

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 (Окончание)	<i>Kavtaradze R.Z.</i> Development of combustion theory in Bauman Technical University: from Grinevetsky method to modern 3D-models (Continuation)
<i>Мягков Л.Л., Сивачев С.М., Гусев М.П.</i> Экспериментальное определение коэффициентов в моделях пластичности и ползучести поршневого сплава	<i>Myagkov L.L., Sivachev S.M. and Gusev M.P.</i> Experimental determination of coefficients in the models of plasticity and creep behaviour of piston alloys
<i>Савастенко Э.А., Савастенко А.А., Марков В.А.</i> Эффективность реализации многоразового впрыскивания топлива в дизельном двигателе	<i>Savastenko E.A., Savastenko A.A. and Markov V.A.</i> Practical efficiency of multi-injection technology in diesel engine
<i>Маслов А.П., Левцов М.В.</i> Анализ действующих сил в КПМ W-образного двигателя с прицепными шатунами	<i>Maslov A.P. and Levtsov M.V.</i> Kinematic and dynamic analysis of W-engine featuring slave connecting rods
<i>Гумеров И.Ф., Валеев Д.Х., Куликов А.С., Карпов А.И., Фардеев Л.И., Гарипов Р.Д., Ханнанов М.Д.</i> Развитие конструкции и технологии производства нового поколения дизельных двигателей КАМАЗ Р6	<i>Gumerov I.F., Valeev D.H., Kulikov A.S., Karpov A.I., Fardeev L.I., Garipov R.D., Channanov M.D.</i> New generation of diesel engine type KAMAZ P6: de- velopment of construction and processing methods
АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ	AUTOMATION AND DIAGNOSTICS
<i>Потапов В.И., Галиуллин Р.Р.</i> Дизель-генераторная установка с электронно- управляемым пропуском подачи топлива	<i>Potapov V.I. and Galiullin R.R.</i> Diesel gen set with controllable misfire function
ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ	ENVIRONMENTAL ISSUES
<i>Обозов А.А., Новиков М.А., Гришанов П.А.</i> Анализ состава отработавших газов дизеля KM-170FA	<i>Obozov A.A., Novikov M.A. and Grishanov P.A.</i> Analysis of engine type KM-170FA exhaust gas
ТОПЛИВО. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	FUEL. LUBRICANTS
<i>Ощепков П.П., Смирнов С.В., Заев И.А.</i> Исследование процесса самовоспламенения биодизельного топлива	<i>Oschepkov P.P., Smirnov S.V. and Zaev I.A.</i> Investigation into self-ignition of biodiesel
НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ	ENGINE BUILDING NEWS
Современные технологии проектирования двигателей (материалы конгресса CIMAC)	Modern engine design technologies (based on CIMAC papers)
ИНФОРМАЦИЯ	INFORMATION
Рефераты статей	Synopsis

## 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-Петербург</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 «НПФ «Экология», 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 (2005–2020 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)) и включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

---

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

Сдано в набор 02.03.2020  
Подписано в печать 23.03.2020  
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7  
Зак. 52. Тираж 700 экз.  
Цена договорная

---

Почтовый адрес редакции журнала:  
ООО «НПФ «Экология», 190020, Санкт-Петербург, а/я 9

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

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

---

**ДВИГАТЕЛЕ  
СТРОЕНИЕ**

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

© Журнал «Двигателестроение». 2020. № 1 (279)

## 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 3-D моделей рабочего процесса для решения задач кинетики образования вредных веществ и локального радиационно-конвективного теплообмена при горении топлива в цилиндре.

*Окончание. Начало см. №№ 2 (276), 3 (277), 4 (278) 2019*

**Моделирование турбулентности в поршневых двигателях.  $k$ - $\zeta$ - $f$ -модель.** Фундаментальные уравнения переноса, усредненные по методу Favre, как видно из таблицы (см. стр. 7 № 4 (278) 2019), образуют незамкнутую систему Рейнольдса, которая замыкается дополнительными уравнениями, названными моделями турбулентности.

