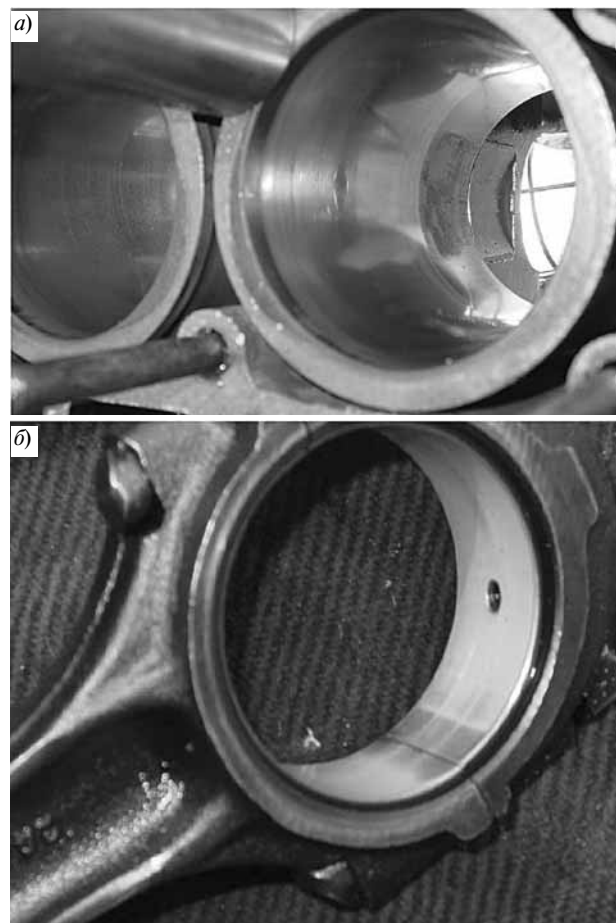


Рис. 4. Детали ДВС 3М3-402 а/м ГАЗ-31029 «Волга» с пробегом 690 тыс. км, обработанного Рыжовым В.Г. при пробеге 110 тыс. км составом РВД:

a — чугунные гильзы цилиндров; *б* — подшипник нижней головки шатуна

В то же время известен эффект трибоплазмы, обуславливающий полимеризацию компонентов трибосреды и формирование прозрачных углеродных алмазоподобных пленок «DLC-films»

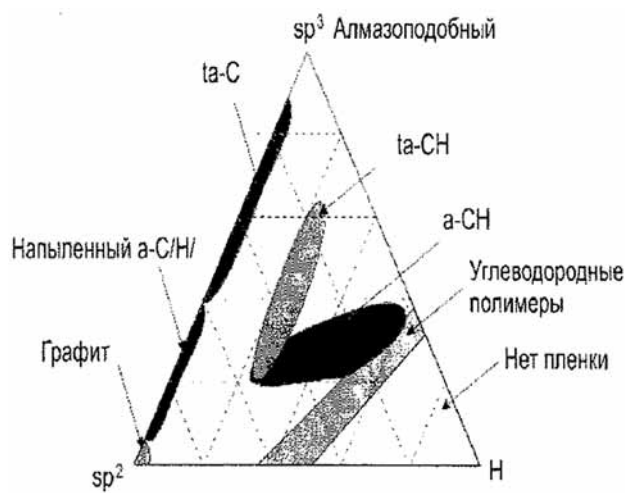


Рис. 5. Представление об образовании алмазоподобных углеродных пленок (DLC-films):

a — трехфазная диаграмма Робертсона и Феррари областей образования соединений с sp^2 - и sp^3 -типовыми гибридизациями углерода в зависимости от концентрации водорода и углерода; *б* — гидрокомпенсатор ГРМ дизеля MAN с алмазграфитной пленкой (обработан Соколом С.А.)

Примечание: В свете механизма образования DLC-films понятна по Павлову О.Г. наибольшая эффективность ГМТ на работавших маслах с добавлением углеродной сажи, что подтверждено Соколом С.А. на двух несколько различных ГМТ

гибридизацией атомов углерода (рис. 5). Показатели таких пленок: высокая микротвердость, например, на цилиндрической поверхности (рис. 5) гидрокомпенсатора по данным д.т.н. Острикова В.В. — 1840–1870 кгс/см², что на 50 % выше, чем у азотированной стали, а на нетрущемся торце 1220–1280 кгс/см²; низкий коэффициент трения, например, у пары сталь—сталь в синтетическом масле снижается на 30 %. Трибосоставы

Сокола С.А., которыми образовано покрытие на гидрокомпенсаторе (см. рис. 5), при испытаниях на трибометре TRB-S-DE по схеме палец—диск в масле М-10Г2К с давлениями 60–80 МПа обеспечивали коэффициент трения 0,027–0,030.

Зарубежные исследования углеродных алмазоподобных покрытий

Известны исследования лаборатории трибологии Пекинского университета Цинхуа [2] по заказу ТК «Неосфера» (Павлов О.Г., СПб). Здесь избирательной зонной дифракцией, атомной электронной спектроскопией и конфокальной Raman-спектроскопией выполнен анализ ГМТ-покрытия на гильзе цилиндра дизеля 16V280Z тепловоза DF-11, проведены лабораторные испытания ГМТ. Показано [2], что тонкоизмельченные смеси серпентинов (состав АРТ, к.б.н. Павлов О.Г.) способствуют:

- механохимическим реакциям, образованию ювенильных поверхностей и эмиссии частиц высоких энергий;
- пиролизу компонентов масел;
- трибокаталитической карбонизации, графитизации и образованию твердых углеродсодержащих соединений из масел.

Выявлено [2], что ГМТ-покрытия содержат: углерод (60–65 %, а на поверхности до 100 %); железо (15–17 %) — продукт изнашивания; кислород и водород трибохимических реакций; элементы из серпентина (Mg и Si) менее 1 %. Толщина покрытий от 5 до нескольких десятков мкм аморфно-кристаллической структуры. Подтверждены низкие значения коэффициента трения и теплопроводности, высокая прочность, микротвердость и коррозионная стойкость.

Трибопокрытие на гильзе цилиндра выделяется на подслой и слой с несколько различным элементным составом. Твердость Hv 1119 в два раза выше, чем у подложки, а шероховатость 0,0694 мкм, как у ультрагладкой зеркальной поверхности. Микротвердость (H) и модуль упругости Юнга (E) покрытия составляют 12,72 и 210 ГПа [2], а отношение (H/Э), как важный трибологический параметр, — 0,0606.

В лабораторных условиях [2] покрытие создавали на трибометре за 240 ч из того же состава АРТ концентрацией 1,6 г/л в масле классов SD/CC, SAE 40. После слива масла проведено трибоиспытание с давлением 14,3 кг/см², скоростью скольжения 0,1 м/с и покрытие обеспечило стабильно низкий коэффициент трения 0,005.

Покрытие, полученное на трибометре [2], аналогично исследованному выше, как анизотропная нанокристаллическая матрица из Fe₃C с рассредоточенными наночастицами чистого железа, оксида (Fe₃O₄) и перекиси железа (FeOOH). По

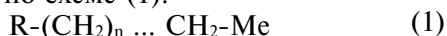
изображению на SEM это компактная структура толщиной 2 мкм без четко различимой границы с подложкой. Микротвердость также больше в два раза, чем на стали Ст45. А минимальная нанотвердость и максимальная упругость 13,32 и 240 ГПа с отношением Н/Е, равным 0,0555, также соответствуют высоким трибологическим свойствам покрытий [2]. Здесь обеспечены упругая деформация с эластичным микроконтактом, что исключает пластическую деформацию, адгезию аналогичных встречных поверхностей и их истирание. Этому способствуют слабые водородные связи наночастиц Fe_3O_4 и гидроксидов железа, рассеянных в матрице карбида железа Fe_3C , а также наноразмерность шероховатости зеркальной чистоты.

В то же время Раман-спектроскопия [2] шлифа гильзы цилиндра показала наличие равных по интенсивности D- и G-пиков эмиссии атомов углерода, т. е. аморфные нанозерна в покрытии вероятны из DLC-структур. Таким образом, в РФ [1, 3–5] и за рубежом [2] доказано, что серпентины вида $\text{Mg}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ устойчиво генерируют трибопокрытия в любых условиях.

Приведенные материалы Пекинского университета подтверждены аналогичными исследованиями во Франции.

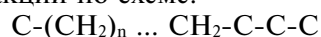
Однако возникает вопрос: каким образом противоадгезионные покрытия, поверхности которых значительно удаляются от подложки, как бы противоестественно, продолжают наращивание? Возможно, ответ на этот вопрос есть у Ахматова А.С., который в работе [6] обобщил механохимические воздействия на цепочечные молекулы углеводородов с разрывом их цепей и протеканием необычных химических реакций. Под действием больших локальных давлений нарушаются ковалентные связи с энергией 100 ккал/моль, разрываются связи C–C с энергией 80 ккал/моль и возникают свободные высоко-реакционно способные радикалы, например $\text{R}-\text{CH}_2\cdot$. С их образованием дальнейший ход реакций может быть различен [6].

Имеется вероятность и такого феномена, как возможность прямых химических реакций свободных радикалов с ювенильной поверхностью металлов [6] по схеме (1):



Ахматов А.С. указывал: «...механической деструкции могут подвергаться высокомолекулярные молекулы смазки... Именно этим частично объясняется смазочная способность неполярных углеводородов» [6]. Подтверждением этому неоднократно выявлялась трибодеструкция смазок с выделением водорода и метана, а также образование на активных частицах минералов и на точках поверхностей трения полимерных пленок.

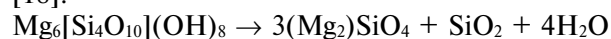
А возможны ли (?) на поверхностях ГМТ-пленок реакции по схеме:



Для ответа на этот вопрос приняты во внимание вышеприведенные свойства покрытий и их, по данным ГМТ-технологов, дальнейшее наращивание покрытия без ГМТ и даже без смазки. Это дает возможность предположить, что в начале с измельчением частиц ГМТ происходит их физико-химические преобразования и активация, абразивная очистка поверхностей трения минералами и открытие ювенильных поверхностей кристаллов. На них, как выявлено в работе [5], образуется минеральная сталагмитовая структура (рис. 6), а на ней, с возможным участием трибоплазмы (рис. 5), идет трибополимеризация компонентов среды в ГМТ-покрытие.

Такие предположения основаны на следующем. Известна идеальная кристаллохимическая формула серпентина $\text{Mg}_3[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$, но она не охватывает все его 28 разновидностей, так как Si может замещаться на Al, а Mg на Al, Mn^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Ni. Из разновидностей основными считаются антигорит (микрочешуйчатый листовый), лизардит (тонкозернистый) и хризотил (тонковолокнистый). Структура серпентина (рис. 7) составлена слоями из кремнекислородной, тетраэдрической и бруситоподобной октаэдрической сеток, сочлененных через общие вершины.

Доказана термическая деструкция такой структуры при 600 °С с затратами 336 кДж/моль на тонкодисперсные твердокристаллические форстерит Mg_2SiO_4 и кремнезем SiO_2 по реакции [18]:



Серпентин — самая мягкая (по Моосу 2,5–3,5 ед.) основа серпентинита и подобен гетеро-

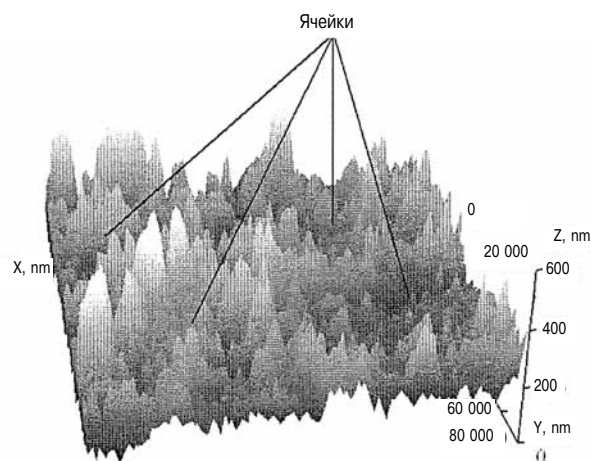


Рис. 6. Топография стальной поверхности после трения в смазочной композиции с ГМТ

(минеральная сталагмитовая структура выросла на гранях кристаллов, а на ней образуется ГМТ-покрытие [5]. Расчетная толщина покрытия 600 [5] до 1000 мкм)

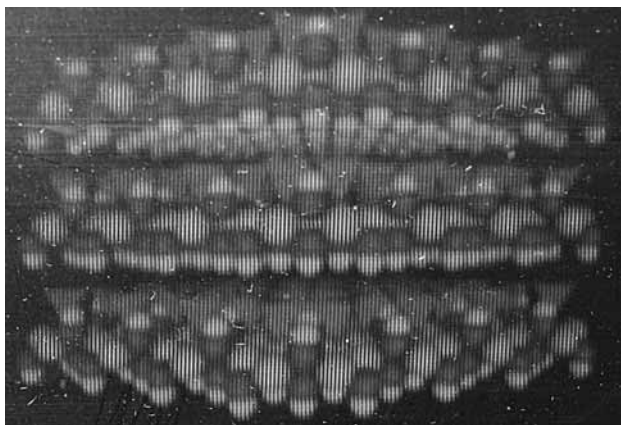
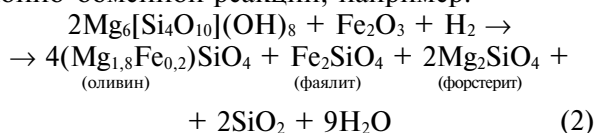


Рис. 7. Структура слоев химэлементов серпентина по Гольдберг и Romanosky (Национальная Лаборатория энергетической технологии, Питтсбург, Пенсильвания, США [51])

генной структуре антифрикционных сплавов. Но в его мягкой волокнистой основе есть твердые кристаллы кремнекислородных тетраэдров SiO_4 . Поэтому в трении происходит шаржирование поверхностей частицами ГМТ, что необходимо для ювенильности и формирования трибопленки. Без шаржирования частицы ГМТ невысокой твердости будут «загустителем» или «третьим телом» и их триботехническая роль проявится лишь через долгую работу, когда серпентин термически разложится на твердые частицы. Обычно же активированные измельчением и трением частицы вдавливаются во впадины микрорельефа деталей и благодаря теплу и ювенильности поверхностей участвуют в одной из 4-х известных ионно-обменной реакции; например:



Подобные реакции как раз и могут реализовываться с образованием минеральной сталагмитовой структуры, выявленной Д.Н. Любимовым [5].

С другой стороны полагаем, что наращивание углеродсодержащего ГМТ-покрытия даже в последующем отсутствии ГМТ продолжается за счет хемосорбции углеводородов смазки, а в сопряжениях на сухую — по данным МИИТ — даже с участием углекислого газа из окружающей среды благодаря трибоактивации поверхностей и неординарной химической активности атомов углерода [7] с их не скомпенсированными поверхностными связями, с возможной их sp^2 и sp^3 гибридизации.

Это, по-видимому, подтверждается фактом ускорения роста покрытий при вводе в ГМТ кузнечной сажи, образованием тех же углеродных пленок наноалмазными составами КАРАТ-М,

КАРАТ-5 и наноуглеродными волокнами «GRAF-SB» Красноярского ИХХТ СО РАН, где на поверхностях трибопар образуются цепочки Me-C-C-C [8].

Таким образом, можно гипотетически предположить следующие этапы образования ГМТ-покрытия:

- абразивная и кавитационная очистка частицами ГМТ поверхностей от окисных пленок и непрочных структур с открытием ювенильных, каталитически активных кристаллов; вывод загрязнений в масло и маслофильтры, что подтверждается многими РВС-технологиями;

- образование кристаллическими поверхностями трения и измельченными частицами серпентина минеральной наноразмерной структуры (см. рис. 6);

- трибополимеризация на остриях структуры аморфного микропористого покрытия [5], которое постепенно и прочно пришивается к подложке, а его олеофильность подтверждена измерениями и длительной работой моторов без масла;

- дальнейшее необъясненное наращивание покрытия без ГМТ и даже после слива масла.

