

РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ	ANALYSES, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF ENGINES
<i>Кавтарадзе Р.З.</i> Развитие теории рабочих процессов ДВС в МГТУ им. Н.Э. Баумана: от метода Гриневецкого до современных 3D-моделей (продолжение)	<i>Kavtaradze R.Z.</i> Development of combustion theory in Bauman Technical University: from Grinevetsky method to modern 3D-models (Continuation)
<i>Рыжов В.А.</i> Результаты экспериментальных исследований пусковых свойств судового дизель-генератора	<i>Ryzhov V.A.</i> Starting performance of a marine diesel-generator
<i>Вальехо Мальдонадо П.Р., Гусаров В.В., Чайнов Н.Д.</i> Возможности уравнивания двигателя типа VR-5	<i>Vallejo Maldonado P.R., Gusarov V.V. and Chainov N.D.</i> Balancing engine type VR-5
СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ. АГРЕГАТЫ	ENGINE SYSTEMS AND UNITS
<i>Циплёнкин Г.Е., Иовлев В.И.</i> Фирма «ABB Turbocharging» на конгрессе CIMAC 2019	<i>Tsyplyonkin G.E and Iovlev V.I.</i> ABB Turbo Systems' presentation at CIMAC-2019 Congress
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	CONSTRUCTION MATERIALS
<i>Румб В.К., Школьный А.С, Хтоо Наинг Аунг</i> Особенности прогнозирования остаточной долговечности деталей ДВС по критерию усталости материала	<i>Rumb V.K., Schkolny A.S. and Htoo Naing Aung</i> Prediction of engine part remaining life based on fatigue criterion
ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ДВИГАТЕЛЕЙ	MAINTENANCE AND REPAIR ISSUES
<i>Колунин А.В., Бурьян И.А.</i> Влияние температурного состояния поршневого двигателя на расход картерных газов	<i>Kolunin A.V. and Buryan I.A.</i> Oil sump gas flow as a function of reciprocating engine thermal condition
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ	POWER PLANTS
<i>Сайданов В.О., Михайлин А.Б., Мартемьянов О.Л.</i> Оценка надежности систем децентрализованного энергоснабжения специальных объектов	<i>Saidanov V.O., Mikhailin A.B. and Martemyanov O.L.</i> Reliability of stand-alone power supplies for military users
НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ	ENGINE BUILDING NEWS
Альтернативные топлива (материалы конгресса CIMAC-2016)	Alternative fuels (based on CIMAC -2016 papers)
ИНФОРМАЦИЯ	INFORMATION
Рефераты статей	Synopsis
Перечень статей, опубликованных в журнале «Двигателестроение» за 2019 год	List of articles published in magazine for year 2019

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

ПРЕДПРИЯТИЯ

А.Н. Кострыгин	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
В.А. Шелеметьев	<i>зам. техн. директора</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
С.В. Хильченко	<i>техн. директор</i>	<i>ООО «Морские пропульсивные системы», Санкт-Петербурге</i>
А.К. Лимонов	<i>гл. конструктор</i>	<i>АО РУМО, Нижний Новгород</i>
Е.И. Бирюков	<i>гл. конструктор</i>	<i>АО «Барнаултрансмаши», г. Барнаул</i>
А.В. Попов	<i>зам. ген. директора</i>	<i>АО «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

В.А. Сорокин	<i>зав. отделом</i>	<i>ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.И. Ерофеев	<i>нач. отдела</i>	<i>I ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург</i>
В.В. Альт	<i>рук. науч. направления</i>	<i>ГНУ СибФТИ, г. Новосибирск</i>
Ю.А. Микутенок	<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>проф. ВШ энерг. маш.</i>	<i>СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург</i>
М.И. Куколев	<i>проф. ВШ гидротех. стр-ва</i>	<i>СПбПУ Петра Великого, 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>
С.П. Столяров	<i>зав. кафедрой СДВС и ДУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
В.К. Румб	<i>проф. кафедры СДВС и ДУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
А.В. Смирнов	<i>проф. 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>проф. кафедры ТД</i>	<i>БГТУ, г. Брянск</i>
А.В. Разуваев	<i>проф. 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 (2005–2019 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 02.12.2019
Подписано в печать 23.12.2019
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7
Зак. 312. 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». 2019. № 4 (278)

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДВС В МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА: ОТ МЕТОДА ГРИНЕВЕЦКОГО ДО СОВРЕМЕННЫХ 3D-МОДЕЛЕЙ*

*Р.З. Кавтарадзе, д.т.н., профессор
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

Выполнен анализ и сформулированы основные направления решения актуальных задач исследования и совершенствования внутрицилиндровых процессов, реализованных усилиями кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Обоснована необходимость создания и развития новой теории рабочего процесса поршневых двигателей с использованием многозональных и 3D-моделей рабочего процесса для решения задач кинетики образования вредных веществ и локального радиационно-конвективного теплообмена при горении топлива в цилиндре.

