

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]), GASYN (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-исследова-

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-

метризованным 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:

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

где p — номер порта; H — энтальпия через порт; T — температура газа; C — концентрация компонентов (вектор); u — удельная внутренняя энергия газа (функция от температуры и состава газа); i — номер внутреннего источника или стока энергии; Q_{mi} — энергия внутреннего источника или стока; j — номер внешнего источника или стока энергии; Q_{outj} — 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:

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

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:

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

где G_{mi} — 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:

$$\frac{dG_{mi}}{dt} = G_m \cdot \frac{dX}{dt} \cdot (1 - L_r), \quad (9)$$

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

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

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:

$$\sum_1^p \frac{dG_p}{dt} = 0. \quad (13)$$

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]:

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

где $\pi_{\kappa c}$ — 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):

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

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-

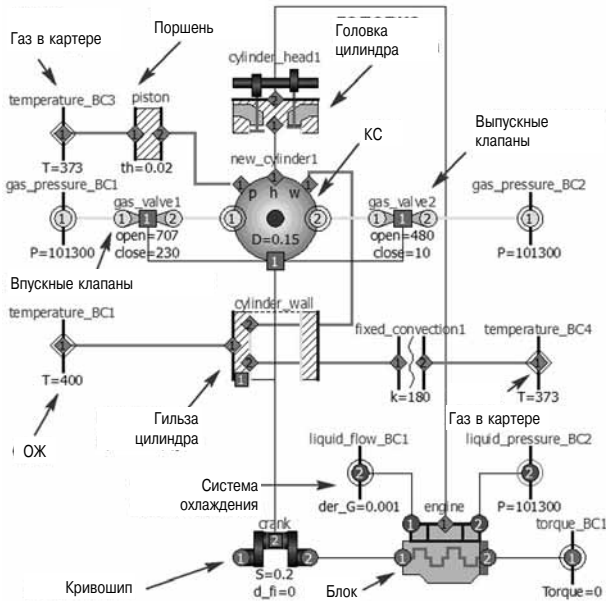


Рис. 1. Подсистема «отсек двигателя» (фрагмент имитационной модели ПДВС)

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. Поток переменной для вращающихся элементов является момент, потенциальной — угол

поворота, базовые классы — «масса», обладающая инерцией и «пружина». Для поступательно движущихся элементов поток 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:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\sum_p M_p}{J}, \quad (36)$$