Для объяснения последнего явления можно опереться на химические свойства углерода. Считается [7], что число валентных электронов углерода и число их валентных орбит одинаково, это одна из причин устойчивых связей атомов углерода между собой и с другими элементами. Образование между атомами углерода 4-х равнозначных связей способствует разнообразию углеродных структур: линейных, разветвленных, циклических, что облегчает вариацию трибохимических процессов. К тому же ковалентные связи углерода равносильны как при присоединении, так и при отдаче электронов с координационными числами 4, 3 и 2, со степенями окисления -4 , $+2$, $+4$.

Следовательно можно полагать, что дальнейшее наращивание углеродсодержащего покрытия, даже в последующем отсутствии ГМТ, идет благодаря трибоактивации углеродных поверхностей, неординарной химической активности атомов углерода с не скомпенсированными поверхностными связями, благодаря процессам sp^2 и sp^3 гибридизации, хемосорбции углеводородов смазки, а при работе сопряжений «на сухую» — углекислого газа из окружающей среды.

Изложенное подкрепляется некоторыми исследованиями трибологической лаборатории академика РАН Горячевой И.Г. (ИПМ РАН). Здесь акцентирован переход в интенсивном трении от физической к химической адсорбции. Отмечена трибополимеризация молекул смазки и других веществ, участие радикалов, частиц износа, а также адсорбция из трибосреды углерода,

кислорода и серы, а в итоге — образование эффективной смазочной полимерной «подушки».

Заключение

Можно предполагать, что ведущие механизмы образования ГМТ-покрытий в смазках — это механоактивация поверхностей трения и частиц минералов, открытие ювенильных поверхностей, адсорбция и хемосорбция на них активных радикалов с образованием минеральной наноразмерной структуры, трибополимеризация на ней компонентов трибосреды, а дальнейшее наращивание углеродной пленки идет благодаря неординарной химической активности возбуждаемых трением поверхностных атомов углерода с поглощением их свободными связями компонентов трибосреды.

Если ГМТ-процесс может идти без смазок, то возможно, что ему присущи другие механизмы и для их выяснения необходимы данные о структуре и фазовом составе таких покрытий. Общим в образовании ГМТ-покрытий в смазках, а вслед за этим и при работе без смазки, является активация поверхностных атомов углерода. Поэтому для эффективной ГМТ-технологии необходимо обеспечить соответствующий минеральный и фракционный состав ГМТ, прокаливанием удалить из него адсорбированную воду, дать время для образования первичной минераль-

ной трибоструктуры, а также условия для эффективной реализации неординарной химической активности атомов углерода.

Литература

1. Дунаев А.В., Шарифуллин С.Н. Модернизация изношенной техники с применением трибопрепаратов. — Казань : Издание Казанского университета, 2013. — 272 с.
2. Yuansheng J. and Shenghua L. Superlubricity of in situ generated protective layer on worn metal surfaces in presence of $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$ / Superlubricity. Edited by Ali Erdemir / Argonne National Laboratory.- Argonne, USA; and Jean-Michel Martin / Ecole Centrale de Lyon.- Lyon, France. Elsevier B.V., 2007. — P. 445–469.
3. Додонова Д.А., Пичугин В.Ф., Лаптев Д.В. Влияние алюминийсодержащей смазочной композиции на процессы трения и изнашивания металлических пар. — М. : Труды ГОСНИТИ, 2011. — Т. 108. — С. 245–249.
4. Пичугин В.Ф., Щербинин В.М. Элементный состав, строение и толщина защитных пленок на поверхностях трения пары антифрикционный сплав-сталь в глицерине. — М. : Труды ГОСНИТИ, 2011. — Т. 108. — С. 250–253.
5. Любимов Д.Н., Долгополов К.Н. и др. Структура смазочных слоев, формируемых при трении в присутствии присадок минеральных модификаторов трения // Трение и износ. — 2009. — № 5 (30). — С. 516–521.
6. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. — М. : Физматгиз, 1963. — 472 с.
7. Углерод. БСЭ. — М. : Изд-во «Советская энциклопедия», 1972. — Т. 26. — С. 448–450.
8. Селютин Г.Е. и др. Применение модифицированных наноалмазов для увеличения ресурса узлов трения. — М. : Труды ГОСНИТИ, 2011. — Т. 107. Ч. 2. — С. 25–29.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ (материалы конгресса CIMAC-2016)

В обзоре представлены материалы последнего конгресса CIMAC, посвященные развитию новых технологий в двигателестроении, направленных на решение актуальных проблем в областях снижения вредных выбросов в атмосферу и ресурсосбережения при изготовлении деталей сложной формы методом 3D-печати.

Фирма «Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Япония) представила результаты исследований и испытаний системы снижения выбросов NO_x за счет уменьшения концентрации кислорода в воздухе для сгорания топлива при использовании специальной полимерной мембраны (ORM — oxygen reduction membrane). Система взаимодействует только с воздухом на впуске в двигатель и на ее работу не оказывают влияния как вид топлива (например, мазут, дизельное топливо или природный газ), так и его отдельные характеристики (например, вязкость, содержание серы, теплотворная способность). В целях обеспечения требований IMO Tier III по выбросам NO_x без заметного увеличения расхода дизельного топлива и исключения режимов дымления, система ORM дополнена установкой приготовления стабильной водо-топливной эмульсии (ВТЭ) с получением наноразмерной дисперсной фазы (воды) без применения эмульгаторов.

Освоение 3D-печати компонентов двигателей из металлических порошков с послойным лазерным наплавлением позволяет обеспечить настоящий технологический прорыв в отрасли двигателестроения. Снимается целый ряд технологических ограничений, решительно пересматриваются традиционные методы проектирования и изготовления компонентов. Во всех промышленных областях между ведущими производителями развернулась настоящая гонка за лидерство в деле запуска в серию металлических деталей, изготовленных методами 3D-печати.

Компания «General Electric» (GE) чрезвычайно быстрыми темпами внедряет метод аддитивного производства (наслоения) методами 3D-печати металлических деталей двигателей. В докладе компании приводится обзор современного состояния технологии 3D-печати и критериев выбора компонентов, намечаемых для постановки на серийное производство данным методом. Показано, что при внедрении этой технологии необходимо радикальным образом изменить процесс проектирования и мышления инженеров-конструкторов, чтобы максимально использовать преимущества 3D-печати в сравнении с традиционными методами проектирования и изготовления деталей.

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ NO_x НА ОСНОВЕ МЕМБРАНЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В СОЧЕТАНИИ С ДОБАВЛЕНИЕМ ВОДЫ В ТОПЛИВО

Kazuyuki Maeda, Dai Yamanishi,

*Национальный Университет рыбной промышленности,
Япония*

Junichi Hayashi,

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd., Япония

Atsushi Shimizu, Hirokazu Ohno, Junichi Oguma,

Asahi Kasei Chemicals Co., Ltd., Япония

Atushi Sakane, AST Consulting, Япония

Реферат

Нормы Международной Морской Организации (IMO) Tier III предусматривают снижение выбросов вредных веществ от судов, находящихся в пределах зоны контролируемых выбросов (ECA), не менее чем на 80 % по сравнению с требованиями более низкого уровня IMO Tier II. Фирмой «Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Япония) была разработана система для снижения содержания кислорода (ORM — oxygen reduction membrane) на основе мембраны, привлекающая широкое внимание специалистов. Система снижает выбросы NO_x за счет уменьшения концентрации кислорода во впускном тракте с помощью специальной мембраны. Система ORM устанавливается на впуске в газозвдушный

тракт, поэтому на ее работу не влияют ни вид топлива (например, мазут, морское дизельное топливо или газ), ни его отдельные характеристики (например, содержание серы). К тому же система взаимодействует только с воздухом, и, следовательно, не представляет опасности для окружающей среды.

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке эффективности системы ORM в качестве средства снижения выбросов NO_x . Система ORM была испытана при работе в составе четырехтактного высокооборотного судового дизеля и двухтактного среднеоборотного одноцилиндрового дизеля. При этом изучалось влияние концентрации кислорода в воздушном тракте двигателя на уровень выбросов NO_x . Система ORM может быть использована для задания определенной концентрации кислорода в воздушном заряде с помощью полимерной мембраны. Эксперименты подтвердили реальность уменьшения концентрации кислорода в воздухе с помощью ORM. В серии экспериментов эффективность ORM по снижению выбросов NO_x оценивается также в сочетании с использованием водотопливной эмульсии (ВТЭ).

Как показал анализ результатов, снижение концентрации кислорода сопровождалось уменьшением выбросов NO_x на всех режимах работы двигателя. При этом для выполнения требований

IMO Tier II по выбросам NO_x достаточно задать концентрацию кислорода менее 17 %. Снижение концентрации кислорода до 19 % позволяет снизить выбросы NO_x на 50 % без сколько-нибудь ощутимого изменения расхода топлива. Если при этом дополнительно использовать ВТЭ с содержанием воды 60–80 %, то этого уже достаточно для выполнения требований IMO Tier III. Кроме того, использование системы ORM при нахождении судна вне зоны ECA (non-ECA region) позволяет снизить расход топлива.

Важно отметить, что упомянутые системы, использующие только воздух и воду, полностью безопасны для окружающей среды.

1. Введение

Морской транспорт является существенным компонентом любой экономики. К сожалению, океанские суда, оборудованные мощными двигателями внутреннего сгорания, являются источниками большого количества вредных выбросов и парниковых газов, загрязняющих атмосферу. С этим связано постоянное ужесточение экологических требований, что вызывает острую необходимость в поисках путей снижения выбросов NO_x и CO_2 от морских судов.

Нормы Международной Морской Организации (IMO) Tier III предусматривают снижение выбросов вредных веществ от судов, находящихся в пределах зоны контролируемых выбросов (ECA), не менее чем на 80 % по сравнению с требованиями более низкого уровня IMO Tier II. Для этого предлагалось использовать системы селективного каталитического восстановления (SCR) и рециркуляции отработавших газов (EGR). В системах SCR в качестве восстановителей используются аммиак либо мочевины. Однако данная технология, широко используемая в сухопутных установках, в судовых условиях имеет свои ограничения, связанные с низкой температурой отработавших газов. В системах EGR концентрация O_2 в воздушном заряде снижается путем смешивания отработавших газов со свежим воздухом. К тому же наличие CO_2 в отработавших газах на выходе из контура рециркуляции увеличивает их теплоемкость, что приводит к снижению температуры горения факела, а следовательно — к снижению выбросов NO_x . Однако отработавшие газы перед их поступлением в контур рециркуляции необходимо очистить от сернистых соединений, золы и частиц (PM).

Кроме того, IMO ввела нормирование показателя энергоэффективности (EEDI — energy efficiency design index) и ограничения на выброс черного углерода в Арктике. EEDI — это норматив, обозначающий количественное ограничение выбросов CO_2 от судов, и этот норматив посте-

пенно становится все более жестким. Целевые показатели EEDI стали обязательными для судов коммерческого флота, что приводит к необходимости сокращения расхода топлива судовыми двигателями. Ограничения на выброс черного углерода планируется ввести в ближайшем будущем, когда IMO опубликует соответствующий нормативный документ. Черный углерод — это практически сажа, входящая в состав PM. Налипание сажи на поверхность катализатора в системе SCR ведет к снижению эффективности катализатора.

В последнее время заметное внимание уделяется системам на основе мембраны, снижающей содержание кислорода (ORM), разработанные фирмой «Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Япония). Система снижает выбросы NO_x за счет снижения концентрации кислорода во впускном воздухе с помощью специальной мембраны.

Кроме того, разработана новая система приготовления и подачи водотопливной эмульсии (WMF) без использования присадок. Это способствует уменьшению выбросов NO_x благодаря снижению температуры пламени, поскольку часть тепла расходуется на парообразование. В то же время благодаря совершенствованию процесса сгорания топлива снижается концентрация черного углерода в отработавших газах.

В ходе настоящей работы был выполнен ряд экспериментальных исследований по оценке эффективности обоих упомянутых методов как средства снижения выбросов NO_x судовыми двигателями.

Система ORM, в состав которой входит полимерная мембрана, может использоваться для регулирования (в данном случае — снижения) концентрации O_2 в воздушном заряде. В ходе экспериментов проверялись:

1) *влияние концентрации O_2* : с помощью осушителя влажность воздуха на всасывании доводилась до нуля, затем концентрация O_2 с помощью ORM снижалась с 21 до 17 %;

2) *влияние ВТЭ*: с помощью вновь разработанного генератора ВТЭ соотношение долей воды и горючего (W/FO) изменялось от 0 до 80 % без использования присадок;

3) *влияние ORM в сочетании с ВТЭ*: концентрация кислорода с помощью ORM устанавливалась последовательно на уровне 21, 20 и 19 %, и в каждом режиме соотношение долей воды и горючего постепенно увеличивалось;

4) *ресурсные испытания мембраны в составе действующей судовой установки в эксплуатационных условиях*: мембрана была установлена на вспомогательный дизель-генератор судна валовой вместимостью 2500 тонн.

Таблица 1

Технические характеристики опытных двигателей

	Двигатель	
	4-тактный	2-тактный
Число цилиндров	6	1
Диаметр цилиндра, мм	100	400
Ход поршня, мм	110	1360
Макс. мощность, кВт	214	842
Скорость двигателя, об/мин	3101	176
Макс. p_{me} , МПа	1,59	1,68
Вид топлива	Газойль	MDO

Таблица 2

Свойства топлив

Вид топлива	Газойль	MDO
Плотность, кг/м ³	828,4	857,6
Кинематическая вязкость, мм ² /с	3,357	3,143
C, % массы	86,2	86,0
H, % массы	13,8	12,8
S, % массы	0,0007	0,09
N, % массы	—	0,01

2. Оборудование стенда и методика экспериментов

Стендовая установка

В качестве опытных двигателей использовались четырехтактный высокооборотный судовой дизель (лаборатория «Национального Университета рыбной промышленности» (NFU)) и двухтактный среднеоборотный одноцилиндровый дизель (лаборатория «Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd» (MES)). Технические характеристики опытных двигателей и свойства использованных в экспериментах топлив приведены в табл. 2.1 и 2.2.

Схема организации потоков воздуха во всасывающем тракте и подачи ВТЭ показаны на рис. 2.1. Как показали результаты испытаний, сжатие воздуха в турбокомпрессоре и/или в приводном нагнетателе при его прохождении через систему ORM позволяет снизить концентрацию O_2 до 17 %. В экспериментах с 4-тактным двигателем приводной нагнетатель использовался вместо турбокомпрессора, а в экспериментах с 2-тактным двигателем он работал совместно с турбокомпрессором. В генераторе ВТЭ происходит смешивание горючего с водой, при этом соотношение воды и горючего может изменяться от 0 до 80 %. Это одна из наших последних разработок, позволяющая задавать любое значение соотношения W/FO («вода/горючее») в указанных пределах без использования каких-либо присадок. Такая возможность обеспечивается за счет уменьшения размера водяных капель до наноразмера, при этом генератор размещается в непосредственной близости от устройства топливоподачи.