В настоящее время, особенно в последние 15–20 лет, все более или менее известные модели турбулентности, анализ которых изложен в [6, 10], были апробированы в теории поршневых двигателей. Относительно простая и удобная модель турбулентности Л. Прандтля не требует задания дополнительного дифференциального уравнения для вычисления турбулентной вязкости  $\mu_t$  и, как уже было отмечено выше, вполне приемлема для изучения течений с тонкими сдвиговыми слоями, длина пути перемешивания  $l$  которых может быть рассчитана. В случае более сложных, например, полностью трехмерных течений далеко от пограничных слоев задача определения  $l$  становится трудно разрешимой. Кроме того, гипотеза о длине пути перемешивания исходит из предположения о локальном равновесии турбулентности, т. е. подразумевается, что в каждой точке течения скорость диссипации кинетической энергии турбулентности совпадает со скоростью ее генерации, так что учет влияния

генерации турбулентности в других точках течения или в более ранние моменты времени оказывается невозможным. Следовательно, гипотеза о длине пути перемешивания не может учитывать влияние переноса турбулентности или предыстории ее развития [6].

Одной из самых распространенных моделей турбулентности, в которых учитываются эффекты переноса турбулентности и предыстория ее развития, является  $k$ - $\epsilon$ -модель, где  $k$  — кинетическая энергия турбулентности, а  $\epsilon$  — скорость диссипации этой энергии, для вычисления которых задаются дифференциальные уравнения в частных производных с эмпирическими коэффициентами, число которых, например, в стандартной  $k$ - $\epsilon$ -модели, достигает 8. На основе  $k$ - $\epsilon$ -модели получены ряд подобных ей моделей [6].

Следует заметить, что в пристеночных слоях КС при  $y^+ < 30$  (ламинарный подслой + буферная зона) используется низкорейнольдсовая, а при  $30 < y^+ < 200$  (область логарифмического закона) — высокорейнольдсовая модель турбулентности. Здесь  $y^+ = (v_* / \nu) y$  — безразмерное расстояние от поверхности стенки — аналог числа Рейнольдса,  $\nu$  — кинематическая вязкость,  $v_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$  — динамическая скорость,  $\tau_w$  — касательное напряжение,  $\rho$  — плотность.

Слабая зависимость профиля скорости во внутренней области от внешних условий, характерная для турбулентного пограничного слоя, позволяет в 3D-CRFD-кодах, предназначенных для моделирования процессов теплообмена в ДВС, использовать различные вариации пристеночных функций (например, функции В. Launder–В. Spalding, К. Khanjalic и др.) [6, 10]. Для моделирования процессов переноса и турбулентного сгорания в объеме КС, т. е. во внешней области (области развитого, высокорейнольдсового турбулентного течения), используются фундаментальные уравнения Навье–Стокса, Фурье–Кирхгофа, Фика и неразрывности, записанные в форме Рейнольдса в результате осреднения по Фавру (см. таблицу в № 4 (278) 2019).

\* Статья подготовлена 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.

При использовании численных методов обычно принимают, что закон стенки выполняется при  $30 < y^+ < 200$ , и первая от стенки расчетная ячейка располагается в этом интервале. При измельчении расчетной сетки охватить очень тонкие подобласти, например  $y^+ < 5$ , в расчетах пограничного слоя очень сложно. С другой стороны, измельчение сеток приводит к тому, что расчетная точка, расположенная непосредственно у стенки, не попадает в области  $y^+ > 30$  — в области действия логарифмического закона (закона стенки), для которой справедливы известные в настоящее время пристеночные функции. С целью разрешения этой проблемы К. Ханиалич (K. Hanjalić) и др. [58] предложили специально для ДВС и реализовали в 3D-CRFD коде AVL FIRE  $k-\varepsilon-f$ -модель турбулентности, названную CWT (Compound Wall Treatment)-моделью. Она предусматривает применение нового обобщенного варианта пристеночных функций, а для интегрирования вплоть до поверхности стенки использует три уравнения переноса — уравнения для  $k$  и для  $\varepsilon$ , известных из  $k-\varepsilon$ -модели турбулентности, а также уравнения для нормированного масштаба скорости  $\zeta = W^2/k$  [58]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dk}{Dt} &= \rho(P_k - \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right], \\ \rho \frac{D\varepsilon}{Dt} &= \rho \frac{c_{\varepsilon_1}^* P_k - c_{\varepsilon_2} \varepsilon}{\tau_t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right], \quad (14) \\ \rho \frac{D\zeta}{Dt} &= \rho f - \rho \frac{\zeta}{k} P_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\zeta} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} \right]. \end{aligned}$$

Эта система уравнений решается совместно с уравнением для эллиптической функции релаксации  $f$  (эллиптической функции П. Дурбина [53, 58]):

$$f - l_t^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_j} = \left( c_1 + c_2 \frac{Pk}{\zeta} \right) \frac{2/3 - \zeta}{\tau_t}, \quad (15)$$

где  $\tau_t$  и  $l_t$  — временной и линейный масштабы турбулентности соответственно.