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

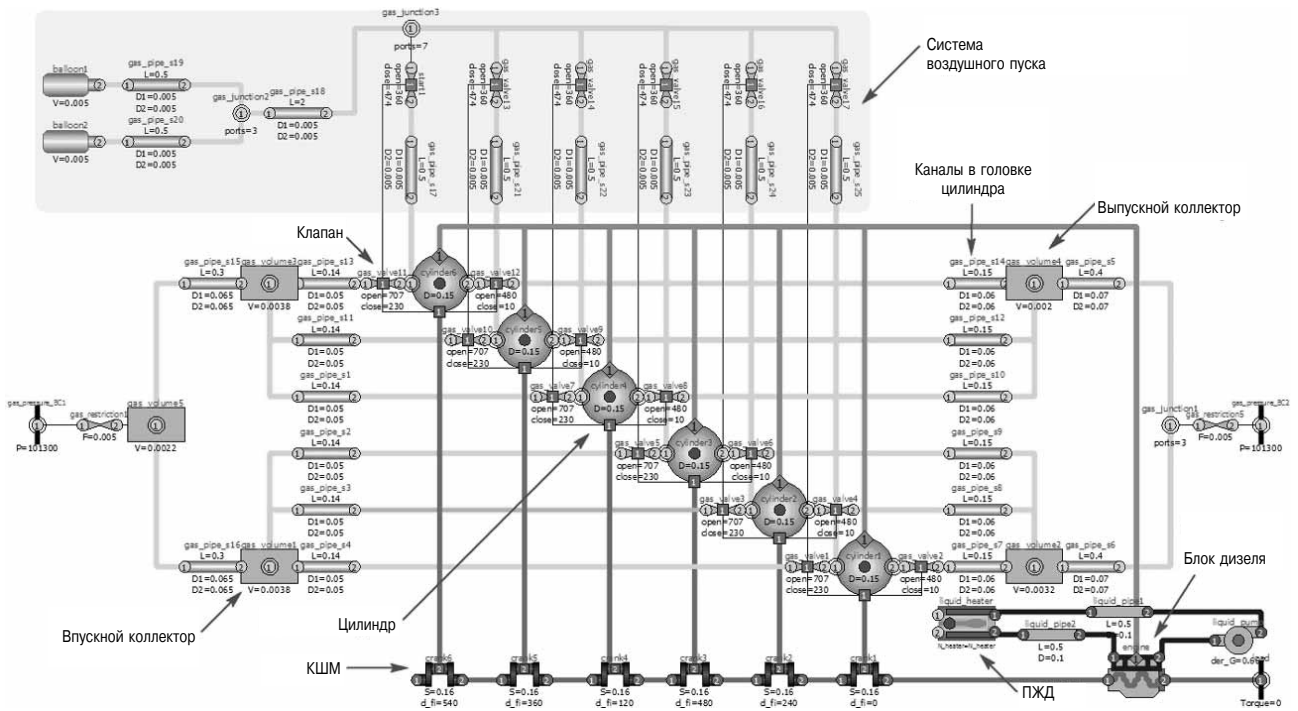


Рис. 2. Имитационная модель шестицилиндрового дизеля типа ЧН15/16 с системой воздушного пуска

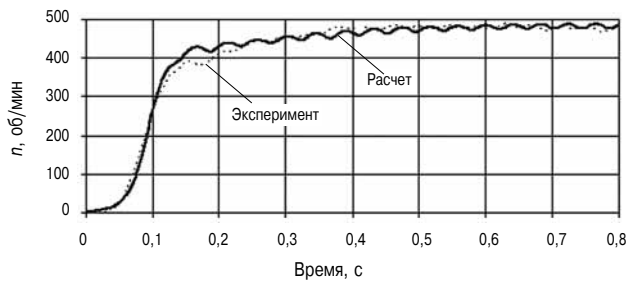


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по частоте вращения коленчатого вала (n) при прокручивании двигателя 6ЧН15/16 сжатым воздухом

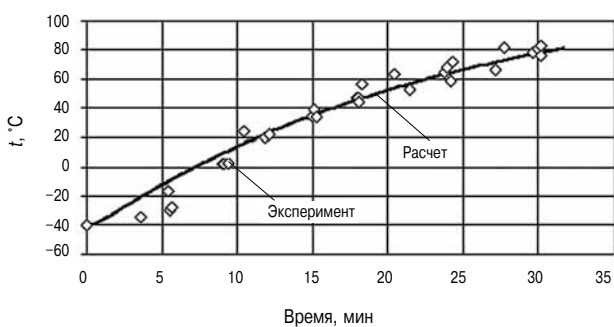


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по температуре охлаждающей жидкости (t) при предпусковом разогреве двигателя типа 12ЧН15/18 подогревателем ПЖД-600

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 системы 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-

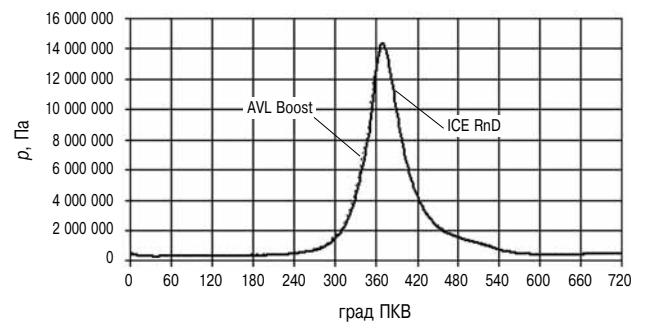


Рис. 5. Сравнение результатов расчета индикаторного давления (p) в камере сгорания двигателя типа 6ЧН15/16 с применением AVL Boost и разработанного ПО (Model)

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. Fritzon P. Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 3.3: A cyber-physical approach / P. Fritzon, 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.