Продолжение. Начало см. №2 (276), № 3 (277) 2019

Моделирование локального теплообмена в камерах сгорания поршневых двигателей на основе теории пограничного слоя. Моделей локального теплообмена в камерах сгорания поршневых двигателей, предназначенных для определения термических граничных условий, т. е. локальных термических нагрузок на основные детали со стороны высокотемпературного рабочего тела, до начала 1980-х гг. практически не было. Основная причина такого положения — отсутствие трехмерной модели рабочего процесса, позволяющей определить локальные параметры рабочего тела, которые формируют локальные тепловые нагрузки на поверхности камеры сгорания.

Термические граничные условия (распределение плотностей тепловых потоков или коэффициентов теплоотдачи на поверхностях отдельных деталей, например, поршня), задавались с учетом статистических данных, основанных на результатах экспериментальных исследований [42, 43]. Смоделированное таким образом тепловое состояние детали проверялось по измеренным значениям локальных стационарных температур данной детали.

Однако рост форсировки двигателей, особенно дизелей, требовало повышения надежности моделирования теплонапряженного состояния. Было очевидно, что путь к созданию теории локального теплообмена в поршневых двигателях

проходит через теорию пограничного слоя, которая уже успешно использовалась при проектировании других теплоэнергетических установок, например, газотурбинных двигателей [44]. Некоторое отставание в теории поршневых двигателей, которая обычно лидирует в использовании новых достижений смежных наук, можно объяснить сложностью и многогранностью протекающих в цилиндре физико-химических процессов. Поэтому только в конце 1970-х гг. появились впервые работы профессоров Р.М. и М.Р. Петриченко по моделированию локального теплообмена в ДВС, основанные на теории ламинарного пограничного слоя [45, 46].

В начале 1980-х гг., когда еще не была разработана новая теория рабочего процесса, позволяющая в трехмерной постановке определить нестационарные локальные параметры рабочего тела, в МГТУ им. Н.Э. Баумана активно стали заниматься созданием модели локального теплообмена в камерах сгорания, основанной на классической теории турбулентного пограничного слоя [47–49]. Следует подчеркнуть, что модель локального теплообмена разрабатывалась подобно фундаментальной теории конвективного теплообмена, согласно которой в пограничном слое сначала моделируется течение, а только потом теплообмен. Но из-за отсутствия моделей трехмерного течения в цилиндре была предложена так называемая струйная модель [10, 47, 49], которая оказалась удачной, особенно для полуразделенных и разделенных камер сгорания, в которых течение носит направленный, близкий к струйному течению характер. Задача решалась в осесимметричной постановке, течение в пограничном слое рассматривалось как турбулентное с консервативным (логарифмическим) распределением скорости согласно классической теории Л. Прандтля и Е. Польгаузена. Такой подход, когда в ядре потока рассматривается не трехмерное векторное поле скоростей, а скорость струи рабочего тела, которой она натекает на поверхность камеры сгорания, в некотором смысле аналогичен известному

* Статья написана по материалам пленарного доклада на Международной научно-технической конференции «Двигатель-2018», посвященной 150-летию факультета энергомашиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана 30 октября 2018 г.

постулату Л. Прандтля, согласно которому в ядре потока жидкость принимается идеальной (без трения), а все эффекты сопротивления и теплообмена сосредоточены в пристеночных слоях. Расчетная схема предложенной модели турбулентного пограничного слоя приведена на рис. 4.

Предложенная модель динамического и теплового пограничных слоев газа, излучающего и поглощающего тепловую энергию и обтекающего криволинейную поверхность, имеет вид [10]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} (H_3 u) + \frac{\partial}{\partial y} (H_1 H_3 v) = 0; \\ \rho \left(\frac{u}{H_1} \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{uv}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial y} \right) = - \frac{1}{H_1} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{H_1^2 H_3} \frac{\partial}{\partial y} (H_1^2 H_3 \tau_T); \\ \rho \frac{u^2}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial y}; \\ H_3 u \frac{\partial T}{\partial x} + H_1 H_3 v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial y} [H_1 H_3 (q_k + q_r + \tau_T u)]; \\ \frac{\partial E_+}{\partial y} = \beta \kappa (\sigma_0 T^4 - E_+); \\ - \frac{\partial E_-}{\partial y} = \beta \kappa (\sigma_0 T^4 - E_-). \end{array} \right. \quad (9)$$

Граничные условия

$$\left. \begin{array}{l} y = 0; u = v = 0; \tau_T = \tau_w; T = T_w; E_+ = E_+(0); E_- = E_-(0), \\ y = \delta_m; u = u_m; \tau_T = 0; \\ y = \delta_T; T = T_\infty, \\ y = \delta; u = 0; \tau_T = 0. \end{array} \right\} \quad (10)$$