Поскольку модель Дурбина очень чувствительна к виду ячейки и степени измельчения сетки, для улучшения устойчивости численного решения в  $k-\zeta-f$ -модели введено уравнение переноса для  $\zeta$ . Подчеркнем, что  $k-\zeta-f$ -модель турбулентности учитывает пристеночную анизотропию турбулентности, что очень важно при моделировании внутри цилиндрических процессов. Заметим, что модель турбулентности (14) в разработках МГТУ находит широкое применение [6, 10, 57].

Разработанные в МГТУ и проанализированные выше одно-, многозонные и трехмерные математические модели рабочего процесса, а

также модель локального, радиационно-конвективного теплообмена, нашли отражение в 4-х докторских [Кавтарадзе Р.З.(1991), Лобанов И.Е. (2006), Арипджанов М.М. (2007), Онищенко Д.О. (2013)], а также в 16 кандидатских диссертациях. За последние 20 лет в России и за рубежом выпущены монографии, энциклопедии, учебники и учебные пособия (всего 15 книг) и больше 400 публикаций в периодических изданиях. Полученные результаты ежегодно докладываются на российских и зарубежных научных конференциях, прочитаны краткие курсы лекций в ряде зарубежных университетов [6].

Как видно из вышеизложенного анализа кафедры поршневые двигатели МГТУ им. Н.Э. Баумана, следуя славным традициям В.И. Гриневецкого, активно занималась и занимается разработкой математических моделей рабочего процесса. Можно констатировать, что кафедра была и остается ведущей в области теории рабочих процессов поршневых двигателей. К сожалению, также следует отметить, что МГТУ им. Н.Э. Баумана, судя по опубликованным работам, пока остается единственным университетом страны, где рабочий процесс в поршневых двигателях исследуется с помощью трехмерных моделей, основанных на уравнениях типа Навье–Стокса при выполнении различных контрактов.

**Заблуждения переходного периода в теории поршневых двигателей.** Когда речь идет о переходе от нульмерных (термодинамических) моделей к новой трехмерной (гидрогазодинамической) модели рабочего процесса следует отметить те неточности и ошибки (назовем их болезнями переходного периода), которые вызваны нежеланием расставаться со старыми простыми и хорошо изученными методами, с одной стороны, а также нежеланием освоения новых, но более сложных методов, с другой стороны.

Из анализа нульмерных моделей, проведенного ранее, видно, что для решения прямой задачи рабочего процесса, подразумевающей получение индикаторной диаграммы и других индикаторных и эффективных показателей двигателя, а также моделирование образования вредных веществ и локального теплообмена в цилиндре двигателя, необходимо знание количества теплоты, идущей на повышение внутренней энергии рабочего тела и совершение механической работы  $Q$ . Эта теплота определяется как разность между тепловыделением  $Q_x$  в процессе сгорания и теплоотводом  $Q_w$  в рабочем цикле.

В термодинамических моделях тепловыделение моделируется с помощью физических соотношений, в которых химическая кинетика учитывается введением коэффициентов и параметров, определенных эмпирическим путем (в формуле Вибе

их два, а в методе Н.Ф. Разлейцева — больше двух десятков) [6, 27]. Следует отметить, что при наличии такого количества эмпирических коэффициентов, полученных на устаревших двигателях и меняющихся в довольно широких пределах в зависимости от типоразмеров двигателя, можно ставить под сомнение достоверность применения этого метода, особенно при моделировании рабочих процессов проектируемых дизелей, в которых только давление впрыскивания выросло в 3–4 раза. В связи с этим самим автором [27] позднее была предложена более простая модель тепловыделения, основанная на модели Вибе с изменяющимся показателем динамики сгорания  $m = m(\tau)$  [59].