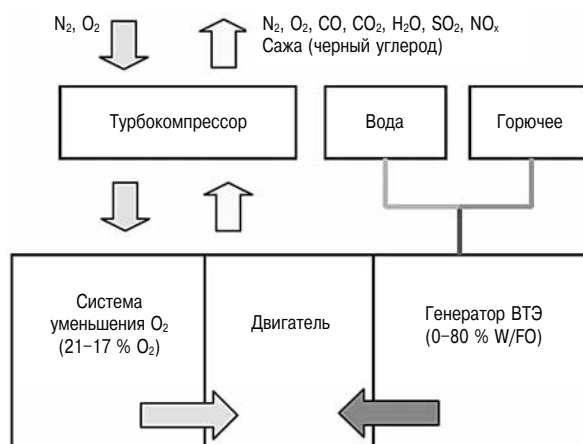


Рис. 2.1. Схема организации потоков воздуха, отработавших газов и ВТЭ в экспериментальной установке

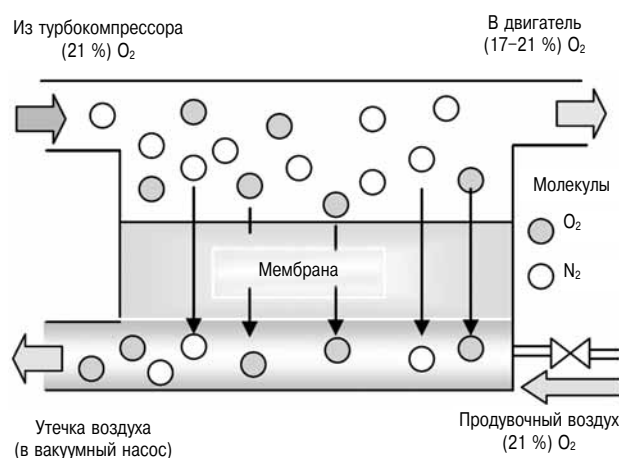


Рис. 2.2. Принцип действия мембраны для снижения концентрации кислорода

Принцип работы системы ORM показан на рис. 2.2. При возникновении перепада давления между передней (входной) и задней (выходной) сторонами мембраны через нее в двигатель начинает поступать воздух, состоящий, как известно, из кислорода и азота, причем молекулы кислорода проходят через мембрану легче, чем молекулы азота. Поэтому концентрация кислорода в воздухе, попадающем в камеру сгорания, ниже, чем перед мембраной. Известны три способа эффективного снижения концентрации в воздушном ресивере. Первый способ — повышение давления на входе в мембрану с помощью турбонаддува. Второй способ заключается в поддержании концентрации O_2 за мембраной на уровне 21 % путем использования продувочного воздуха. Третий способ состоит в снижении давления за мембраной с помощью вакуумного насоса.

Принцип действия генератора ВТЭ показан на рис. 2.3. Как известно, вода и MDO имеют разную природу и плотность, поэтому в обычных

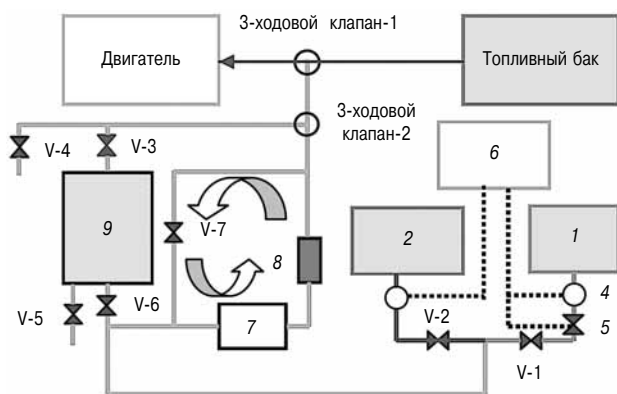


Рис. 2.3. Блок-схема генератора ВТЭ

1 — водяной бак; 2 — топливный бак; 3 — расходомер для горючего; 4 — расходомер для воды; 5 — регулирующий клапан; 6 — пульт управления; 7 — циркуляционный насос; 8 — смеситель; 9 — разделительный бачок

условиях их смешивание без специальных присадок невозможно. Как уже отмечалось, смешивание воды и горючего обеспечивается без использования присадок другими средствами.

Во-первых, конфигурация системы такова, что интервал времени между впрыском ВТЭ и началом сгорания недостаточен для разделения ВТЭ на воду и горючее, поскольку генератор ВТЭ устанавливается непосредственно перед топливной форсункой. Во-вторых, в устройстве имеется разделительный бачок. В нем происходит разделение ВТЭ на воду и горючее благодаря их разной плотности, после чего горючее может быть возвращено в топливный бак. И наконец, устройство может генерировать два вида ВТЭ — вода в горючем (прямая эмульсия) или горючее в воде (обратная эмульсия). Обычно горючее в двигатель поступает непосредственно из топливного бака (см. рис. 2.3).

Добавление воды к горючему осуществляется в следующей последовательности:

- клапаны V-2 и V-3 открываются, а клапан V-1 закрывается, так что в линию приготовления ВТЭ подается только горючее;

- сигнал задания (уставки) необходимого соотношения W/FO поступает на пульт управления;

- для подготовки к приготовлению ВТЭ клапан V-1 открывается (это состояние должно быть подтверждено закрытием клапана V-4);

- трехходовые клапаны 1 и 2 переводятся в такое положение, при котором ВТЭ будет подаваться в двигатель.

Добавление горючего к воде осуществляется в следующей последовательности:

- клапаны V-1 и V-3 открываются, а клапан V-2 закрывается, так что в линию приготовления ВТЭ подается только вода;

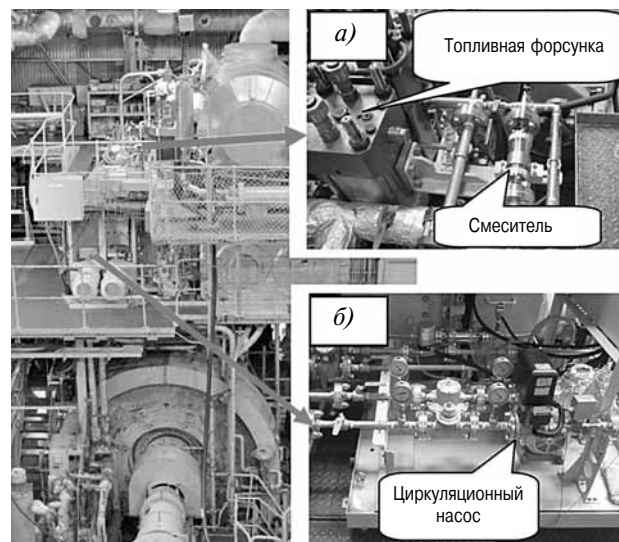


Рис. 2.4. Генератор ВТЭ и связанные с ним элементы опытной установки

- сигнал задания (уставки) необходимого соотношения W/FO поступает на пульт управления;

- для подготовки к приготовлению ВТЭ клапан V-2 открывается (это состояние должно быть подтверждено закрытием клапана V-4);

- трехходовые клапаны 1 и 2 переводятся в такое положение, при котором ВТЭ будет подаваться в двигатель. Все это время клапаны V-5 и V-6 остаются закрытыми.

Клапан V-7 используется для регулирования давления подаваемой в двигатель ВТЭ. В разделительном бачке находятся горючее, вода и ВТЭ. Сначала, когда открывается V-5, из разделительного бачка выпускается вода. Затем, когда открывается V-6, оставшееся горючее подается в двигатель.

Фотографии генератора ВТЭ и элементов опытной установки показаны на рис. 2.4. На фото

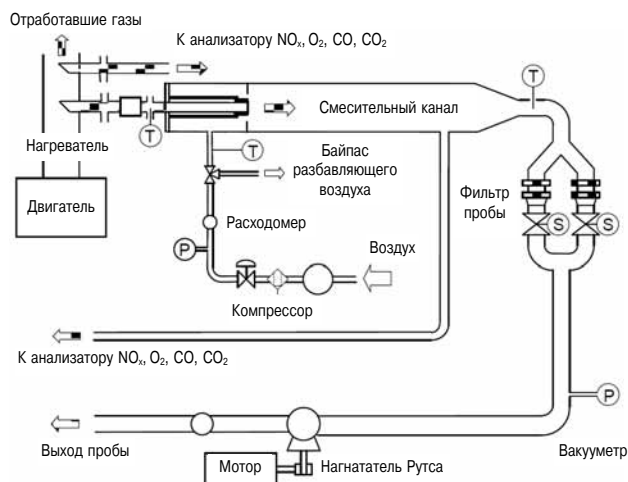


Рис. 2.5. Система измерения РМ

(а) показан смеситель, расположенный непосредственно перед форсункой, а на фото (б) — циркуляционный насос и связанные с ним компоненты. Конфигурация реальной системы может отличаться от показанной на рисунке, так как каждый из компонентов, за исключением смесителя, может размещаться и в других местах.

На рис. 2.5 схематически изображена система измерения содержания РМ. Отработавшие газы поступают в смесительный канал (горизонтального типа). Подача отработавших газов в смесительный канал осуществляется через систему трубок с двойными стенками, которая подогревается таким образом, чтобы ее температура была равна температуре выпускной трубы. При выборе конструкции системы трубок и температуры ее нагрева ставилась задача свести к минимуму возможность прилипания растворимых органических фракций (SOF — soluble organic fractions), содержащихся в несгораемых компонентах масла и топлива (и составляющих основную часть РМ), к стенкам соединительной линии в смесительном канале. Состав РМ (сажа, SOF и сульфат) определялся путем анализа в экстракторе Сокслета.

В ходе экспериментов выполнена оценка эффективности снижения выбросов NO_x за счет применения технологии ORM — как отдельно, так и в сочетании с ВТЭ. Кроме того, получены данные о долговечности мембраны в судовых условиях.

3. Результаты исследования

3.1. Снижение выбросов NO_x с помощью ORM

На рис. 3.1–3.3 показаны результаты экспериментов по снижению выбросов NO_x на 4-тактном двигателе. Как видно из рис. 3.1, при снижении концентрации O_2 выбросы NO_x уменьшаются при любой нагрузке двигателя. Это объясняется тем, что при снижении концентрации O_2 температура сгорания топлива также уменьшается, главным образом — из-за эффекта разбавления смеси инертным газом. Выбросы NO_x сокращаются примерно на 25 и 50 % при снижении концентрации O_2 до 20 и 19 % соответственно. Если концентрация O_2 будет снижена до 17 % и менее, то выбросы NO_x соответствуют требованиям IMO Tier III.

На рис. 3.2 показано изменение выбросов NO_x при использовании трех упомянутых выше способов снижения концентрации O_2 . Точка 1 соответствует случаю, когда концентрация O_2 на входе в двигатель снижена до 19 % за счет повышения давления перед мембраной; точка 2 — когда концентрация O_2 после мембраны поддерживается на уровне 21 % за счет использования продувочного воздуха, а точки 3 и 4 — когда концентрация O_2 уменьшается благодаря снижению

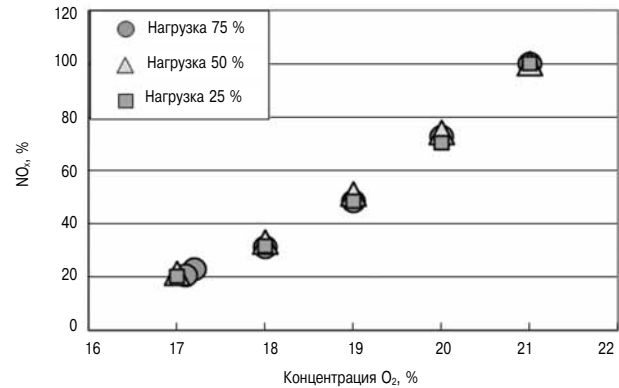


Рис. 3.1. Изменение выбросов NO_x в зависимости от концентрации O_2 (4-тактный двигатель)

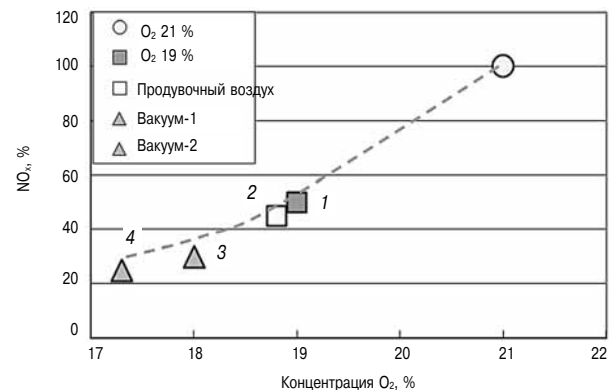


Рис. 3.2. Влияние декомпрессии с помощью вакуумного насоса (4-тактный двигатель, нагрузка 75 %)

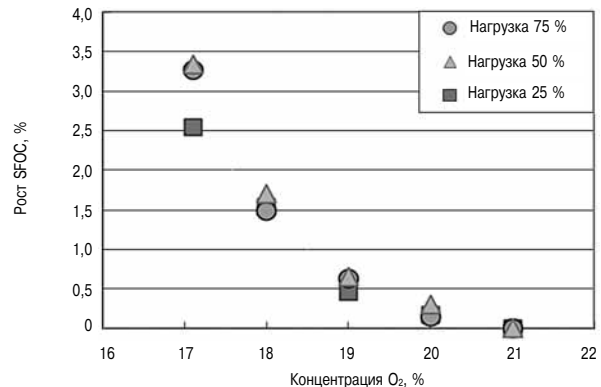


Рис. 3.3. Изменение SFOC в зависимости от концентрации O_2 (4-тактный двигатель)

давления за мембраной с помощью вакуумного насоса. Очевидно, что выбросы NO_x всегда снижаются при уменьшении концентрации O_2 на входе в двигатель любым способом.

Снижение концентрации O_2 на входе в двигатель ухудшает качество сгорания топлива. На рис. 3.3 показано соотношение между концентрацией O_2 и удельным расходом топлива (SFOC). Даже если концентрация O_2 уменьшилась до 20 %, связанный с этим рост SFOC не превышает 0,2 %. Однако при дальнейшем уменьшении концентрации O_2 увеличение расхода топлива

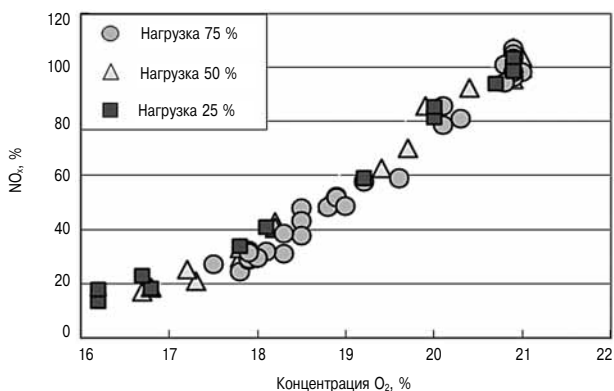


Рис. 3.4. Изменение выбросов NO_x в зависимости от концентрации O_2 (2-тактный двигатель)

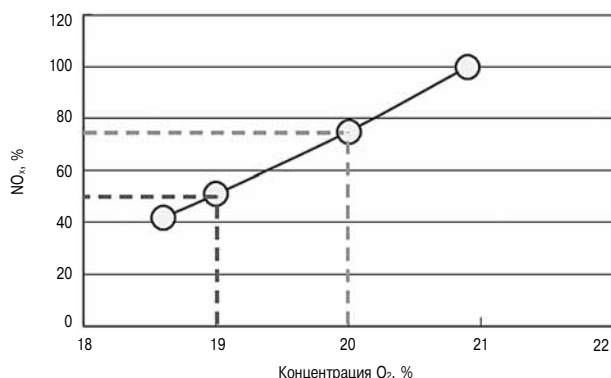


Рис. 3.5. Изменение выбросов NO_x в зависимости от концентрации O_2 (2-тактный двигатель)

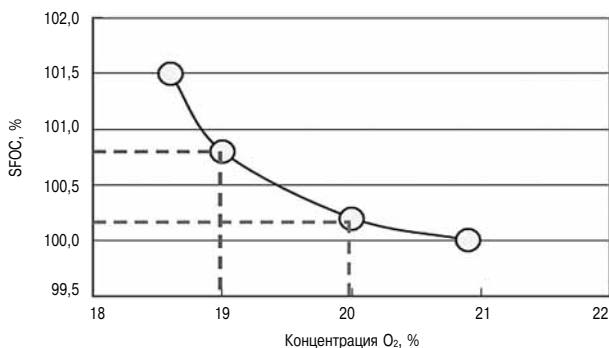


Рис. 3.6. Зависимость SFOC от концентрации O_2

становится более заметным. Так, при значениях концентрации O_2 19 и 18 % рост SFOC достигает 0,5 и 1,5 % соответственно. При снижении концентрации O_2 до 17 % SFOC возрастает примерно на 3 %.