В этих выражениях p — давление; ρ — плотность; T — температура; u и v — компоненты вектора скорости по продольному x и поперечному y направлениям соответственно; τ_T — напряжение трения; $\tau_w = \tau_T|_{y=0}$ — напряжение трения на стенке; q_k и q_r — плотность конвективного и радиационного тепловых потоков соответственно, $H_i^2 = (\partial x / \partial q_i)^2 + (\partial y / \partial q_i)^2 + (\partial z / \partial q_i)^2$, ($i = 1, 2, 3$) — коэффициенты Ламе, связывающие произвольные ортогональные криволинейные координаты $q_1(x, y, z)$, $q_2(x, y, z)$, $q_3(x, y, z)$ с декартовыми координатами x, y, z . Так как задача решается в осесимметричной постановке, в (9) отсутствует H_2 . Радиационный тепловой поток вдоль оси y

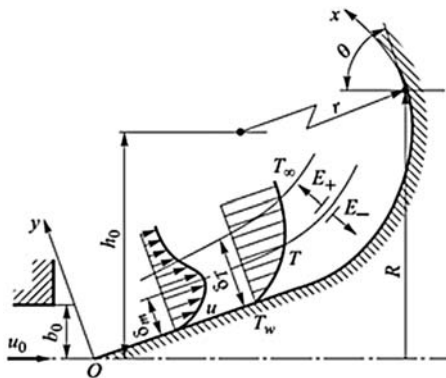


Рис. 4. Схема динамического и теплового пограничных слоев газа для расчета локального сложного (радиационно-конвективного) теплообмена в камере сгорания

равен $q_r = E_+ - E_-$, где E_+ и E_- — плотности потока излучения вдоль оси y и в противоположном направлении соответственно.

Заметим, что при рассмотрении в качестве характерных параметров диаметра цилиндра, средней скорости поршня и времени продолжительности рабочего цикла, число Струхала $Sh = l/\omega\tau \approx 0,1-0,2$, что позволяет применить квазистационарную постановку задачи и выполнять расчеты для фиксированного момента времени (угла поворота коленчатого вала). Форма записи системы (9) отличается от традиционных форм, обычно используемых в теории пограничного слоя [50], так как учитывает:

- конфигурацию (кривизну поверхности) деталей, образующих КС;
- сложный (радиационно-конвективный) теплообмен между рабочим телом и поверхностями деталей, образующих камеру сгорания.

Подчеркнем, что экспериментальные исследования доказывают нецелесообразность применения традиционного аддитивного подхода при оценке результирующего воздействия конвективного и лучистого тепловых потоков в камере сгорания дизеля.

Предложенная модель (9) локального радиационно-конвективного теплообмена, основанная на классической теории пограничного слоя, несмотря на отмеченные допущения, дает результаты, имеющие научное и практическое значение. В частности, она позволяет: обобщить интегральные соотношения Кармана и Польгаузена—Кружилина для расчета гидродинамического и термического пограничных слоев; оценить значения локального числа Больцмана и турбулентного числа Прандтля в условиях камеры сгорания; исследовать влияние на локальный теплообмен таких факторов, как излучение, форма (кривизна) поверхности камеры сгорания, интенсивность вихревого движения заряда и наличие естественных (слой нагара) и искусственных (керамических и др.) теплоизолирующих покрытий в камере сгорания. Заметим, что многие известные из теплофизики соотношения для расчета теплоотдачи являются частными случаями зависимостей, полученных из предложенной модели сложного теплообмена в КС дизеля [10, 31, 51].

Следует подчеркнуть, что приоритет разработки модели локального радиационно-конвективного теплообмена на основе теории турбулентного пограничного слоя для специфических условий поршневого двигателя [10] принадлежит кафедре поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Современная теория поршневых двигателей, основанная на 3D-модели рабочего процесса. Итак, с появлением новых проблем, прежде всего проблем, связанных с термическими на-

грузками форсированных двигателей и с экологией, возникла необходимость в разработке новой трехмерной теории рабочих процессов ДВС, в которой основным объектом исследования являются локальные параметры рабочего тела, изменяющиеся в объеме цилиндра по времени (по углу поворота коленчатого вала) и по координатам x , y и z .

Очевидно, что новая теория ДВС базируется на фундаментальных уравнениях трехмерного турбулентного движения. Термины «Термодинамика ДВС» и «Теория ДВС» перестали быть синонимами. С уходом термодинамического подхода исчезла необходимость задания полуэмпирических соотношений для моделирования тепловыделения, но возникла более сложная проблема, связанная с введением химической кинетики горения топлива и образования вредных компонентов. Вторая крупная проблема, возникшая с приходом в теорию поршневых двигателей гидрогазодинамических моделей — проблема моделирования турбулентности, которую термодинамика по сути своей «не знает». В целом задача усложнилась настолько, что разработка достоверных алгоритмов и соответствующих программных комплексов для моделирования рабочего процесса ДВС стало не под силу исследователям-одиночкам.