В новых 3D CRFD-моделях рабочего процесса, в которых моделируются последовательные процессы впрыскивания, испарения и воспламенения топлива, как было отмечено выше, отпадает необходимость задания полуэмпирических соотношений тепловыделения в виде формул Гончара, Вибе, Разлейцева и им подобных. С другой стороны, в 3D-моделях рабочего процесса существует два варианта определения тепловыделения в результате химической реакции горения:

➤ использовать модели сгорания, например, модель Магнуссена–Хартагера (11), предусматривающие определение скорости химической реакции  $w$ , как скорости изменения массы топлива в зависимости от принятой физической модели сгорания;

➤ использовать детальную химическую кинетику, подразумевающую знание механизма химической реакции горения с большим количеством (несколько сотен, как, например, в программах CHEMKIN или AVL TABKIN) промежуточных реакций, либо, в крайнем случае, глобального механизма с несколькими основными реакциями, определяющими скорость общей реакции горения с известными тепловыми эффектами [6].

Сложность второго подхода обусловлена, прежде всего, отсутствием достоверной информации о детальной кинетике промежуточных реакций горения реального, а не модельного топлива.

Очевидно, что две концептуально разные модели рабочего цикла — термодинамическая и гидрогазодинамическая, основаны на принципиально различных подходах при моделировании процесса тепловыделения–сгорания. Очевидно также, что эти подходы являются взаимоисключающими, т. е. применять можно либо один, либо другой. И тем более удивляет, когда тепловыделение считается с помощью программы, основанной на модели, например Разлейцева или Вибе, и в эту же программу введена детальная химическая кинетика с большим количеством про-

межуточных реакций, например, из программного комплекса CHEMKIN. Следует отметить, что чем больше количество реакций используется, тем большее количество констант реакций должны быть подобраны из огромного объема справочной информации, и тем больше вероятность допущения погрешности, т. е. она растет с ростом количества реакций.

Очевидно, что одновременное использование двух концептуально взаимоисключающих, несовместимых методов расчета тепловыделения нельзя назвать недоразумением, это серьезная ошибка, при том стратегическая. Следует также отметить, что заниматься детальной химической кинетикой не дело инженеров-механиков (двигателистов), да и не умеют они это делать. Их дело использовать достижения этой фундаментальной науки для решения задач двигателестроения, а не превращать исследования процессов горения и образования вредных веществ в ДВС в гонки за количеством использованных промежуточных реакций. Это первая из распространенных болезней переходного периода.

Вторая болезнь, которая часто встречается при моделировании рабочих процессов — определение локальных температур в цилиндре и их использование для расчета экологических показателей, в частности, для моделирования образований оксидов азота и частиц сажи в камере сгорания. Известно, что зависимость скорости химической реакции от температуры в классической химической кинетике устанавливается законом С. Аррениуса (1859–1927, Нобелевская премия по химии 1903 г.):

$$K(T) = K_0 e^{-E/(RT)}, \quad (16)$$

где  $K_0$  — предэкспоненциальный множитель (имеет размерность константы скорости реакции);  $E$  — энергия активации (Дж/моль), постоянная для данной реагирующей системы.

Экспоненциальная зависимость константы скорости реакции от температуры доказана и молекулярно-кинетической теорией газов Максвелла–Больцмана. Да и современная химическая кинетика, основоположником которой является Н.Н. Семенов (1896–1986, Нобелевская премия по химии 1956 г.), основана на экспоненциальных зависимостях от температуры. А это означает, что малейшие неточности при задании температуры приводят к существенным погрешностям при анализе реакции.

Какие выводы можно сделать из этих азбучных истин фундаментальной теории химической кинетики?

Усредненная по объему цилиндра температура рабочего процесса (т. е. температура в однозонной модели) или «индикаторная температура», полученная в результате пересчета индикаторной

диаграммы давления, является условной температурой и ее нельзя использовать в качестве определяющей при моделировании процессов образования оксидов азота и твердых частиц сажи. Примечательный факт: для многих реальных дизелей максимальная температура цикла  $T_z \leq 1800$  К. В таком случае, согласно термическому механизму Я.Б. Зельдовича, оксиды азота не образуются, однако эксперимент указывает на их наличие в выпускных газах, т. е. причиной их образования являются локальные температуры в цилиндре, существенно более высокие по сравнению с  $T_z$ . Использование для моделирования образования  $\text{NO}_x$  и сажи другой условной температуры — так называемой температуры пламени, значение которой принимается всегда постоянной и равной 2500 К, как это делается в [27], не обосновано и не выдерживает никакой критики.