На рис. 3.4–3.6 показаны результаты экспериментов на 2-тактном двигателе.

На рис. 3.4 и 3.5 показано, что выбросы NO_x уменьшаются со снижением концентрации O_2 при любой нагрузке двигателя. При снижении концентрации O_2 до 20 и 19 % выбросы NO_x уменьшаются примерно на 25 и 50 % соответственно. И наконец, при снижении концентрации O_2 до 17 % и менее уровень выбросов NO_x оказывается ниже предельно допустимых значений IMO

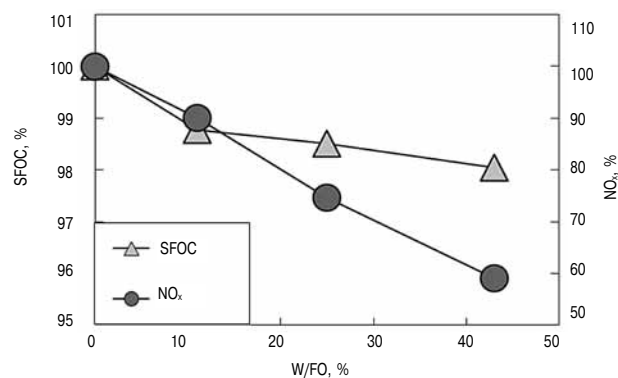


Рис. 3.7. Изменение выбросов NO_x и SFOC в зависимости от соотношения W/FO (4-тактный двигатель, нагрузка 75 %)

Tier III. На рис. 3.6 приведена зависимость SFOC от концентрации O_2 . Как видно, даже если концентрация O_2 уменьшилась до 20 %, рост SFOC не превышает 0,2 %. Однако при дальнейшем уменьшении концентрации O_2 темпы прироста SFOC увеличиваются, и при значениях $\text{O}_2 = 19$ и 18,5 %, SFOC возрастает соответственно на 0,8 и 1,5 %.

3.2. Снижение выбросов NO_x при использовании ВТЭ

На рис. 3.7 показаны зависимости выбросов NO_x и SFOC от соотношения W/FO для

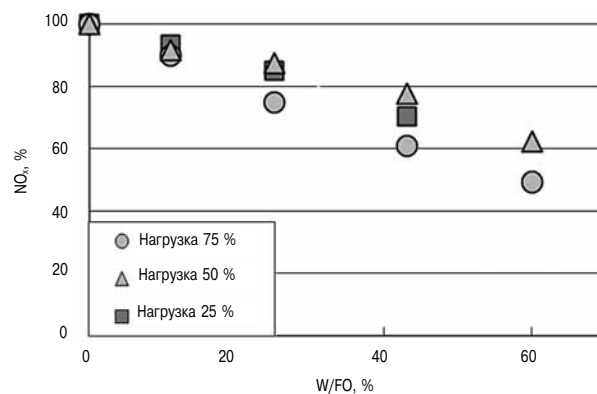


Рис. 3.8. Зависимость NO_x от соотношения W/FO (4-тактный двигатель)

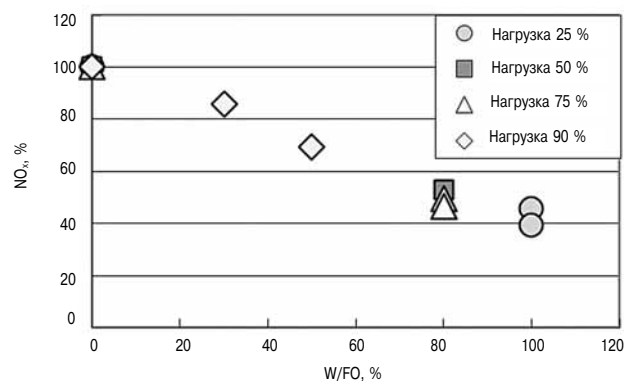


Рис. 3.9. Зависимость NO_x от соотношения W/FO (2-тактный двигатель)

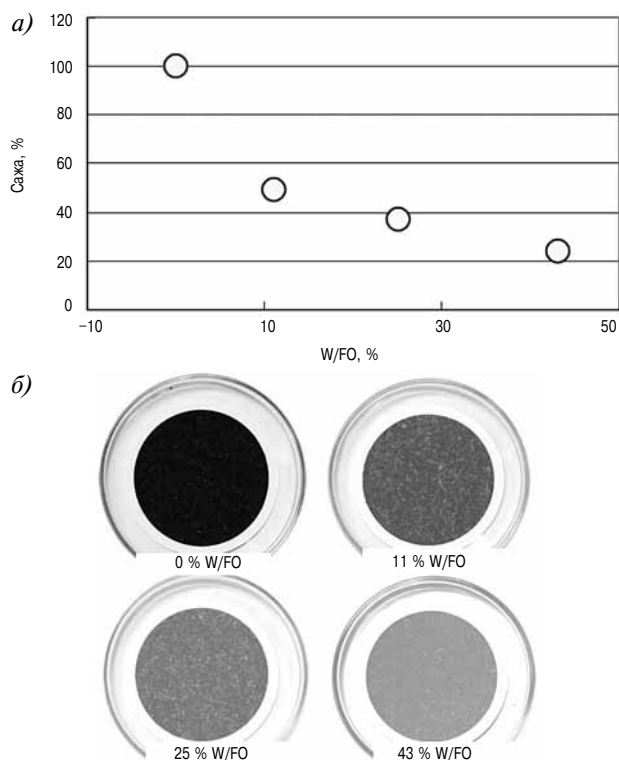


Рис. 3.10. Снижение выбросов сажи (черный углерод)

4-тактного двигателя. С ростом соотношения W/FO одновременно снижаются как выбросы NO_x , так и расход топлива. Обычно снижение выбросов NO_x сопровождается увеличением расхода топлива, поэтому приходится находить компромисс между этими показателями. В данном случае, однако, характер зависимостей иной, что составляет существенное преимущество использования ВТЭ: данная технология позволяет снизить выбросы NO_x без потерь топливной экономичности.

На рис. 3.8 и 3.9 показаны зависимости выбросов NO_x от соотношения W/FO и при нагрузке 25, 50 и 75 % для 4- и 2-тактного двигателей. При соотношении W/FO, равном 1:1, выбросы NO_x уменьшились примерно на 30 % для обоих типов двигателя. При увеличении содержания воды в ВТЭ до 80 % снижение выбросов NO_x достигло 50 %.

Рис. 3.10 иллюстрирует снижение выбросов сажи при использовании ВТЭ. В части (a) данного рисунка показано относительное изменение удельных выбросов сажи (г/кВт·ч), а в части (б) — изменение количества сажи, остающейся на фильтре (соответственно меняется цвет фильтра). Показано, что при увеличении соотношения W/FO выбросы сажи существенно снижаются. При соотношении W/FO 25 и 43 % соответствующее снижение выбросов сажи составляет примерно 60 и 80 %. При этом окраска фильтра меняется от черного до светло-серого.

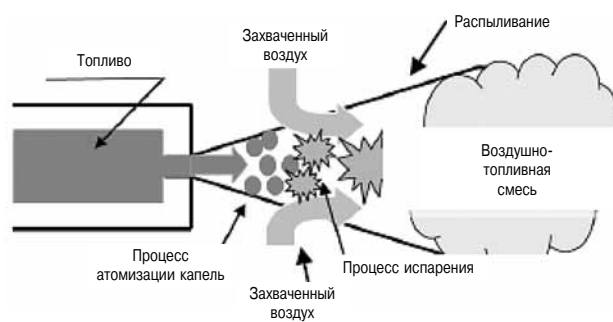


Рис. 3.11. Диаграмма распыливания топлива

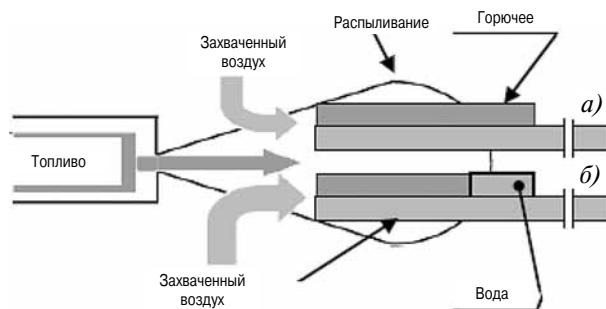


Рис. 3.12. Сравнение количества топлива и захваченного воздуха при использовании чистого топлива (a) и ВТЭ (б)

На рис. 3.11 схематически показан процесс распыливания топлива. На первом этапе струя горючего, вылетающая с большой скоростью из сопла форсунки, распадается на мельчайшие капли. Эти капли под воздействием захватываемого потоком нагретого воздуха образуют горючую воздушно-топливную смесь. Масса захватываемого потоком воздуха пропорциональна количеству движения впрыснутой субстанции.

Рис. 3.12 иллюстрирует процессы захвата воздуха струей топлива (a) и струей ВТЭ (б). В первом случае струя, вылетающая из распылителя, состоит из чистого топлива, во втором — из ВТЭ.

Количество движения и масса впрыснутой субстанции в начальной фазе впрыска в обоих случаях практически одинаковы, а значит, одинаково и количество захваченного воздуха. В то же время количество топлива в струе в случае (б) меньше, чем в случае (a), поскольку в первом случае струя кроме топлива содержит еще и воду. Следовательно, соотношение воздух—топливо в случае (б) больше, чем в случае (a).

В конце фазы впрыска (на рисунке этот момент не показан) количество движения струи в случае (б) больше, чем в случае (a), так как оно пропорционально соотношению W/FO. Следовательно, количество захваченного воздуха в случае (б) больше, чем в случае (a). Следовательно, соотношение воздух—топливо в струе ВТЭ всегда будет выше, чем в струе чистого топлива, поэтому

выбросы РМ уменьшаются пропорционально содержанию воды в ВТЭ. При этом влияние ВТЭ на SFOC может быть как положительным, так и отрицательным. Увеличение количества захваченного воздуха приводит к ускорению сгорания, полезная работа (на поршне) возрастает за счет объема паров воды. Эти факторы можно считать позитивными. Негативные факторы: длительность впрыска возрастает, а температура рабочего тела снижается за счет испарения воды. При оптимальной настройке соотношения W/FO и углов впрыска можно добиться того, что позитивные факторы перевесят негативные, и удельный расход топлива в итоге уменьшится.

Как уже упоминалось ранее, добавление воды в топливо позволяет уменьшить выбросы NO_x . Результаты выполненного исследования показывают, что испарение воды снижает температуру пламени, тем самым уменьшая скорость образования и выбросов NO_x .

Таким образом, добавление воды в топливо способно обеспечить не только уменьшение SFOC, но и одновременное снижение выбросов NO_x и РМ.

3.3. Уменьшение выбросов NO_x при помощи ORM и ВТЭ

Как было показано, работа на ВТЭ позволяет уменьшить выбросы NO_x , используя для этого

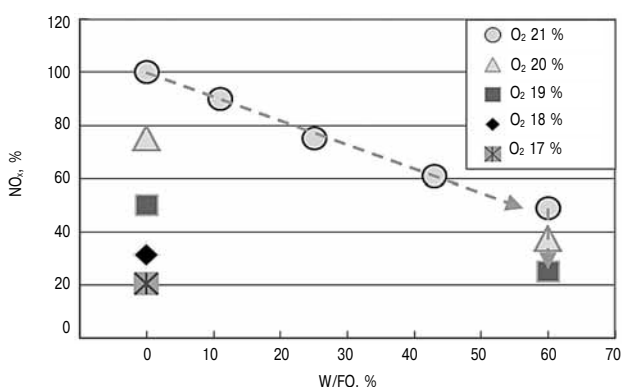


Рис. 3.13. Изменение выбросов NO_x при одновременном использовании ORM и ВТЭ (4-тактный двигатель)

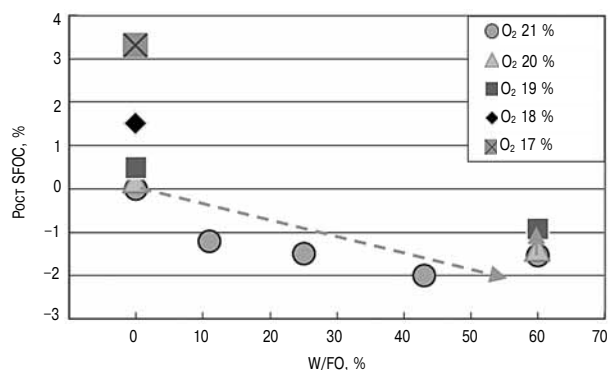


Рис. 3.14. Изменение SFOC при одновременном использовании ORM и ВТЭ (4-тактный двигатель)

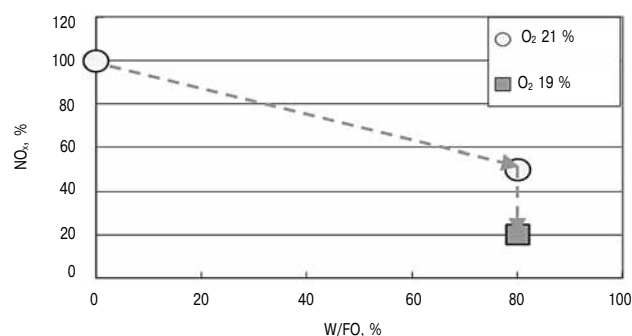


Рис. 3.15. Изменение выбросов NO_x при одновременном использовании ORM и ВТЭ (2-тактный двигатель)

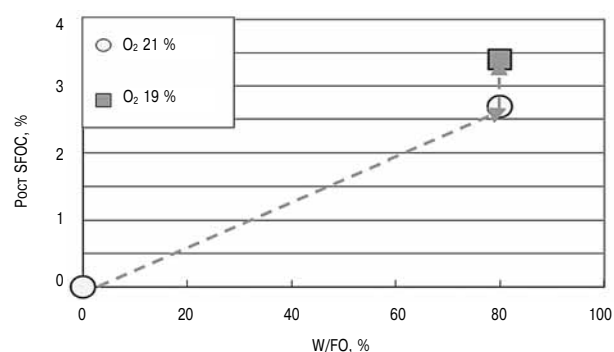


Рис. 3.16. Изменение SFOC при одновременном использовании ORM и ВТЭ (2-тактный двигатель)

минимум оборудования. Однако, как видно из рис. 3.9, даже при соотношении W/FO, равном 100 %, максимальное снижение выбросов NO_x составляет около 60 %, что недостаточно для выполнения требований IMO Tier III. Следовательно, соотношение W/FO должно быть увеличено путем реконфигурации системы впрыска и/или другими средствами. В выполненном исследовании в качестве такой технологии была выбрана система ORM.

На рис. 3.13 показано влияние соотношения W/FO в топливе и концентрации O_2 в воздушном ресивере на выбросы NO_x ; на рис. 3.14 — изменение SFOC в зависимости от обеих указанных переменных на 4-тактном двигателе.

Как было сказано ранее, уровень выбросов NO_x при снижении концентрации O_2 до 17 % понижается на 80 %, что обеспечивает соответствие требованиям IMO Tier III. Однако при этом расход топлива увеличивается примерно на 3 % (см. рис. 3.14). Эффект от совместного использования ВТЭ и ORM показан на рис. 3.13 и 3.14. Было установлено, что расход топлива почти не меняется, при этом снижение концентрации O_2 до 19 % позволяет снизить выбросы NO_x настолько, что обеспечивает соответствие требованиям IMO Tier III.