Создание таких сложнейших моделей, а также соответствующих алгоритмов и программ расчета, именуемых как CFD- и CRFD-коды (Computational Reaction Fluids Dynamic — компьютерная динамика реагирующих течений), требовало совместных усилий инженеров-механиков, математиков, физиков, химиков и программистов. Работа оказалась неподъемной для небольших групп и одиночных исследователей, какими бы они не были талантливыми и трудолюбивыми, т. е. время разработчиков программистов-одиночек ушло. Проблемой стали заниматься целые отделы и институты, в результате чего появились мощнейшие коммерческие программные продукты практически по всем направлениям технических наук. Наиболее известными и успешными с точки зрения моделирования рабочего процесса ДВС из них являются, прежде всего, FIRE (фирма AVL, Австрия), а также KIVA (Центр энергетических исследований Лос-Аламос, США), VECTIS (фирма Ricardo, Англия).

Здесь следует упомянуть Брайана Сполдинга (Dudley Brian Spalding, 09.01.1923–27.11.2016) — профессора Империял Колледж (Лондон), члена Английского Королевского инженерного общества, иностранного члена РАН, лауреата премии «Глобальная энергия» (2009), признанного «отца» современной вычислительной гидродинамики.

Из его многочисленных научных заслуг достаточно упомянуть одну: разработанный в 1970-х гг. метод контрольных объемов (МКО), который иногда называют и методом конечных объемов. В 1974 г. он основал компанию CHAM (Concentration Heat And Momentum Limited), в которой была создана первая коммерческая 3D CFD-программа PHOENICS (1981). Спустя несколько лет за ней последовали программы FLUENT, FIDAP, STAR-CD и FLOW3D, созданные другими компаниями, в которых активно работали ученики Б. Сполдинга. Являясь автором замечательной книги по основам теории горения, выпущенной в 1959 г. в СССР на русском языке усилиями кафедры поршневых двигателей МГТУ под редакцией проф. Д.Н. Вырубова, Б. Сполдинг был знаком с работами МГТУ по книге Г. Ситкея [13]. Его ученики в 1980-х гг. стали широко применять 3D CFD-коды для решения задач теории ДВС. В частности, с помощью 3D-модели учениками Б. Сполдинга A.D. Gosman и P.S. Harvey было обнаружено [52], а позже экспериментально подтверждено существование обратного вихря в полуразделенной камере сгорания при сильной закрутке воздуха на впуске, что приводило в ряде случаев к ухудшению процесса сгорания [6, 52].

В мае 2007 г. в своей лекции «CFD: прошлое, настоящее, будущее» в Санкт-Петербурге на XVI международной школе-семинаре академика А.И. Леонтьева проф. Б. Сполдинг изложил свое отношение к коммерциализации программных продуктов. К этому времени, с появления первых коммерческих программ Сполдинга и его учеников, прошло уже почти четверть века, они использовались практически во всех областях науки и техники, однако большинством представителей старшего поколения — участников школы доклад был принят, мягко говоря, неоднозначно. Сегодня, спустя 12 лет после доклада, противников стало явно меньше. Проф. Б. Сполдинг рассуждал просто: в благах CFD нуждается множество людей, но мало кто из них может стать программистом высокого уровня. Поэтому пакеты программ надо создавать так, чтобы они содержали: 1) ядро, которое пользователи изменить не смогут; 2) оболочку, куда они могут поместить все необходимое. Эксперты (в английском смысле этого слова: знатоки, мастера, профессионалы) будут поддерживать и развивать закрытое ядро. Пользователи будут извлекать пользу и платить в соответствии с ней. Общество должно преодолеть застой в мышлении и не ждать, что изготовитель рояля будет сочинять сонаты Бетховена, и что Н.А. Отто и Р. Дизель будут соревноваться в формуле-1. И только умелые пользователи новых технологий смогут сделать большие качественные

скачки в науке, но таких в огромной армии пользователей, к сожалению, мало.

На стыке двух столетий на кафедре поршневых двигателей МГТУ выбрали единственный правильный путь и стали заниматься трехмерным моделированием рабочего процесса, параллельно развивая и нульмерные многозонные модели (см. выше), основное преимущество которых — практически ничтожное время счета.