Очевидно, что важнейшей задачей моделирования рабочих процессов является по возможности точное определение локальных температур в цилиндре дизеля. На определение этих температур и должны быть направлены усилия инженеров-исследователей двигателя. Очевидно, что учет сколь угодно большого числа промежуточных реакций никак не спасет от неправильного задания локальных нестационарных температур. Следует опровергать исключительно все псевдонаучные работы, которые посвящены оценке эмиссии оксидов азота и сажи в продуктах сгорания в обход нестационарных локальных температур в цилиндре двигателя. Распознать такие работы очень легко, в них, как правило, не приводится ни одного численного значения локальных температур.

Понятно, что экологические показатели, в частности количество оксидов азота, полученное на основе средней по объему цилиндра температуры, обычно не соответствуют реальности. Стремление доказать адекватность таких псевдомodelей влечет за собой нарушение таких фундаментальных теорий, как теория горения и теория поршневых двигателей.

Приведем примеры таких нарушений:

➤ Применение механизма образования монооксида азота, состоящего из классического механизма Зельдовича (первые две реакции из (11)) и бимолекулярной реакции  $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}$  [60]. Хорошо известно, что это не допустимо: еще Я.Б. Зельдовичем [61] было обосновано, что эти два механизма несовместимы. Более того, именно несостоятельность бимолекулярного механизма обусловила применение Я.Б. Зельдовичем реакций цепного механизма (11) (см. об этом [54]).

➤ Произвольные, не обоснованные экспериментом манипуляции с коэффициентами в ис-

пользуемых известных соотношениях, названные «настройкой модели» и приводящие к заранее запланированному желаемому результату. В качестве примера, кроме упомянутого метода расчета концентрации  $\text{NO}$ , здесь можно назвать применение необоснованных зависимостей при моделировании теплообмена в цилиндре, в частности, произвольная, никак не обоснованная замена эмпирических коэффициентов в  $\alpha$ -формуле G. Woschni, или добавление в этой же формуле еще одного слагаемого, якобы учитывающего лучистый теплообмен, которого в авторской формуле нет (об этом см. [10]). И все это делается с целью соблюдения теплового баланса двигателя. Таких примеров, к сожалению, можно приводить много. Некоторые из них показаны в [10, 54].

Таким образом, в ряде исследований на лицо два нарушения постулатов фундаментальной науки, выражающиеся в несовместимости физического (термодинамического) и химического (кинетического) методов расчета тепловыделения—сгорания, исключающий их одновременное применение и объединение в одной модели, а также в отсутствии алгоритма для расчета локальных температур в цилиндре. Эти болезни присущи многим термодинамическим моделям, разработанным и используемым в различных научных и учебных учреждениях. К сожалению, они часто используются в кандидатских и докторских диссертациях. Указанные замечания в полной мере относятся и к популярной среди студентов программе «Diesel-RK», основанной на методе Н.Ф. Разлейцева [27], предложенного для расчета тепловыделения в дизелях. Критические замечания в адрес метода Н.Ф. Разлейцева изложены в [6]. Чтобы стать надежным для практического применения исследовательским инструментом, программе «Diesel-RK» следует избавиться от указанных выше заблуждений, что, судя по ее концептуальному построению, сделать нелегко.

**Некоторые нерешенные задачи современной теории поршневых двигателей.** Устранение вышеуказанных ошибок и неточностей, названных болезнями переходного периода, конечно, входит в число актуальных задач современной теории ДВС. Очевидно, что эта проблема, прежде всего, термодинамических 0D-моделей.

К нерешенным (до конца) задачам современных 3D-моделей следует отнести создание таких компонентов общей модели рабочего процесса ДВС, как:

➤ Модель распада струи топлива на отдельные капли, основанная на физической теории распада. Минимизация статистических и эмпирических данных при моделировании топливного факела как совокупности капель различного размера.

➤ Модель образования сажи в процессе гетерогенного сгорания и распределения частиц сажи по объему цилиндра, в том числе и в пристеночных слоях камеры сгорания.

➤ Модель генерации, рассеяния и поглощения лучистого теплового потока в камере сгорания, профили скорости и температуры в пограничном слое с учетом процесса образования сажи.