На рис. 3.15 показано влияние совместного использования ВТЭ и ORM на выбросы NO_x , а на рис. 3.16 — соответствующее изменение

расхода топлива (в 2-тактном двигателе). Уровень выбросов NO_x снижается примерно на 50 % при соотношения W/FO 80 %, а при использовании ORM уменьшается еще на 83 %. Расход топлива увеличивается на 2,8 % при соотношении W/FO 80 %, а при использовании ORM увеличивается еще на 0,5 %. Это еще раз подтверждает, что наиболее эффективным средством снижения выбросов NO_x является сочетание ORM и ВТЭ. Важно также отметить то, что эти системы, использующие только воздух и воду, для окружающей среды абсолютно безвредны.

3.4. Ресурсные испытания на борту действующего судна

Следующий этап исследований предусматривал проведение ресурсных испытаний на борту судов дальнего плавания. Для этого были выбраны учебные теплоходы «Тепло-Магу» и «Кою-Магу», принадлежащие Национальному Университету рыбной промышленности (NFU).

Сначала проводились ресурсные испытания опытной системы ORM, схема которой показана на рис. 3.17. Воздух, поступающий из машинного помещения, через турбокомпрессор подается в систему ORM. Перепад давления на ORM изме-

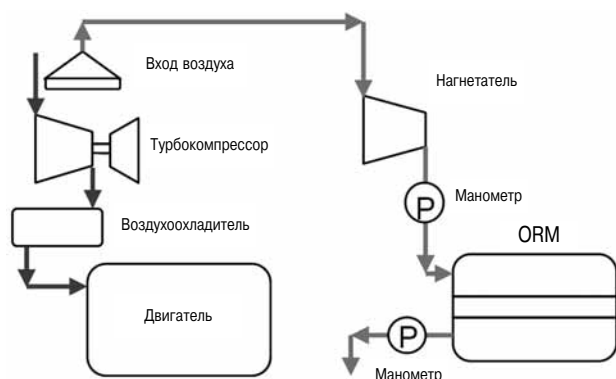


Рис. 3.17. Схема системы ORM на борту «Тепло-Магу»

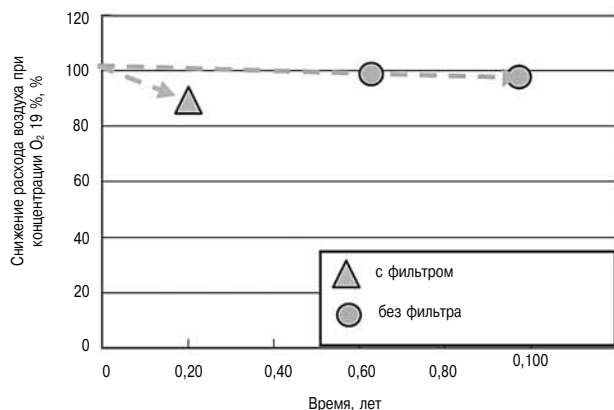


Рис. 3.18. Показатели эффективности мембраны ORM в функции времени



Рис. 3.19. Учебное судно «Кою-Магу»

рялся с помощью дифманометра, который таким образом фиксировал любые ухудшения состояния мембраны. При измерении расхода воздуха с уменьшенным содержанием O_2 (ORA — oxygen reduced air) для анализа брался картридж ORM. На рис. 3.18 показано изменение расхода воздуха через мембрану при 19 % O_2 . В отсутствие фильтра предварительной очистки расход воздуха при 19 % O_2 сразу же начинает уменьшаться, что свидетельствует об ухудшении состояния мембраны. Однако при наличии фильтра предварительной очистки (на входе в турбокомпрессор) такого эффекта не наблюдается. Таким образом, мембрана ORM при наличии фильтра предварительной очистки демонстрирует хорошую устойчивость.

После этого испытания были продолжены на вспомогательном двигателе теплохода «Кою-

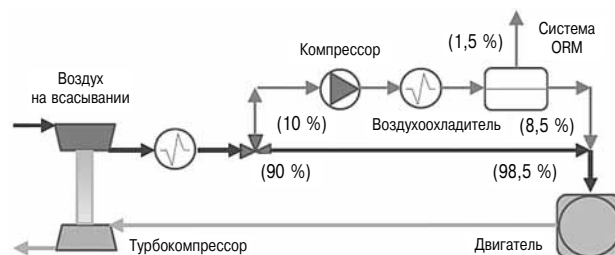


Рис. 3.20. Схема опытной установки

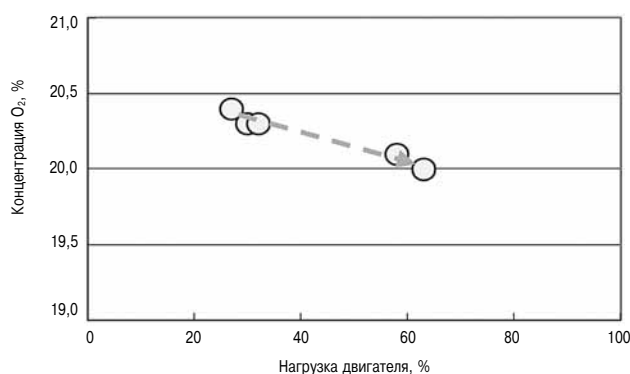


Рис. 3.21. Зависимость концентрации O_2 от нагрузки двигателя («Кою-Магу»)

Маги». На рис. 3.19 показана фотография «Коуо-Маги», а на рис. 3.20 — схема экспериментальной установки. Воздух на пути к мембране сжимается в компрессоре. Концентрация O_2 , а также расход, температура и давление воздуха измеряются как перед мембраной, так и на выходе из нее. С помощью этих измерений фиксируются изменения эффективности мембраны при работе двигателя на различных режимах. Результаты измерений показаны на рис. 3.21. Установлено, что концентрация O_2 за мембраной при увеличении нагрузки двигателя уменьшается. Это объясняется тем, что давление воздуха на всасывании с ростом нагрузки двигателя увеличивается, что положительно сказывается на эффективности мембраны. Типичный диапазон нагрузки вспомогательного генератора составляет 50–80 %, поэтому концентрация O_2 на всасывании снижается примерно до 20 %.

3.5. Снижение выбросов NO_x и CO_2 за пределами зон ECA

Результаты исследований, о которых говорилось выше, относятся к технологиям снижения выбросов NO_x в зонах ECA. Все упомянутые ранее технологии — SCR, EGR, а также ORM в сочетании с ВТЭ — направлены на снижение выбросов NO_x во время нахождения судна в зонах ECA. Применение каждой из них имеет свою специфику. Вместе с тем на области, имеющие статус ECA, приходится не более 10 % всего морского трафика. Понятно, что проблема снижения выбросов NO_x и CO_2 для остальных 90 % трафика остается актуальной. Поэтому нашей следующей задачей был поиск способов снижения выбросов NO_x и CO_2 в зонах «non-ECA».

На рис. 3.22 показана взаимозависимость NO_x и SFOC при работе с системой ORM. SFOC растет лишь незначительно при концентрации O_2 20 %, тогда как выбросы NO_x при этом сокращаются примерно на 25 %. Это еще раз подтверждает вывод о том, что применение мембраны ORM может обеспечить снижение выбросов

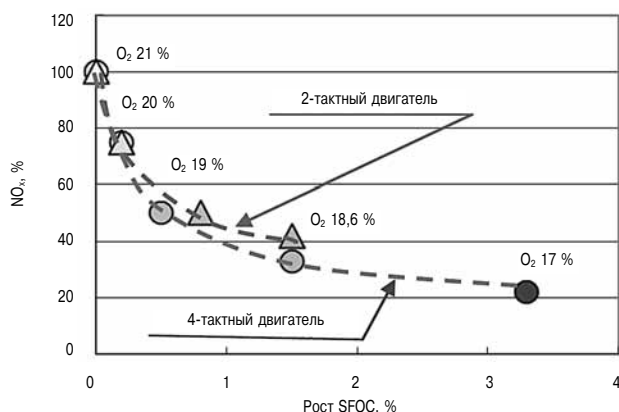


Рис. 3.22. Взаимосвязь между NO_x и SFOC при использовании ORM

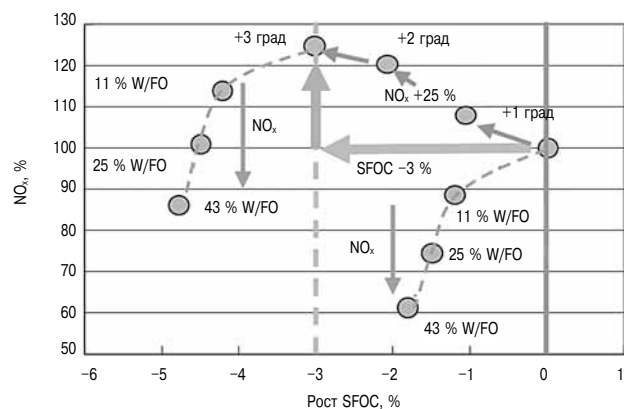


Рис. 3.23. Взаимосвязь между NO_x и SFOC (4-тактный двигатель)

NO_x без значительного увеличения расхода топлива.

На рис. 3.23 показаны результаты экспериментов на 4-тактном двигателе. Сначала уровень выбросов NO_x был снижен с помощью системы ВТЭ, при этом выбросы NO_x уменьшились на ~ 10 % при соотношении W/FO, равном 11 %. Возможно дальнейшее снижение выбросов NO_x за счет увеличения соотношения W/FO. Несмотря на то что удалось добиться бесспорного улучшения топливной экономичности, было ясно, что величина снижения расхода топлива за счет применения ВТЭ будет зависеть от типа двигателя и режима его работы. Поэтому была выполнена оценка других методов снижения расхода топлива с точки зрения их эффективности. Обычно при попытках уменьшить SFOC за счет увеличения угла опережения впрыска топлива выбросы NO_x возрастают. Как показано на рис. 3.23, более ранний впрыск (без ВТЭ) позволил снизить SFOC примерно на 3 %, но выбросы NO_x при этом увеличились на 25 %. Аналогичные результаты были получены при использовании ВТЭ с соотношением W/FO 11, 25 или 43 %.

Далее приведены примеры оптимизации показателей дизеля путем применения мембраны ORM. Как следует из рис. 3.23, увеличение начала впрыска топлива на 3 градуса ПКВ в сочетании с ВТЭ позволило снизить расход топлива на 3 %. Снижение концентрации O_2 до 20 % позволило уменьшить выбросы NO_x примерно на 25 % (см. рис. 3.1, 3.4, 3.5 и 3.22). Увеличение SFOC при этом составило 0,2 % (см. рис. 3.3, 3.6 и 3.22). Применение ORM в сочетании с увеличением угла опережения впрыска на 3 град ПКВ позволило уменьшить SFOC на 2,8 %. Судя по всему, резервы дальнейшего снижения SFOC этим не исчерпываются. Так, при нахождении судна вне зоны ECA SFOC может быть снижен за счет использования ORM-

системы, расходы на содержание которой после установки практически равны нулю. К тому же монтаж данной системы между турбокомпрессором и цилиндрами не представляет никаких проблем — просто надо установить мембрану. Так что для снижения SFOC на несколько процентов при нахождении судна вне зоны ЕСА данный метод вполне пригоден. В результате будут снижены эксплуатационные расходы и улучшен показатель EEDI, определяемый по удельным выбросам CO₂ [г/(тонно-миля)].

Ранее авторами на Конгрессе CIMAC-1998 были представлены тезисы, касающиеся снижения выбросов NO_x при морских перевозках. Целью этого документа было снижение удельных выбросов NO_x [г/(тонно-миля)] от океанского судна, что соответствует концепции EEDI. В обоих случаях для достижения необходимого сокращения выбросов NO_x необходимо снижать коэффициент сопротивления корпуса судна и его скорость, а также увеличивать КПД и шаг винта. На основе данных, полученных в ходе настоящей работы, можно утверждать, что внедрение систем ORM на крупнотоннажных судах позволит снизить выбросы NO_x и улучшить показатель EEDI.

Однако остаются проблемы, которые должны быть решены до того, как эти системы поступят на рынок. Во-первых, должны быть подтверждены показатели устойчивости и надежности ORM, достигнутые при испытаниях на учебных судах NFU. Во-вторых, следует учесть стоимость установки ORM. Если концентрация O₂ устанавливается с помощью ORM на значение 20 %, то при наличии турбокомпрессора с высоким КПД ожидаемая стоимость установки ORM будет минимальной. Однако стоимость установки, как и необходимое для нее место, должны быть приняты во внимание, поскольку эти факторы являются существенными. Чем мощнее двигатель, тем больше ожидаемая экономия расходов на топливо, которая может с запасом окупить стоимость установки. Дальнейшее совершенствование системы ORM также может окупиться за счет повышения ее эффективности.

4. Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Поскольку для корректной работы ORM важен перепад давления на мембране, то повышение давления перед мембраной равносильно снижению давления за ней.

2. Даже при снижении концентрации O₂ до 20 % увеличение SFOC не превышает 0,2 %. Однако при дальнейшем снижении концентрации O₂ рост SFOC более заметен. Он составляет 0,5, 1,5 и 3% при концентрации O₂ 19, 18 и 17 % соответственно.

3. Использование ВТЭ достаточно эффективно с точки зрения снижения выбросов NO_x и черного углерода, однако для выполнения требований IMO Tier III этого недостаточно.

4. При использовании ВТЭ снижается расход топлива, а также выбросы NO_x и РМ, что может быть объяснено с помощью теории распыливания топлива.

5. Совместное использование ВТЭ и ORM позволяет выполнить требования IMO Tier III, при незначительном увеличении расхода топлива.

6. Для оценки надежности и эффективности мембраны ORM были проведены ее испытания на двух находящихся в эксплуатации судах. Эти испытания дали хорошие результаты.

7. Показана возможность снижения SFOC при использовании технологии снижения выбросов NO_x с помощью ORM в сочетании с ВТЭ при нахождении судна за пределами зон ЕСА.

8. Чем мощнее двигатель, тем больше снижение расхода топлива с помощью системы ORM. Аналогичным образом на крупных судах с системой ORM можно добиться одновременного снижения NO_x и EEDI.

9. Чрезвычайно важно то, что упомянутые выше системы используют только воздух и воду, поэтому они абсолютно безвредны для окружающей среды при работе двигателя на любых режимах.

Литература

1. Fujibayashi, T. *et al.* «Development of Marine SCR System for Large Two-stroke Diesel Engines Complying with IMO NO_x Tier III» CIMAC, 2013, Paper № 29.
2. Soikkeli, S. *et al.* «Design aspects of SCR systems for HFO fired marine diesel engines» CIMAC, 2013, Paper № 179.
3. Steffe, P. *et al.* «High Performance Solutions for IMO TIER III — System Integration of Engine and Aftertreatment Technologies as Element of Success» CIMAC, 2013, Paper № 212.
4. Briggs, J., and McCarney, J. «Field experience of Marine SCR» CIMAC, 2013, Paper № 220.
5. Shirai, T. *et al.* «EGR system Development on MES Test engine 4S50ME-T9» CIMAC, 2013, Paper № 176.
6. Higashida, M. *et al.* «Newly Developed Combined EGR & WEF System to comply with IMO NO_x Regulation Tier 3 for Two-stroke Diesel Engine» CIMAC, 2013, Paper № 200.
7. Kalsoft, J., and Preem, M. «Development of integrated EGR system for two-stroke diesel engines» CIMAC, 2013, Paper № 219.
8. Tsuda, M. *et al.* «Development of DPF [Diesel Particulate Filter] with a Regenerator for Marine Diesel Engines» CIMAC, 2013, Paper № 255.
9. Maeda, K. *et al.* «Reduction of NO_x Emission by 80 % Using the Newly Developed System with a Polymer Membrane in Marine Diesel Engines» CIMAC, 2013, Paper № 423.
10. Maeda, K. *et al.* «Studies on Reduction of Emissions from Marine Diesel Engine During Voyage» CIMAC 1998, pp. 729–738.