Активно занимаясь новой, трехмерной теорией рабочего процесса, кафедра поршневых двигателей стала первой среди российских университетов, получившей в 2002 г. лицензионное право на использование программы AVL-FIRE, которая по сей день активно используется в научных разработках и в учебном процессе кафедры. Полученные в МГТУ результаты исследований регулярно докладываются на международных конференциях пользователей различных программных продуктов, проводимых фирмой AVL в г. Грац, а на кафедре в МГТУ организован и проводится ежегодный научный семинар с активным участием представителей фирмы AVL. На кафедре усилиями МГТУ и AVL действует Международный научный семинар по проблемам 3D-моделирования процессов в ДВС. Сотрудничество между МГТУ и AVL началось и успешно продолжается при активной поддержке вице-президента AVL, доктора Г. Райнера (G. Reiner) и директора по развитию передовых технологий моделирования (AST) Московского представительства AVL, к.т.н. А.А. Скрипника.

Отметим, а в этом можно убедиться на зарубежных научных конференциях, что AVL FIRE в определенном смысле становится международным языком для общения исследователей разных стран, занимающихся проблемами теории поршневых двигателей.

Современные CRFD-коды, предназначенные для моделирования внутрицилиндровых процессов поршневых двигателей, позволяющие следить за изменением локальных параметров рабочего тела, обычно содержат модели переноса субстанций, сгорания, образования вредных веществ (основанные на соответствующих кинетических механизмах) и турбулентности.

Модель переноса субстанций. Основу современных математических моделей рабочего процесса поршневого двигателя составляют фундаментальные уравнения переноса количества движения (Навье—Стокса), энергии (Фурье—Кирхгофа), диффузии (Фика) и неразрывности, приведенные в таблице. Они подробно проанализированы в [6, 10, 53]. Численное решение системы из указанных уравнений стало возможным благодаря, прежде всего, развитию численных методов математики и информационных технологий.

В уравнениях из таблицы приняты следующие обозначения: p — давление, Н/м²; G_i — проекция вектора плотности объемных сил на ось Ox_i прямоугольной декартовой системы координат, Н/м³; W — вектор скорости газа, м/с; ρ — плотность газа, кг/м³; C — концентрация, кг/м³; H — полная удельная энергия, Дж/кг; $V_\mu = 1/3\mu \cdot \text{grad}(\text{div}W)$ — член, выражающий объемную деформацию; μ — динамическая вязкость, кг/(м·с); c_p — теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); w_r — скорость химической реакции на единицу объема, кг/(с·м³); Q_r — количество выделяемой теплоты на единицу массы, Дж/кг; λ — теплопроводность, Вт/(м·К); δ_{ij} — символ Кронекера; D_c — коэффициент диффузии, м²/с; m — интенсивность источника массы (скорость изменения массы химической компоненты в единице объема, кг/(с·м³)).

Модели сгорания. Движение рабочего тела в цилиндре обусловлено не только перемещением поршня. Перенос массы, количества движения и энергии в цилиндре сопровождается химическими реакциями горения. Высвобождение энергии при горении порождает градиенты давления, температуры и плотности, что приводит к процессам переноса. Очевидно, что взаимодействие между химической кинетикой и динамикой газа заметно усложняет моделирование реагирующих течений. При такой постановке задачи для определения скорости реакции требуется знание кинетического механизма образования каждого из компонентов (продуктов реакции), а также соответствующих констант скорости реакции. Только после этого можно определить «источниковые» члены, характеризующие интенсивности возникновения новых или исчезновения исходных веществ в результате химических реакций и входящие в уравнения переноса (см. таблицу: интенсивность внутреннего источника теплоты $q_v = Q_r w_r$, где $q_v = [\text{Вт}/\text{м}^3]$ и интенсивность источника массы $m = -w_r$, где $m = [\text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{с}]$). Так как реакции высокотемпературного окисления углеводородных топлив, как правило, характеризуются временными масштабами, очень короткими по сравнению с временными масштабами процессов переноса, то предположение о химическом равновесии (т. е. о мгновенном сгорании и образовании конечных продуктов реакции) лежит в основе моделей сгорания, предназначенных для определения w_r . В хорошо известной модели Магнуссена—Хартагера (Magnussen—Hjertager), например, эта скорость определяется так [6]

$$\overline{w_r} = \frac{B}{\tau_t} \rho_{\min} \left(\overline{m_T}, \frac{\overline{m_{O_2}}}{L_0}, C \frac{\overline{m_{\text{пр.сг.}}}}{1 + L_0} \right), \quad (11)$$

Уравнения законов сохранения, как частные случаи обобщенного дифференциального уравнения