➤ Взаимное влияние лучистого и конвективного тепловых потоков, движение частиц сажи в пограничном слое, их осаждение на поверхности камеры сгорания.

➤ Теплоизолирующее воздействие слоя нагара и локальное распределение этого слоя на теплопринимающих поверхностях камеры сгорания.

➤ Разработка надежной теории и создание теории горения гомогенной смеси при воспламенении от сжатия и др.

Перечень можно продолжить.

Очевидно, что эти задачи особенно актуальны для дизелей, которые не имеют равных по КПД двигателей и для которых минимизация эмиссии твердых частиц становится судьбоносной. Ясно, что проблема актуальна и для бензиновых двигателей с непосредственным впрыскиванием.

Следует подчеркнуть, что современные 3D-CRFD-коды и используемые в них модели турбулентности (включая пристеночные функции с эмпирическими коэффициентами) не учитывают некоторые факторы, упомянутые выше. Например, наличие лучистого теплообмена и взаимное влияние лучистого и конвективного тепловых потоков. Действительно, эмпирические коэффициенты в пристеночных функциях, применяемых в 3D-CRFD-кодах [53], получены по результатам экспериментальных исследований чисто конвективного теплообмена при отсутствии теплообмена излучением. С другой стороны, выше было указано (9), что лучисто-конвективный характер теплообмена учитывается в рамках классической теории пограничного слоя [10]. Очевидно, что современные 3D-модели пограничного слоя и локального теплообмена в ДВС в этом отношении пока отстают от модели, основанной на классической теории Прандтля–Колмогорова. Таким образом, в настоящее время мы стоим перед фактом, что 3D-моделирование с современными моделями турбулентности, имеющее высочайший уровень потенциальных возможностей, по точности количественных результатов опережает модели, основанные на простой классической модели турбулентности Прандтля, однако уступает при решении некоторых специфичных задач теории поршневых ДВС (например, при моделировании сложного теплообмена в КС с учетом взаимного влияния конвективных и лучистых тепловых потоков).

В настоящее время на кафедре поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана имеется потенциал и реальные возможности заниматься проблемными задачами теории ДВС. Традиции научных школ двигателестроения в университете успешно развивают молодые доценты, кандидаты технических наук: Ф.Б. Барченко, А.А. Денисов, А.А. Зеленцов, В.А. Зенкин, Н.С. Маластовский, С.П. Чирский. Среднее поколение кафедры — доценты и кандидаты технических наук Л.Л. Мягков, А.Н. Краснокутский, А.С. Голосов — не сказали свое последнее слово в науке. Их активность в научной работе обнадеживает, что позволяет надеяться на сохранение ведущей роли кафедры по специальности ДВС.

Следует подчеркнуть, что кафедра традиционно имела мощную лабораторную базу, обеспечивающую высокий уровень научных исследований. Здесь заслуга, прежде всего, всех руководителей кафедры, начиная от В.И. Гриневецкого. В период руководства кафедрой М.Г. Кругловым, кроме учебной лаборатории, функционировали проблемные и отраслевые лаборатории, а общая численность сотрудников кафедры и лабораторий достигала полутора сотен. К сожалению, в так называемые послеперестроечные годы, при общей деградации высшей школы, лабораторная база практически была уничтожена.

Усилиями кафедры, благодаря энергичному старанию проф. Д.О. Онищенко, создавшему два научно-образовательных центра (НОЦ) при кафедре, имеется ряд прекрасно оборудованных экспериментальных стендов, используемых как в научных, так и учебных целях. В этих НОЦ, где заняты в основном студенты и преподаватели МГТУ различных специальностей, за рекордно короткий срок создан бюджетный молодежный родстер, полностью построенный на российской компонентной базе, спроектированы и построены несколько вариантов спортивных автомобилей в рамках молодежного инженерного проекта «Формула студент».

**Прогнозы на будущее.** Современные исследования внутрицилиндровых процессов, уровень совершенствования которых определяет перспективы поршневого двигателестроения, подразумевают, прежде всего, применение локальных параметров рабочего процесса. Связь и взаимное влияние процессов смесеобразования, сгорания, образования вредных веществ и теплообмена, учет которых необходим для усовершенствования в целом двигателя как единой системы — источника энергии, можно исследовать только с помощью локальных параметров. Другого пути для получения достоверных результатов нет. Поэтому следует утверждать, что новая теория поршневых двигателей, основанная на исследовании локаль-

ных параметров рабочего процесса, и в дальнейшем будет развиваться.