3D-ПЕЧАТЬ — АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА МАРШЕ

Alexander Sakotnig,
Alexander Leitner-Audouin,
Stephan Laiminger,
GE Jenbacher

Реферат

Хотя идея 3D-печати не так уж нова, сегодня она переживает, можно сказать, второе рождение. Сегодня наблюдается не только растущий спрос на технологии, позволяющие ускорить макетирование опытных образцов, но и настоящий прорыв в этой области. Снимается целый ряд технологических ограничений, решительно пересматриваются традиционные методы проектирования и изготовления компонентов. Во всех промышленных областях между ведущими производителями развернулась настоящая гонка за лидерство в деле запуска в серию металлических деталей, изготовленных методами 3D-печати.

Для этой технологии не существует большинства ограничений, свойственных традиционным методам проектирования и изготовления деталей.

Компания «General Electric» (GE) чрезвычайно быстрыми темпами внедряет метод аддитивного производства (наслоения) металлических деталей в самых различных областях своей деятельности. В настоящей статье приводится обзор современного состояния технологии 3D-печати и критериев выбора компонентов, намечаемых для постановки на серийное производство данным методом. Основное внимание при этом уделяется деталям, относящимся к двигателям внутреннего сгорания и сопутствующей оснастке.

Целью является распространение данной технологии на серийное производство, чтобы при этом наиболее полно использовать все ее возможности. Это значит, что необходимо радикальным образом изменить процесс проектирования, чтобы по максимуму использовать потенциал этой технологии и сделать ее конкурентоспособной по отношению к традиционным методам. В докладе описан весь цикл создания изделия новым методом, от проекта до прототипа, и далее — до серийного образца, а также критерии отбора компонентов — кандидатов для запуска в серию.

Уже сейчас отобрано для запуска в серию огромное количество самых разнообразных узлов и деталей, но это лишь верхушка айсберга. На повестке дня — полный пересмотр с этой точки зрения технологии производства всей существующей номенклатуры изделий на системной основе. Основные кандидаты — это изделия, при обработке которых образуется большое количество отходов, сложные сборки и сварные узлы, а также изделия большой трудоемкости. Попутно

ставится задача снижения (по возможности) производственных затрат. На ближайшее будущее планируется начало опытов с гибридной печатью из материалов различной природы и с разными свойствами, что позволяет прогнозировать выход на новый уровень в использовании всех возможностей данной технологии.

Для ее успеха важно, чтобы процесс проектирования был коренным образом пересмотрен, и чтобы ограничения, которые со студенческой скамьи были вбиты в головы инженеров, перестали существовать.

Введение

Будучи одним из мировых промышленных лидеров, корпорация GE постоянно ищет новые технические решения и инновационные формы организации бизнеса. Это относится к обновлению как выпускаемых изделий, так и технологий их производства. Стремясь максимально сократить цикл разработки и внедрения новой продукции, в 2008 г. была запущена программа «Rapid Prototyping via 3D-printing» (быстрое макетирование с помощью 3D-печати). Эта программа включала в себя интенсивные исследования обратного инжиниринга как инструмента для применения системы расплавленного наложения (Fused Deposition Modeling System), а также создание центра разработок по данной теме (рис. 1). В рамках программы GE по созданию центра компетенции в области аддитивного производства были сделаны крупные инвестиции в строительство лаборатории 3D-печати (рис. 2). Целью этих инвестиций было объединение всех ресурсов, имеющих отношение к аддитивному производству, и формирование новой команды из специалистов по GSCM и технологиям. Церемония официального открытия состоялась в апреле 2015 г. К этому моменту завершились испытания и ввод в эксплуатацию нового 3D-принтера для металлических изделий. (рис. 3)

С самого начала был раскрыт огромный потенциал метода наложения, что привело к решению создать специальную группу для дальнейшего продвижения этой технологии. Был организован центр компетенции, объединивший усилия

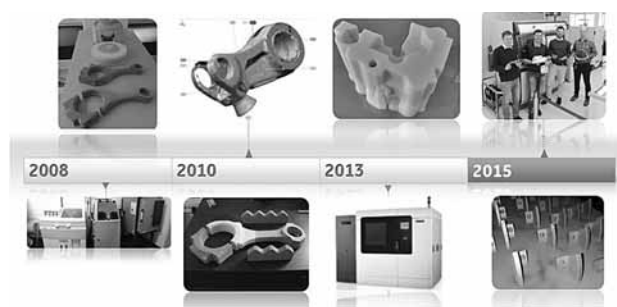


Рис. 1. Прогресс в области аддитивного производства компонентов для газовых двигателей GE — Jenbacher



Рис. 2. Переоборудование существующего цеха



Рис. 3. Новый цех в день торжественного открытия

инженеров-проектировщиков и технологов. Приобретение нового принтера для печати металлических изделий подтвердило намерения инженеров не ограничиваться теоретическими изысканиями, а сразу же приступить к реальному использованию технологии аддитивного производства. Такое междисциплинарное взаимодействие способствовало быстрому усвоению полученных уроков, обмену информацией и опытом, и скорейшему внедрению их в жизнь.

3D-печать металлоизделий: основные положения и концепции

Параллельно с приобретением и освоением нового 3D-принтера для металла проводился интенсивный анализ номенклатуры продукции фирмы в поисках подходящих компонентов. Все это время поддерживался тесный контакт с другими центрами аддитивной технологии GE, поскольку многие из них уже имели опыт освоения этой технологии для других изделий. Выбор принтера с ручной подачей порошка позволил расширить область его возможного применения. В этом случае появляется возможность выбирать самые различные материалы. Наиболее ходовые металлические порошки (как химически активные, так и неактивные) могут обрабатываться с помощью лазерного плавления (наплавки), например, инструментальная сталь, инконель, алюминий, титан, кобальт, хром и HastelloyX.

Необходимые для 3D-печати массивы данных создаются путем импорта из CAD файлов, описывающих геометрию деталей (в формате например, *.stl), в фирменный программный пакет MAGICS. С помощью этого приложения массивы данных переводятся в формат, используемый для печати, и, в случае необходимости, имеется возможность добавить к несущей конструкции новые элементы. Последнее часто бывает необходимо для выполнения и оптимизации печати, повышения жесткости конструкции во избежание деформаций. Затем обработчик печати принтера формирует слои объекта толщиной от 30 до 50 мкм, и рассчитывает параметры работы лазера для каждого прохода, а также общую продолжительность печати.

Основы аддитивной технологии

Первой операцией является предварительный нагрев опорной платформы до температуры порядка 200 °С. После этого, во избежание окисления металлического порошка во время плавки, технологическая камера заполняется азотом. В принципе, печать может вестись без вмешательства оператора. При этом, однако, на рабочем месте всегда должно быть достаточное количество нужных материалов, например, контейнеров для крупных фрагментов. По завершении печати сыпучие остатки могут быть откалиброваны на сите и затем повторно использованы, так как на изготовление компонента пошла только расплавленная часть материала. После этого производится термообработка всей конструкции, включая опорную плиту, для снятия внутренних напряжений. Последняя операция — механическое разобщение всех наплавленных элементов с платформой. Все компоненты, к чистоте поверхности которых предъявляются особо высокие требования, впоследствии проходят дополнительную механическую обработку. Существующее

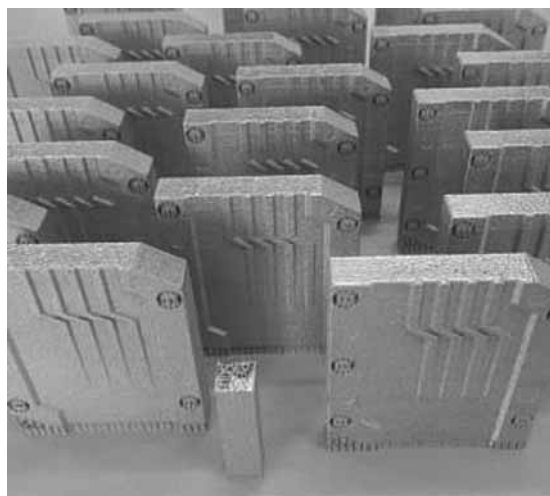


Рис. 4. Контрольные крышки для промежуточного опытного варианта, изготовленные в цеху заказчика

оборудование позволяет обеспечить «средний» класс точности размеров и плотность компонентов >99 % (рис. 4).

Разработчикам без особого труда удалось научить инженеров использовать все преимущества этой многообещающей технологии. В самом начале было сделано несколько учебных образцов и выпущено несколько инструкций общего характера по объемной печати, после чего «процесс пошел» сам собой. Постепенно интерес к технологии аддитивного производства и ее возможностям стало проявлять все большее и большее число специалистов фирмы.

Изучение опыта других подразделений GE в данной области помогло оценить огромный потенциал применения 3D-печати в ходе разработки и изготовления металлических изделий. Возникла необходимость создания корпоративного банка инновационных идей в данной области, который станет базой для широкого внедрения данной технологии. Для ее продвижения были использованы все существующие механизмы пропаганды передового опыта, включая неформальные дни открытых дверей для разных групп, объявления, выводимые на внутренние экраны новостей, и средства онлайн-общения. Все это, в том числе разного рода накладные расходы, является частью работы в рамках австрийской Программы исследований аддитивного производства (www.addmanu.at).

Специалисты компании продолжают учиться, шаг за шагом осваивая новый «аддитивный» образ мыслей.

Общий подход

С первого дня существования центра компетенции в области аддитивной технологии проводилась работа по внедрению 3D-печати в производство газовых двигателей Jenbacher. Степень использования существующего оборудования непрерывно растет, этот показатель постоянно измеряется и регистрируется.

Первым шагом программы стала установка нового принтера для печати изделий из металлического порошка с последующим вводом его в эксплуатацию. После успешной установки и наладки принтера на его штатном месте была выполнена пробная печать нескольких изделий из инструментальной стали 1.2709 по образцу компонентов, сделанных из порошка Inconel 718 на площадке изготовителя в ходе приемо-сдаточных испытаний (рис. 5). Все навыки, полученные в процесс обучения, были использованы для оптимизации технологии печати и позиционирования деталей таким образом, чтобы по возможности сохранять опоры. Во время печати этой первой пробной партии, после нанесения около 200 слоев, произошел отказ.



Рис. 5. Первые опытные образцы различных изделий

Для разбора причин отказа был собран совет из техников по обслуживанию оборудования и членов «аддитивной» команды. В течение дня причина отказа была выявлена. При этом была осознана необходимость разработки детального плана печати.

Самым важным достижением в процессе ввода оборудования в эксплуатацию было определение критериев качества компонентов, необходимых для окончательной приемки оборудования. К числу ключевых критериев относятся, например, пористость (рис. 6), общие допуски и чистота поверхности. Огромная помощь в этом была оказана лабораторией материаловедения. Протоколы материаловедческого анализа позволили в короткий срок завершить ввод машины в эксплуатацию.

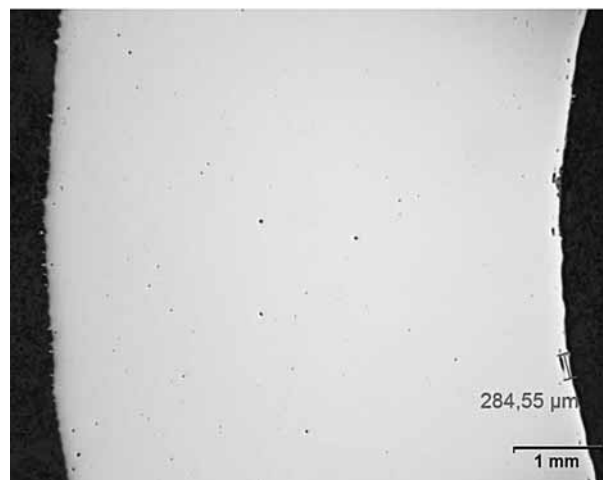


Рис. 6. Материаловедческий анализ — уровень пористости материала EHS

С точки зрения требований EHS (охрана труда, окружающей среды и безопасность) для обеспечения необходимых индивидуальных средств защиты персонала необходимо было предварительно провести весьма детальное и обширное исследование. Прежде всего было необходимо убедиться в выполнении всех соответствующих требований нормативных документов, особенно касающихся безопасности и эргономики при работе с металлическим порошком и непосредственно с 3D-принтером.

С учетом того, что металлические порошки, используемые при изготовлении печатных деталей (Al, Ti, CoCr, Steel, Inconel, ...), отличаются чрезвычайной химической активностью и склонностью к возгоранию, было необходимо принимать во внимание следующие моменты:

- химически активные материалы, такие как титан или алюминий, является пирофорными, т. е. склонными к спонтанному самовозгоранию;
- необходимо устранить все источники потенциального возгорания;
- исключить возможность хранения металлических порошков вблизи взрывоопасных объектов;
- необходимо оборудовать рабочие места огнетушителями класса D для металла;
- необходимо обеспечить строгое соблюдение всех инструкций изготовителя, в том числе мер предосторожности во время смены фильтров, использование средств обеспечения безопасности, принятие всех необходимых мер для успешной реактивации порошка;
- процесс печати сопровождается выделением большого количества тепла, что может привести к ожогам;
- существует опасность вдыхания персоналом частиц порошка размером 10–65 мкм;
- при работе с порошками алюминия и титана в качестве инертного газа необходимо использовать аргон, в остальных случаях можно использовать азот;

Безопасность технологии была обеспечена консультациями со специалистом в области EHS относительно оценки рисков при работе с порошками и самим принтером.

Обзор деятельности GE в области аддитивного производства

Приняв для себя решение и выработав четкую стратегию, корпорация GE с самого начала приступила к инвестированию в аддитивное производство, и в течение последних двух лет размеры инвестиций были весьма существенными. Эта технология была принята различными бизнес-сегментами корпорации и Глобальным исследовательским центром корпорации GE, которая стала мировым лидером в данной области.



Рис. 7. Центр САТА — Питтсбург, Пенсильвания

К 2020 г. авиационным подразделением корпорация (GE Aviation) с помощью 3D-печати будет произведено порядка 100 000 деталей. В настоящее время во всех подразделениях GE используется более 300 3D-принтеров.

В последнее время появилось множество сообщений об успешном опыте производства металлических компонентов на предприятиях с помощью 3D-печати. В данный момент разворачиваются два больших проекта, реализация которых поможет скоординировать работы в этом направлении, ведущиеся различными подразделениями.

В Питтсбурге, Пенсильвания (рис. 7) GE собирается построить крупный Центр по продвижению аддитивной технологии (САТА). Он станет флагманом аддитивных производств GE, который будет находиться на передовом крае внедрения 3D-печати во всех подразделениях компании. Он должен стать средоточием инноваций, организовать подготовку специалистов и обеспечить дальнейшее развитие как конструкторских работ, так и применения этой революционной технологии. Центр будет поддерживать подразделения GE, работающие в области авиации, медицины, освещения, нефти и газа, электричества, транспорта и организации энергоснабжения.

В Гринвиле (Южная Каролина), SC GE Power оборудует еще один Центр такого же типа. Он будет ориентирован преимущественно на непосредственное внедрение данной технологии в практику, а также на помощь в выборе номенклатуры изделий и запуске в серию. В ближайшем будущем планируются крупные инвестиции в расширение производственных площадей, приобретение оборудования и создание порядка 80 новых рабочих мест.

Кроме того, существует высокотехнологичный центр GE по 3D-печати в Европе. Команда GE Birt имеет более чем 15-летний опыт по применению 3D-печати в производстве деталей газовых турбин.