$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \operatorname{div}(\rho \vec{W} \Phi) = \operatorname{div}(\Gamma_{\Phi} \operatorname{grad} \Phi) + S_{\Phi} \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho W_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\Phi} \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S_{\Phi}$		
$\Phi = W_i, \Gamma_{\Phi} = \mu,$ $S_{\Phi} = G_i - \partial p / \partial x_i + V_{\mu}$ Уравнение сохранения количества движения (уравнение Навье–Стокса)	Исходная форма	$\rho \frac{DW_i}{D\tau} = G_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial W_i}{\partial x_j} + \frac{\partial W_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial W_k}{\partial x_k} \right) \right]$
	Форма Рейнольдса	$\bar{\rho} \frac{D\bar{W}_i}{D\tau} = \bar{G}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{W}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{W}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{W}_k}{\partial x_k} \right) - \rho \bar{W}_i' \bar{W}_j' \right]$
	Новые неизвестные	$\rho \bar{W}_i' \bar{W}_j' -$ тензор рейнольдсовых турбулентных напряжений, определенный по пульсационным составляющим скорости; $\bar{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{W}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{W}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{W}_k}{\partial x_k} \right) -$ тензор вязких (турбулентных) напряжений, определенный по осредненным значениям компонент скорости.
$\Phi = H, \Gamma_{\Phi} = \frac{\lambda}{c_p},$ $S_{\Phi} = \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} W_j) +$ $+ G_j W_j + w_r Q_r + \frac{\partial q_{rj}}{\partial x_i}$ Уравнение сохранения энергии	Исходная форма	$\rho \frac{DH}{D\tau} = G_j W_j + \frac{\partial p}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} W_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) w_r Q_r + \frac{\partial q_{rj}}{\partial x_j}$
	Форма Рейнольдса	$\bar{\rho} \frac{D\bar{H}}{D\tau} = \bar{G}_j \bar{W}_j + \frac{\partial \bar{p}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{ij} \bar{W}_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - c_{p\rho} T' W_j' \right) \bar{w}_r \bar{Q}_r + \frac{\partial \bar{q}_{rj}}{\partial x_j}$
	Новая неизвестная	$c_{p\rho} T' W_j' -$ турбулентный перенос энтальпии $\rho c_p T'$ посредством флуктуации скорости W_j'
$\Phi = 1, \Gamma_{\Phi} = 0, S_{\Phi} = 0$ Уравнение сохранения массы (неразрывности)	Исходная форма	$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho W_j) = 0$
	Форма Рейнольдса	$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho} \bar{W}_j) = 0$
$\Phi = \frac{C_l}{\rho}, \Gamma_{\Phi} = D_l \rho,$ $S_{\Phi} = \dot{m}_l$ Уравнение диффузии (концентрации)	Исходная форма	$\frac{DC}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_c \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \dot{m}$
	Новая неизвестная	$\bar{C}' \bar{W}_j' -$ турбулентный диффузионный перенос массы компонента, концентрация которого C , посредством флуктуации скорости W_j'
В уравнениях используется правило суммирования по индексу ($i, j, k = 1, 2, 3$) повторяющемуся дважды, а осреднения осуществляется по Фавру, т. е. с использованием плотности в качестве весовой функции		

где L_0 — массовое стехиометрическое количество воздуха; $\tau_t = k/\varepsilon$ — масштаб времени турбулентного перемешивания; B и C — эмпирические коэффициенты.

Модели сгорания подробно описаны в литературе [6, 10, 53], поэтому здесь ограничимся только их перечислением: TFSCM-модель (Turbulent Flame Speed Closure Combustion Model — модель горения с учетом скорости турбулентного пламени), CFM-модель (Coherent Flame Model — модель когерентного пламени) и др. В них сгорание моделируется с использованием

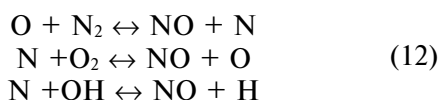
различных гипотез определения скорости горения в зависимости от характеристик турбулентности. Очевидно, что они принципиально отличаются от моделей тепловыделения, используемых в термодинамических 0D-кодах (см. выше).

Подчеркнем, что при решении задач образования вредных веществ указанное выше допущение о мгновенном сгорании не выполняется. В частности, при расчетах образования CO, HC, NO_x и сажи необходимо рассматривать реакции с конечной скоростью. Даже в условиях равновесной химической реакции в случае обога-

щенной смеси углеводородов с воздухом получается значительное количество CO, например, 10 % от всего объема газа. В камерах сгорания эта смесь дальше перемешивается с воздухом и поэтому любое последующее окисление CO до CO₂ происходит на временных масштабах, сопоставимых с масштабом времени турбулентного перемешивания. Оксиды азота, как известно, образуются в областях с достаточно высокими температурами ($T > 1800$ К) и после своего образования сохраняются в продуктах сгорания практически в неизменном количестве (т. е. происходит их «закалка»). Скорость образования NO максимальна при α_n (при небольшом недостатке воздуха), и обычно больше характерной скорости процессов переноса.