Нульмерные модели рабочего процесса, прежде всего, многозонные модели, по сравнению с 3D-моделями представляют собой существенно упрощенную реальность, однако скорость счета и достаточно надежные результаты моделирования при правильном отображении процессов сгорания и образования вредных веществ делают их востребованными при решении практически важных задач, например, при моделировании городского ездового цикла с переходными режимами с учетом влияния управляемых фаз газораспределения и хода клапанов, условий работы  $\lambda$ -зонда и др. Кроме того, они могут быть полезными при прогнозировании и экспресс-оценке Downsizing- и Downsampling-мотор-трендов. Так как уровень сложности поставленных теорией ДВС задач обычно быстрее растет, чем располагаемые расчетные (компьютерные) ресурсы, можно утверждать, что концептуально правильно построенные нульмерные модели пока еще могут послужить развитию ДВС.

Все опасения, связанные с дефицитом ресурса природного топлива, ужесточением норм экологии, а также с сомнением в значимости ДВС и с верой появления лучших альтернативных двигателей, утверждающие за последние 50 лет, что ДВС прослужит не больше пары десятилетий, к настоящему моменту оказались несостоятельными. Основным источником энергии на земле и на воде в обозримом будущем остается поршневой ДВС.

Более реальным является внедрение альтернативных топлив, особенностям применения которых на кафедре Э2 уделяется большое внимание (см. исследования, выполненные под руководством проф. В.А. Маркова). Можно утверждать, что новой теории поршневых двигателей, основанной на исследовании локальных параметров, вполне под силу устанавливать особенности турбулентного горения нетрадиционных топлив. В этом убеждают результаты 3D-моделирования рабочего цикла водородного дизеля с непосредственным впрыскиванием газообразного водорода, впервые в мировой практике выполненного в МГТУ [62–64], и подтверждающего экологическую перспективность дизелей — самых эффективных двигателей с точки зрения топливной экономичности.

В процессе развития современного двигателя выделяются три основные направления, от синхронного развития которых зависит не только решение глобальных энергетических и экологических проблем, но и судьба самих поршневых двигателей: ДВС, прежде всего процесс сгорания в ДВС — система нейтрализации вредных веществ в продуктах сгорания — используемое

топливо. Будем рассматривать триаду (от греч.  $\tau\rho\iota\alpha\delta\zeta$ , род.п.  $\tau\rho\iota\alpha\delta\omicron\zeta$  — единство, образуемое тремя отдельными частями, как это принято в философии). Не случайно знак, символично изображающий эту триаду, на рис. 6 изображен в непривычном, перевернутом виде, подчеркивая, что по сравнению со стремительным развитием ДВС и систем нейтрализации продуктов сгорания, усовершенствования топлив за последние почти полвека практически не происходило. Это позволяет утверждать, что в триаде топливо—двигатель—система нейтрализации потенциал топлива полностью не реализован.

Со времен изобретения первых работоспособных ДВС (двигатель Лемуара, 1860 г.) главным вопросом их исследования остается по возможности эффективное преобразование химической энергии топлива в механическую энергию движения. За это время эффективный КПД ДВС возрос от 5 до 55 % и более. И он на сегодняшний день самый высокий среди всех реальных и мыслимых тепловых двигателей. По этой причине заменить ДВС в триаде топливо—двигатель—система нейтрализации (см. рис. 6) более эффективным тепловым двигателем невозможно.

С введением первых норм по ограничению вредных выбросов в 1960–70-е гг. стало ясно, что следует думать об очистке отработавших газов с целью обезвредить (нейтрализовать) вредные вещества (ВВ), содержащиеся в продуктах сгорания. Системы нейтрализации ВВ, к которым мы относим все возможные варианты: от реакторов очистки ВВ, таких как CO, HC и NO<sub>x</sub>, до фильтров твердых частиц, в настоящее время достигли высокого уровня развития и продолжают совершенствоваться.