Общие рекомендации по технологии, позиционированию деталей и стратегии наплавки

Поначалу кажется, что новая технология открывает поистине неограниченную свободу кон-

структурских решений, однако в реальности количество ограничений достаточно велико. Тем не менее, во многих случаях существует возможность эти ограничения так или иначе обойти. Например, во время одного из первых сеансов печати во время пусконаладочных работ при нескольких первых проходах оказалось нарушенным соединение между опорной конструкцией и опорной плитой, в результате чего было повреждено первое сопло восстановителя защитного покрытия. При «разборе полетов» было выявлено несколько возможностей для исправления обнаруженных дефектов, а именно:

- перед началом печати необходимо проверять / измерять уровень влажности порошка, причем влажность металлического порошка может быть существенно снижена путем установки нескольких (постоянных) поглотителей влаги в бункере для порошка;

- иногда можно наблюдать, что порошок не пристает к опорной плите из-за слишком сильной ее намагниченности, поэтому после каждой операции по механической обработке поверхности (шлифовка или пескоструйная обработка) требуется ее размагничивание (перевод в диамагнитное состояние);

- качество контакта с опорной плитой напрямую зависит от толщины первого слоя; причем слишком большая толщина первого слоя приводит к ухудшению качества контакта между слоями;

- необходимо выбирать оптимальное положение детали и использовать безопорные области.

Если угол наклона поверхности превышает 45° , возникает опасность минимального контакта с опорной плитой (рис. 8). Если несущая способность опорной конструкции недостаточна, то для улучшения качества контакта с опорной плитой следует увеличить площадь опоры или применить анкерное крепление. Это необходимо также для улучшения теплоотвода от детали к плите (рис. 9).



Рис. 8. Потеря контакта с опорной плитой

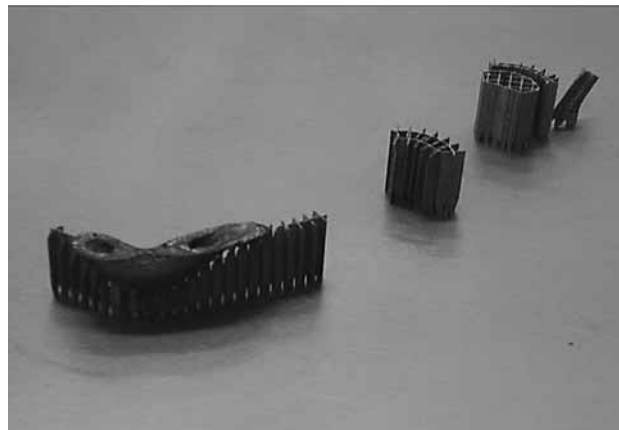


Рис. 9. Ухудшение теплоотвода к опорной плите

Существует целый ряд индивидуально настраиваемых параметров, специфичных для каждого конкретного применения. Значительная часть курса обучения посвящена программным ограничениям, свойственным каждому виду печатных компонентов, и способам их обхода. Это означает, что операторам, если они хотят чтобы принтер функционировал без сбоев, нужно проводить большую подготовительную работу для каждого вида деталей. В общем случае необходимо начинать с программы для обработки порошка инструментальной стали 1.2709, которая используется поставщиком принтера. При этом в ходе приемки машины нужно было изготовить деталь из материала Inconel 718 (у поставщика), а затем — из стали 1.2707 (на месте установки) (рис. 10).

Программы испытаний для различных деталей предусматривают проверку целого ряда параметров, таких как чистота поверхности, твердость, пористость, допуски и т. д. Такая проверка на соответствие указанным требованиям была проведена в течение нескольких дней после контрольной печати. Система подтвердила, что можно напечатать детали в соответствии со спецификациями материалов и техническими условиями поставщика машины. Еще одним важным шагом стала

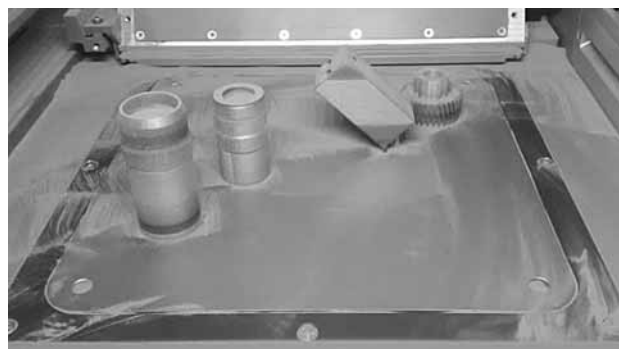


Рис. 10. Приемосдаточные испытания машины на месте установки

проверка системы на экологическое соответствие («green tag check») и проверка производственной площадки, только что переоборудованной в цех 3D печати, на соответствие званию лидера в области охраны окружающей среды и безопасности. Для этого потребовалось лишь уточнить некоторые процедуры и правила эргономики.

В ходе первой серии пробных / учебных испытаний было изготовлено множество копий самых различных компонентов. Был выполнен целый ряд заданий по печати простых и сложных деталей, с целью максимально быстрого обучения проектированию печатных компонентов, программированию системы, заданию параметров процессора и принтера.

Вообще говоря, это не самый эффективный способ обеспечить высокое качество продукции, но он позволяет быстро обучить персонал, как учитывать все необходимые факторы при проектировании, а также открывает невероятное разнообразие деталей, которые данным способом можно сделать из инструментальной стали. На примере печати сложных компонентов удалось познакомить с этим методом специалистов в масштабах всей корпорации и привлечь к нему больше внимания. Используя различные каналы для распространения данной информации, наши коллеги из разных подразделений стали активно предлагать свои идеи.

В результате было получено множество предложений, о которых также были проинформированы все подразделения компании. Например, предложен метод оценки эксплуатационной пригодности нового измерительного оборудования, а также составлен большой список серийно выпускаемых деталей двигателей внутреннего сгорания, для производства которых технология 3D-печати могла бы стать предпочтительной. Кроме того, появилось множество новых идей как свидетельство креативности и того образа мыслей, который необходим для аддитивной технологии. Оба подхода имеют право на жизнь. Креативные модели, демонстрирующие «аддитивное» мышление наших коллег, свидетельствуют не только об их готовности к продвижению новой технологии, но и подают хороший пример остальным членам команды.

Новый подход к конструированию

Правильный выбор технологии оказывает огромное влияние на сам процесс конструирования, выбор материалов, допусков и точности, на общие правила проектирования и даже на нормативную базу. Для каждой технологической операции существуют определенные инструкции или правила, соблюдение которых обеспечивает нужные технические и экономические характеристики изделия.

Все уже слышали о том, что с помощью аддитивной технологии или 3D печати можно изготовить деталь любой формы, какую только можно себе представить. Теперь, с учетом достаточно длительного опыта использования данной технологии, можно сказать, что это утверждение несколько преувеличено. Существуют определенные правила, которые необходимо соблюдать при использовании этой технологии, имеющей к тому же свои неочевидные особенности и ограничения. Нельзя просто взять и напечатать любой компонент традиционной конструкции. Для этого его конструкция должна быть оптимизирована в соответствии с *новыми* правилами проектирования. Вот несколько примеров.

➤ Даже при первом знакомстве с процессом становится очевидным, что следует избегать закрытых и малодоступных объемов, или же должна быть обеспечена возможность их очистки от порошка после печати, что само по себе требует времени.

➤ Модель не должна содержать плоских «крыш» или свесов с углом наклона $<45^\circ$. Их можно будет напечатать с соответствующими поддерживающими элементами, но последующее удаление этих элементов — процесс достаточно сложный и длительный.

➤ Все сопряжения должны выполняться очень осторожно, так как переход между более толстым и более тонким элементами создает ступеньку, а острые углы являются концентраторами напряжений.

➤ Чистота поверхности детали после печати невелика, примерно такая же, как после литья иликовки. Если нужна более высокая чистота поверхности, то, возможно, потребуются дополнительная механическая обработка.

➤ Поскольку детали печатаются или «фиксируются» на металлической плите, являющейся для них опорой, при подготовке печати надо обязательно учитывать пространственную ориентацию детали. Чем больше площадь опорной плиты, тем лучше.

➤ Размеры деталей ограничены размерами оборудования, которые в последние годы непрерывно увеличиваются.

➤ Части гибридных компонентов должны иметь горизонтальные соединительные поверхности, которые будут привариваться к вашей печатной детали.

Пожалуй, самое трудное — научить инженеров мыслить категориями 3D-печати и привить им вкус к технологии, где есть свои ограничения, но их все же меньше, чем обычно. Все приемы конструирования, как и существующие ограничения, должны быть пересмотрены и переосмыслены, может быть, даже изобретены заново.

Выбор компонентов для аддитивной печати

Если учесть вес и размеры деталей, становится понятно, что границы экономической целесообразности будут достигнуты очень скоро. Возникла необходимость внимательно и всесторонне рассмотреть процесс выбора компонентов, совместимых с требованиями аддитивной технологии. Здесь желателен системный подход к выбору компонентов, пригодных для 3D-печати, не упуская из виду (в конечном итоге) перспективу их постановки на серийное производство.

Например, для 3D-печати очень подходят компоненты, традиционно приготовленные с применением интенсивной механической обработки (когда в ходе механической обработки удаляется примерно 70–80% исходного материала). Главное здесь то, что при использовании 3D-печати сокращается время изготовления изделия, и нужна лишь добавка материала. Учитывая существующие на сегодняшний день ограничения, связанные с размерами оборудования и скоростью наплавки, желательно по возможности начинать с небольших деталей.

Сложные системы или сварные узлы (рис. 11), для изготовления которых требовались дорогостоящие приспособления, теперь могут быть заменены одной деталью. Поднутрения также не являются проблемой, учитывая большой выбор имеющихся технологий.

Другой пример — гибридные конструкции, в которых обычно печатная деталь используется в качестве опоры или фиксатора основной функциональной детали или компонента, как правило, достаточно сложной формы. Здесь идея состоит в том, чтобы для несущего элемента



Рис. 11. Сложные сварные узлы

использовать дешевый материал, обрабатываемый традиционным способом. Сложный или высоконагруженный элемент конструкции дополняется печатной деталью и становится частью гибридного компонента.

Примеры использования

Все подразделения фирмы проявили значительный интерес к организации производства деталей на новом оборудовании. Этот интерес подогревался сообщениями о том, что никаких ограничений на форму деталей теперь не существует. Рассматривались любые идеи, обещавшие успех и быстрый реальный результат. В каждом случае нужно было оценить правила конструирования системы, определить присущие ей ограничения и слабые места. Критерием отбора была способность принтера выполнять различные детали для комбинированных компонентов, например, крышку для защиты от возникающих при сварке брызг (рис. 12).

Исходя из конструкции крышки первоначально предполагалось выполнить ее целиком методом FDM, но это оказалось не лучшим решением, учитывая интенсивные термические напряжения, которым подвергается эта деталь. Решение объединить обычную технологию, методы FDM и DMLM позволило получить композитную конструкцию, удовлетворяющую всем техническим требованиям. Таким образом, каждый раз выбирался метод изготовления, который для данной конструкции был признан наиболее целесообразным.

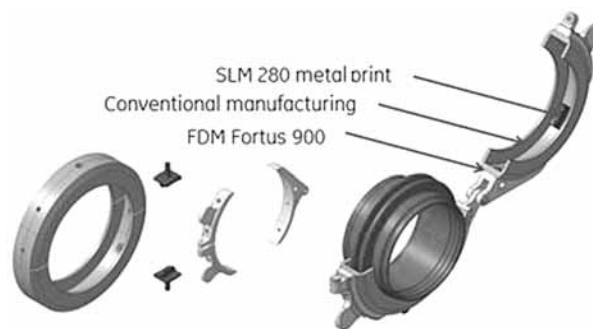


Рис. 12. Комбинированная защитная крышка



Рис. 13. Загрузочная воронка облегченного типа

Еще один пример удачного выбора детали — простая загрузочная воронка с отдельным уплотнением из стального прутка весом ~ 8 кг (рис. 13) где велик объем идущего в стружку материала.

Аддитивное конструирование позволяет реализовать легкий вариант этого изделия (из алюминия), весящий всего около 0,5 кг, также с возможностью вставки уплотнения. Впрочем, если планировать запуск его в серию, то, учитывая характеристики существующей системы (один лазер мощностью 400 Вт), можно ожидать, что себестоимость его удвоится, но зато аддитивные детали имеют целый ряд других преимуществ. Следует учесть такие факторы, как:

- сокращение времени на освоение новой продукции;
- снижение стоимости хранения;
- печать по мере необходимости;
- уменьшение числа этапов сборки;
- оптимизацию логистики.

Цикл создания нового изделия становится все короче и короче, соответственно, все меньше времени отводится на подготовку опытного образца к испытаниям. Аддитивная технология позволяет существенно ускорить создание прототипа. Раньше нередко возникали ситуации, когда сложные литые или кованные компоненты приходилось перепроектировать для изготовления сварного или полностью механически обработанного «двойника», чтобы как можно скорее провести функциональные испытания. При этом неизбежны были многочисленные ограничения и компромиссы. Сегодня с помощью 3D аддитивного производства появилась возможность оперативного макетирования (рис. 14), используя тот материал и придавая ему такую форму, которые наиболее близки к исходным техническим требованиям. Ценность функциональных испытаний возрастает, поскольку компонент по всем параметрам оказывается максимально приближен к серийному изделию. Аддитивная технология позволяет снизить затраты за счет отказа от дорогостоящей механической обработки, а также — за счет ранее упомянутого сокращения времени на освоение новой продукции.

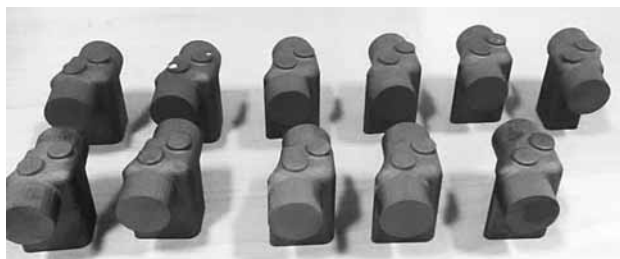


Рис. 14. Макеты изделий для функциональных испытаний на двигателе

Примером изделия, изготовленного методом 3D-печати и уже поставленного на серийное производство, является небольшая по размерам деталь, изготовление которой достаточно трудоемкое и дорогостоящее. Деталь, о которой идет речь, применяется при техобслуживании газового двигателя. Она является замечательным примером того, как возможности технологии меняют сам процесс мышления. Вместо поиска более сложных путей решения проблемы за счет изменения формы детали, производимой механической обработкой, с успехом была применена технология 3D-печати. Подобные примеры или иллюстрации еще не раз понадобятся для того, чтобы развивать у инженеров аддитивное мышление (рис. 15 и 16).

Еще одна весьма перспективная область возможного применения — разработка программных средств для оптимизации топологии. Такие программы обычно не учитывают моменты, связанные с технологией изготовления. 3D-печать представляется наиболее подходящей технологией для воспроизведения подобных сложных структур с помощью чисто физического подхода, заложенного в такие программы оптимизации.

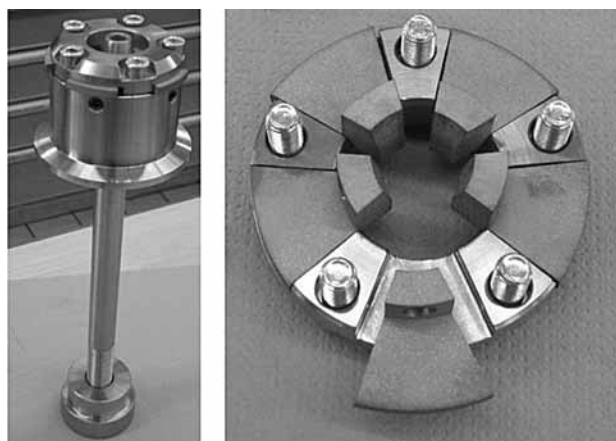


Рис. 15. Инструменты — постановка на серийное производство



Рис. 16. Детали для гибочного инструмента

Определение пост-обработки / контроль качества

В сущности, печать представляет собой лишь один из многих шагов в процессе создания качественных деталей, которые могут пойти в серию. Есть еще целый ряд шагов, которые необходимы, чтобы можно было убедиться в достижении целевых показателей качества.