Модели образования вредных веществ. В реальном процессе в отработавших газах содержатся опасные для здоровья человека и окружающей среды вещества, такие как оксид углерода (CO), несгоревшие углеводороды (CH), оксиды азота (NO_x) и твердые частицы, выбросы которых ограничены законодательными актами. Вводятся ограничения выбросов CO₂, связанных с парниковым эффектом, снижение концентрации которого возможно путем уменьшения расхода углеводородных топлив или за счет применения топлив с малым или нулевым содержанием углерода. Наиболее опасными из них являются оксиды азота и твердые частицы. В составе последних примерно 30 % составляет сажа, образующаяся в процессе гетерогенного сгорания в дизелях и бензиновых двигателях с непосредственным впрыскиванием.

В современной теории поршневых двигателей различают три вида оксида азота в зависимости от его происхождения [6]: термический (образующийся в высокотемпературных продуктах сгорания при окислении азота кислородом воздуха, согласно механизму Я.Б. Зельдовича), «быстрый» (образующийся во фронте пламени из азота, находившегося в воздухе в соответствии с механизмом Феннимора (С.Р. Fennimore)), топливный (образующийся из азота, находящегося в топливе). Так как в поршневых двигателях (90–95) % NO образуется в соответствии с расширенным термическим механизмом Зельдовича (рис. 5), этот механизм и является основным при моделировании процессов в камере сгорания. Он имеет вид:



Заметим, что предложенный Я.Б. Зельдовичем термический механизм, т. е. первые две реакции из (12), позже был расширен Д.Л. Баулчом (D.L. Baulch) и др. [54] за счет включения третьей реакции.

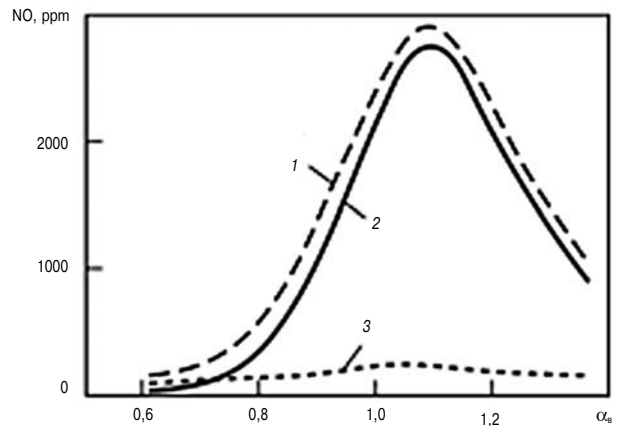


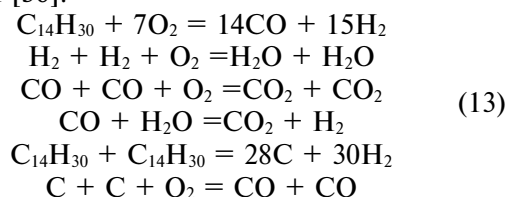
Рис. 5. Вклад различных механизмов в образование NO: 1 — суммарные; 2 — термические; 3 — «быстрые».

В настоящее время существует ряд схем образования NO, основанных на детальных кинетических механизмах. В этих схемах, использованных в работах W. Kleinschmidt, С.А. Чеснокова, А.И. Лушпа, С.М. Фролова и В.Я. Басевича, а также в коммерческой программе CHEMKIN-CFD, в которой детальные кинематические механизмы, описывающие процесс образования NO в реагирующих потоках, связаны с процессами нестационарного переноса. Следует подчеркнуть, что детальные кинетические механизмы независимо от числа промежуточных реакций практически всегда содержат реакции образования NO Я.Б. Зельдовича. Заметим также, что при использовании макрокинетического подхода для расчета концентрации NO с применением констант скоростей реакций, может возникнуть проблема выбора этих констант, достоверность которых необходимо оценить непосредственным измерением концентрации NO в отработавших газах двигателя. Проблемы, а также ошибки и заблуждения, имеющие место в теории ДВС при моделировании образования NO, подробно изложены в [54].

Образование твердых частиц сажи — сложный, многоэтапный химико-физический процесс, состоящий из цепочки последовательных процессов, протекающих как в газовой фазе, так и по гетерогенному механизму, и осложненный явлениями коагуляции (столкновением двух частиц с образованием общей внешней оболочки) и агломерации (объединением частиц с образованием сложных комплексов в виде цепочек, соединенных между собой частиц), а также с параллельным протеканием процесса оксидации (выгорания) сажи. Очевидно, что существующие модели сажеобразования, используемые в теории поршневых двигателей, имеют ограниченное применение, либо подразумевают наличие специального банка данных, полученных в основном по результатам

эксперимента. К первой группе относятся феноменологические модели, состоявшие обычно из двух обыкновенных дифференциальных уравнений с эмпирическими коэффициентами, описывающих процессы образования и выгорания сажи (модели К. Boulouchous [6], J. Warnatz и др. [55]). Вторая группа моделей подразумевает многостадийность процесса образования сажи и знания детального кинетического механизма для каждой стадии. Реализация таких моделей в CRFD-кодах требует использования так называемых Flamelet-библиотек, содержащих экспериментально полученные значения эмиссии сажи в зависимости от таких параметров, как концентрация топлива, температура и давление смеси [55].