А что происходило со структурным составом топлива на фоне такого стремительного роста КПД ДВС и усовершенствования нейтрализаторов? Сразу после введения норм на выбросы вредных веществ с ОГ стало понятно, что состав (структура) топлива оказывает существенное влияние на процесс сгорания, и тем самым на эмиссию ВВ. Поэтому в 1980-е гг. тетраэтилсвинец был заменен метилбутиловым эфиром (Methylteriarbutylether — МТВЭ) для того, чтобы противодействовать вредному воздействию свинцовых соединений на окружающую среду. Таким образом, благодаря согласованному действию моторной техники и химии стало возможным введение бензина без свинцовых соединений. Другой пример: с 1990-х гг. были ужесточены нормы на содержание в топливе ароматических и соединений серы. Такой шаг потребовался для повышения долговечности систем нейтрализации продуктов сгорания.



Несмотря на это, современные бензины имеют октановые числа (ОЧ), достигнутые еще 1960–70-х гг. (см. рис. 6), т. е. их качество, в частности антидетонационная стойкость, практически не выросло. Высокие ОЧ идеально подошли бы для высокого наддува на бензиновых двигателях с уменьшенным рабочим объемом (Downsizing). Приведенный пример с октановым числом не единственный. Есть еще целый ряд свойств топлив, которые могут улучшить смесеобразование и сгорание как в двигателях Отто, так и в дизелях.

Таким образом, на сегодняшний день топливо является ключевым компонентом триады, который может быть успешно оптимизирован только согласованностью с двигателем и с нейтрализатором выпускных газов. Современная химическая технология способна создавать топлива нового поколения с заданной структурой и с заданными свойствами, удобными для двигателя и для системы нейтрализации, и обеспечивающими высокие эффективные и экологические показатели. Время новых поколений топлив назрело, однако в существующих нефтехимических технологиях производства топлива очень трудно что-нибудь изменить, особенно в краткосрочной перспективе.

В процессе перехода к топливам нового поколения традиционные топлива могут способ-

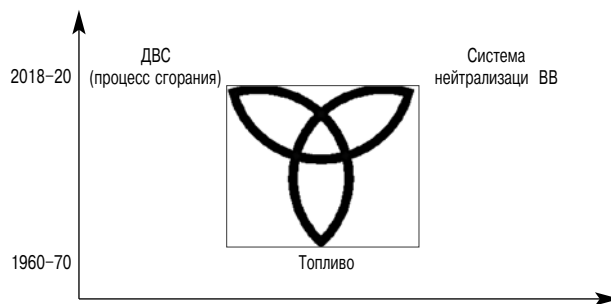


Рис. 6. Схематическое изображение использования потенциалов развития отдельных частей (компонентов) триады топливо–двигатель–система нейтрализации

ствовать (в случае разумной организации рабочего процесса) безболезненно, без нарушения норм и законов, плавному переходу к топливам с новыми структурами и свойствами, прежде всего к кислородосодержащим и синтетическим топливам.

В любом случае роль теории внутрицилиндровых процессов в развитии двигателестроения остается решающей.\*\*

\*\* Замечание редакции. До тех пор, пока в качестве окислителя в поршневом ДВС используется атмосферный воздух, образование NO<sub>x</sub>, наиболее сложных для нейтрализации, при использовании любого вида топлива неизбежно.

### 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.
27. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях. Харьков : Вища школа, 1980. 169 с.
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.
59. Разлейцев Н.Ф., Филипповский А.И. Математическая модель процесса сгорания в дизеле со струйным смесеобразованием // Двигателестроение. 1990. № 7. С. 52–56.
60. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. М. : Машиностроение, 1981. 159 с.
61. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. М.; Л. : Изд-во АН СССР, 1947. 148 с.
62. Кавтарадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 238 с.
63. Kavtaradze R.Z., Zelentsov A.A., Natriashvili T.M. Ignition Delay and Emission of the Noxious Substances in Double-Fuel Engines Working on the natural Gas and Syngases // Chahter 15 (p. 109–120) in the Book: Innovative Methods for Improvement of Technical, Economic and Ecological Efficiency of Motor Cars NOVA-Publishers. New-York, 2015. 138 p.
64. Kavtaradze, R., Natriashvili, T., and Gladyshev, S. Hydrogen-Diesel Engine: Problems and Prospects of Improving the Working Process. SAE Technical Paper 2019-01-0541, 2019.15p.