Самое главное — это термообработка каждой напечатанной детали и точное соблюдение порядка операций (например, полная очистка от остатков порошка после печати, или удаление компонентов, которые должны быть отрезаны от несущей платы перед термообработкой).

Важнейшая операция — это проверка качества, поскольку существует множество факторов, напрямую связанных с качеством детали. Например, за время трехнедельного технологического перерыва из оборудования не удалялся порошок. После включения принтера и печати с тем же порошком отправили печатные детали на материаловедческий анализ. Оказалось, что за это время значительно возросла пористость материала — до ~50 мкм.

Перспективы

Быстрый успех и прекрасные результаты в изготовлении методом 3D печати опытных образцов, инструментов, гибридных деталей, запчастей для двигателей заказчика, а также попутные конструктивные усовершенствования позволяют надеяться на то, что серийное производство деталей двигателей аддитивным методом начнется очень скоро. При этом данную технологию целесообразно использовать наряду с другими. До сих пор, несмотря на многочисленные сообщения с налетом сенсации о возможностях 3D-печати, ее использование в производстве остается весьма ограниченным, поскольку она достаточно дорогая. Это широко известный факт и крайне важно сейчас сосредоточить усилия на создании такого оборудования, которое поможет решить эту проблему. Сегодня наблюдается стремительный рост показателей 3D-принтеров, в которых увеличивается число лазеров, растет их мощность, точность и эффективность контроля качества при печати. Команда специалистов по аддитивным технологиям занимается теми проектами, которые имеют наибольшие шансы пуска в серию. Идет интенсивный подбор деталей двигателей, которые можно изготовить из сплава Inconel для 3D-печати и организацией их производства. Это прекрасная возможность воспользоваться всеми преимуществами аддитивной технологии для увеличения ресурса деталей, их прочности и термостойкости.

Еще одно приоритетное направление — это ускорение исследований в области гибридной печати. Использование традиционных технологий в сочетании с возможностью делать детали сложной формы, применяя 3D-печать только там, где это диктуется спецификой применения, позволяет уменьшить число компонентов, существенно снизить трудозатраты и себестоимость. Для этого нужно оптимизировать процесс систематического отбора компонентов двигателей, наиболее подходящих для производства с помощью 3D-печати. Часть критериев отбора уже сформулирована, теперь настало время проверки созданной модели.

Утилизация химически активных материалов, таких как алюминий, должна стать еще одним шагом в направлении перехода к аддитивному производству таких деталей, которые в настоящее время дают огромный объем отходов, имеют большое количество модификаций с небольшими конструктивными отличиями и производятся небольшими сериями.

Здесь ключевое условие успеха — приучить инженеров к тому, чтобы дважды подумать, прежде чем приступить к проектированию, а также оценить возможности использования 3D-печати как альтернативной технологии, разработки гибридного изделия и оптимизации конструкции. Высокомотивированные команды специалистов и наличие нескольких центров компетенций позволяют надеяться, что организация аддитивного производства в GE вскоре станет еще одним примером успешного внедрения этой технологии.

Термины и использованные сокращения

GE	General Electric
GSCM	Управление глобальными цепями поставок (Global Supply Chain Management)
EHS	Экология, охрана здоровья, безопасность (Environmental, Health and Safety)
Гибридные детали	Метод изготовления — непосредственная наплавка/сварка на заготовках
CATA	Центр развития аддитивных технологий (Center for Additive Technology Advancement)
FDM	Расплавное наложение (Fused Deposition Modeling)
DMLM	Прямое лазерное спекание металла (Direct Metal Laser Melting)
HastelloyX	Зарегистрированная торговая марка HAYNES INTERNATIONAL INC
MAGICS	Зарегистрированная торговая марка Materialise N.V.

Литература

1. Аддитивное производство GE <http://www.ge.com/stories/advanced-manufacturing>

УДК 621.43.01

Малозёмов А.А., Кукис В.С., Гимазетдинов Р.Р. Разработка математической модели и программного обеспечения для имитационного моделирования поршневых ДВС // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 3–9.

Ключевые слова: поршневые двигатели, математическая модель, программное обеспечение, рабочие процессы, системная динамика.

Представлены результаты работ по созданию математической модели и программного обеспечения для имитационного моделирования поршневого ДВС. Модель основана на методе энергетического и массового баланса, теории бондграфов и представляет собой библиотеку элементов, описывающих процессы в системах и механизмах двигателя. Созданные математическая модель и программное обеспечение обеспечивают высокую скорость, достоверность и точность расчета, что подтверждено экспериментальными данными. Ил. 5. Библ. 17.

УДК 621.78

Иванов Д.А., Зюкин В.С., Колосков А.А. Изменение механических свойств элементов конструкции авиационной техники под действием нестационарных дозвуковых воздушных потоков // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 10–13.

Ключевые слова: авиационные двигатели, нестационарные воздушные потоки, элементы конструкции, изменение механических свойств, методы упрочнения.

Представлены результаты исследования изменения механических свойств металлических конструктивных элементов авиационной техники и авиационных двигателей при воздействии нестационарных воздушных потоков. Найдены оптимальная продолжительность и интенсивность обработки. Показано, что методы повышения механических свойств элементов конструкции воздушных судов с использованием нестационарных воздушных потоков применимы не только при их изготовлении, но и в процессе эксплуатации, технического обслуживания и восстановительного ремонта. Табл. 2. Ил. 3. Библ. 10.

УДК 631.443

Плотников С.А., Зубакин А.С. Анализ процесса сгорания генераторного газа и его смеси с бензином в поршневом двигателе // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 14–18.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, генераторный газ, смесевое топливо, индикаторная диаграмма, эффективные показатели, экономия нефтяного топлива.

Приведены результаты стендовых испытаний двигателя 1Ч6,8/5,4 с искровым зажиганием при работе на бензине, генераторном газе и их смеси. Определены регулировочные, экономические и эффективные показатели при работе двигателя по нагрузочным и скоростным характеристикам. Выполнена обработка индикаторных диаграмм двигателя с построением характеристик тепловыделения. Установлено, что при замещении до 70 % бензина генераторным газом снижается его теплонпряженность и улучшаются экологические показатели. Ил. 7. Библ. 8.

УДК 355.673:621.182/621.18

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.

Ключевые слова: дизельные теплоэлектростанции, активные котлы-утилизаторы, твердое топливо, повышение эффективности котла, снижение вредных выбросов.

Представлен обзор технических решений конструкции силовой установки с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя. Разработана математическая модель и получены расчетные технические характеристики теплоэнергетической установки с подачей отработавших газов дизель-генератора в топочное устройство котла. Показана возможность повышения эффективности твердо-

топливного котла и снижения выбросов вредных веществ при сохранении тепловой мощности комбинированной теплоэнергетической установки. Ил. 7. Библ. 6.

УДК 355.673:621.182/621.18

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.

Ключевые слова: твердотопливные котлы, высокотемпературный кипящий слой, автоматизация процесса горения, рециркуляция дымовых газов.

Рассмотрены перспективы применения автоматизированных твердотопливных котлов малой мощности, работающих по технологии высокотемпературного кипящего слоя (ВТКС) с рециркуляцией дымовых газов. Методами численного моделирования исследованы динамические характеристики котлов (ВТКС) при различных возмущающих воздействиях. Показано, что процесс горения твердого топлива в котлах ВТКС с рециркуляцией дымовых газов, в сравнении с котлами без рециркуляции, характеризуется улучшением параметров переходных процессов. Ил. 4. Библ. 6.

УДК 629.3.014.2.017

Дунаев А.В., Пустовой И.Ф. Механизмы образования триботехнических покрытий при использовании геомодификаторов трения // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 29–34.

Ключевые слова: поршневые ДВС, безразборный ремонт, геомодификаторы трения, триботехнические покрытия, механизм образования и наращивания покрытий.

Рассмотрены различные триботехнические составы для безразборного ремонта изношенных сопряжений трения деталей различной техники, в том числе поршневых ДВС, на основе высокодисперсных порошков минералов группы серпентинов или геомодификаторов трения (ГМТ). Выполнен анализ структуры и свойств покрытий на поверхности восстановленных деталей, предложена гипотеза образования триботехнических покрытий на основе ГМТ в маслах и смазках. Ил. 7. Библ. 8.

УДК 621.43

Новые технологии в двигателестроении (материалы конгресса SIMAC-2016) // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 35–54.

Ключевые слова: дизели, выбросы NO_x , полимерные мембраны, снижение кислорода во впускном воздухе, водотопливная эмульсия, детали сложной формы, метод 3D-печати, металлические порошки, послойное лазерное наплавление.

В обзоре представлены новые технологии, направленные на решение актуальных проблем двигателестроения в областях снижения вредных выбросов в атмосферу и ресурсосбережения при изготовлении деталей сложной формы методом 3D-печати. Фирма «Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Япония) результаты исследований системы снижения выбросов NO_x дизелей за счет уменьшения концентрации кислорода во впускном воздухе при использовании специальной полимерной мембраны (ORM — oxygen reduction membrane). В целях обеспечения требований IMO Tier III по выбросам NO_x система ORM дополнена установкой приготовления стабильной водотопливной эмульсии (ВТЭ).

Освоение 3D-печати компонентов двигателей из металлических порошков с послойным лазерным наплавлением позволяет снять целый ряд технологических ограничений при проектировании и изготовлении деталей двигателей сложной формы. Компания «General Electric» (GE) приводит обзор современного состояния развития технологии 3D-печати в своих производственных подразделениях и критериев выбора компонентов, намечаемых для постановки на серийное производство данным методом.

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником

Табл. 2. Ил. 44. Библ. 11.

UDC 621.43.01

Malozymov A.A., Kukis V.S. and Ghimazetdinov R.R. Mathematical model and software for reciprocating engine simulation // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 3–9.

Keywords: reciprocating engine, mathematical model, software, combustion, system dynamics.

The authors developed original mathematical model and software for reciprocating engine simulation. The model is based on energy & mass balance method, and bond graph theory. Basically, it is the library of elements, which describe processes in engine systems and mechanisms. The model and software in question overperform known state-of-art analogs in terms of computational speed, reliability and precision, which is verified by comparative tests. They enable conjugate simulation of steady-state and transient multidomain processes in various systems and mechanisms of a reciprocating engine. 5 ill., 17 ref.

UDC 621.78

Ivanov D.A., Zyukin V.S. and Koloskov A.A. Nonstationary subsonic air currents as a factor affecting mechanical properties of aircraft components // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 10–13.

Keywords: aircraft engine, nonstationary air current, aircraft component, mechanical degradation, hardening methods.

The authors investigated changes in mechanical properties of aircraft components exposed to nonstationary air currents. The results of the investigation enabled them to optimize duration and intensity of mechanical treatment of said components. Considered methods of aircraft component hardening are shown to be applicable not only in manufacturing technologies, but also for maintenance and repair. Long-term exposure to nonstationary air currents is demonstrated to result in mechanical degradation of aircraft components. 2 tables, 3 ill., 10 ref.

UDC 631.443

Plotnikov S.A. and Zubakin A.S. Combustion of generator gas and its mixture with gasoline in a reciprocating engine // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 14–18.

Keywords: alternative energy sources, generator gas, mixed fuel, indicating diagram, effective performance indices, petrol fuel saving.

The article discusses the results of stand tests of spark ignition engine type 1CH6,8/5,4 operating alternatively on gasoline, generator gas and their mixture. Dependences of performance indices on engine speed and load have been determined. Based on indicating diagrams heat release curves have been traced. As it happened, up to 70 % gasoline may be substituted for generator gas with no appreciable decrease in effective performance indices, emission and thermal stress characteristics being definitely improved. 7 ill., 8 ref.

UDC 355.673:621.182/621.18

Smirnov A.V., Bondarev A.V., Alexandrov S.V. and Bolbyshev E.V. Development of diesel power plants with active waste heat boilers featuring high-temperature fluidized bed // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 19–23.

Keywords: diesel power plant, active waste heat boiler, solid fuel, high-temperature fluidized bed, exhaust gas heat recovery, improvement of boiler efficiency, emission reduction.

Presented is a review of known solutions for power plant with active waste heat boilers featuring high-temperature fluidized bed. The authors developed mathematical model and calculated parameters of power plant featuring exhaust gas injection into the boiler furnace. Possibility of improvement in solid fuel boiler efficiency and emission reduction without compromising plant heat power is shown. 7 ill., 6 ref.

UDC 355.673:621.182/621.18

Bondarev A.V., Bolbyshev E.V. and Smirnov A.V. Automation of low-powered boilers featuring high-temperature fluidized bed and flue gas recirculation // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 24–28.

Keywords: solid fuel boiler, high-temperature fluidized bed, combustion controls, flue gas recirculation, disturbances, transient performance.

Application prospects and possible ways of efficiency improvement for low-powered boilers featuring high-temperature fluidized bed (HTFB) and flue gas recirculation are considered. Transient characteristics of HTFB boilers in response to various disturbances are plotted by means of numerical modelling. It is shown that solid fuel combustion characteristics in HTFB boilers featuring flue gas recirculation are definitely better than those in no-recirculation boilers. In particular, HTFB boilers demonstrate shorter response time and transient period, with optimum excess air ratio. 4 ill., 6 ref.

UDC 629.3.014.2.017

Dunaev A.V. and Pustovoy I.F. Mechanism of formation of antifriction coating with geomodifiers // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 29–34.

Keywords: reciprocating engine, no-dismantle repair, friction geomodifiers, antifriction coatings, coating composition and properties, mechanism of coating formation and building-up.

Considered are a number of antifriction compositions for no-dismantle repair of worn-out contact surfaces of various machines, including reciprocating engines, based on fine-grained powder from mineral serpentines or friction geomodifiers (FGD). Structure and properties of coatings on rebuilt parts were studied, whereupon a hypothesis of FGD-based coatings formation on engine parts exposed to lube oil was offered. Said hypothesis accounts for coating build-up even after FGD is removed from lube oil. 7 ill., 8 ref.

UDC 621.43

Modern technologies in engine building (based on CIMAC-2016 papers) // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 35–54.

Keywords: diesel engine, NO_x emissions, polymer membrane, oxygen reduction, water mixed fuel, nano-level disperse water phase, complex components, 3D-printing, metal powder, laser additive manufacturing, design methods.

The review covers new engine building technologies that contribute into emission reduction and resource saving when manufacturing complex components on 3D-printer.

«Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Japan) presented the results of testing the NO_x reduction system that decreases the oxygen concentration in the intake or scavenging air using a special polymer membrane (ORM — oxygen reduction membrane). In order to secure compliance with IMO Tier III specifications for NO_x emissions, ORM system was added with a newly developed water mixed fuel (WMF) system, in which the fuel is mixed with water just prior to the fuel injection device, generating steady combustion without additives by reducing the droplet size to the nano-level.

Implementation of 3D-printing (metal additive) technology enabled us to break boundaries of conventional design and manufacturing, particularly when it comes to parts of sophisticated geometry. «General Electric» (GE) provides the review of today status of metal additive manufacturing in its branches, and identifies criteria for components targeted for serial production with said method. According to GE, crucial for the success of this technology is to re-imagine the design process and close out boundaries that has been forced into the heads of the engineers.

The CIMAC papers are translated into Russian by G.Melnik, PhD. 2 tables, 44 ill., 11 ref.