В последнее время находят распространение упрощенные кинетические модели, основанные на решении так называемых глобальных уравнений химической кинетики для основных стадий сажеобразования [55–57]. К этой группе моделей можно отнести кинетическую модель для окисления топлива с химической формулой $C_{14}H_{30}$ (тетрадекан), состоящую из следующих реакций [56]:



Сравнительный анализ результатов численных экспериментов [57], проведенных в процессе верификации изложенной выше математической модели внутрицилиндровых процессов с применением различных моделей сажеобразования, показал, что кинетическая модель (13), разработанная в Институте химической физики им. Н.Н. Семенова РАН проф. С.М. Фроловым, является вполне подходящей. Механизмы Я.Б. Зельдовича (12) и С.М. Фролова (13), разработанные представителями школы академика Н.Н. Семенова, в настоящее время находят широкое применение в теории ДВС [53, 55, 57].

(Продолжение следует)

Литература

6. *Кавтарадзе Р.З.* Теория поршневых двигателей. Специальные главы. 2-е изд. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 589 с.
10. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 3-е изд., доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 515 с.
12. *Вырубов Д.Н.* Теплоотдача и испарение капель // Журнал технической физики. Т. IX, вып. 21. 1939. С. 1923–1931.
31. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в камерах сгорания дизелей: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1991. 265 с.
41. *Чесноков С.А.* Прогнозирование неравновесного образования токсичных веществ при горении в ДВС с искровым зажиганием: дис. ... докт. техн. наук: 05.04.02. Тула, 2006. 326 с.
42. *Розенблит Г.Б.* Теплопередача в дизелях. М. : Машиностроение, 1977.
43. Конструирование и расчет поршневых и комбинированных ДВС / под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. М. : Машиностроение, 1986.
44. *Зысина-Моложен Л.М., Зысин Л.В., Поляк М.П.* Теплообмен в турбомашинах. Л. : Машиностроение, 1974.
45. *Петриченко Р.М., Петриченко М.Р.* Конвективный теплообмен в поршневых машинах. Л. : Машиностроение, 1979.
46. *Петриченко Р.М.* Физические основы внутрицилиндровых процессов в ДВС. Л. : Издание ЛГУ, 1983.
47. *Кавтарадзе Р.З.* Приближенное определение локального коэффициента теплоотдачи в цилиндре дизеля с полуразделенной камерой сгорания // Известия ВУЗов СССР, Машиностроение. 1985. № 5. С. 86–91.
48. *Kawtaradse R.S.* Mathematische Modell des komplizierten Wärmeaustausches — Konvektion und Strahlung im Brennraum Dieselmotors // Technische Mechanik. 1989. Band 10. № 3. P. 175–177.
49. *Кавтарадзе Р.З.* Решение задач конвективного и сложного теплообмена в камере сгорания дизеля с учетом пристеночного турбулентного течения // АН СССР. Теплофизика высоких температур. Т. 28. 1990. № 5. С. 969–977.
50. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. 5-е изд. М. : Атомиздат, 1979.
51. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях — развитие научного направления в МГТУ им. Н.Э. Баумана // Двигателестроение. 2018. № 1 (271). С. 13–15.
52. *Gosman A.D., Harvey P.S.* Computer Analysis of Fuel-Air Mixing and Combustion in an Axisymmetric D.I. Diesel // SAE Paper. No. 820036. 1982. 21 p.
53. FIRE. Users Manual Version 2018 / AVL List GmbH. Graz (Austria), 2018.
54. *Кавтарадзе З.Р., Кавтарадзе Р.З.* Анализ механизмов образования и методов расчета концентрации оксидов азота в поршневых двигателях // Транспорт на альтернативном топливе. Ч. 1. 2011. № 5 (23). С. 65–71; Ч. 2. 2011. № 6 (24). С. 12–19.
55. *Warnatz J., Maas U., Dibble R.W.* Verbrennung: Physikalisch — Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. 326 p.
56. *Frolov S.M., Basevich V.Y., Skripnik A.A.* Modeling of Soot Formation in Internal Combustion Engines // Сб. науч. тр. по матер. Междун. конф. «Двигатель-2007». М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. С. 28.
57. *Кавтарадзе Р.З., Сергеев С.С.* Новый альтернативный (частично-гомогенный) процесс сгорания как способ снижения концентраций оксидов азота и сажи в продуктах сгорания дизеля // РАН. Теплофизика высоких температур. Т. 52. 2014. № 2. 2014. С. 294–309.