

РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ.
ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

Кавтарадзе Р.З.
Развитие теории рабочих процессов ДВС в МГТУ
им. Н.Э. Баумана: от метода Гриневецкого
до современных 3D-моделей

3

Лю Ин, Кузнецов А.Г., Харитонов С.В.
Анализ индикаторных диаграмм
дизельного двигателя при отключении цилиндров

9

Вальехо Мальдонадо П.Р., Чайнов Н.Д.
Уравновешивание V-образных двигателей
с угловым смещением шатунных шеек
рядом расположенных шатунов

17

ТОПЛИВО. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Лиханов В.А., Лопатин О.П.
Сгорание и тепловыделение в дизеле,
работающем на смесевом спиртовом топливе

26

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Бондарев А.В.
Моделирование переходных процессов
в твердотопливных котлах малой мощности
с топками высокотемпературного кипящего слоя

32

НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Совершенствование рабочих процессов
газовых двигателей
(материалы конгресса CIMAC-2016)

39

ИНФОРМАЦИЯ

Рефераты статей

63

ANALYSES, DEVELOPMENT
AND CONSTRUCTION OF ENGINES

Kavtaradze R.Z.
Development of combustion theory
in Bauman Technical University:
from Grinevetsky method to modern 3D-models

Lyu In, Kuznetsov A.G. and Kharitonov S.V.
Indicator diagrams of diesel engine with part
of the cylinders shut off

Valejo Maldonado H.R. and Chainov N.D.
Balancing of V-engines featuring angular offset
of crankpins adjacent connecting rods

FUEL. LUBRICANTS

Likhanov V.A. and Lopatin O.P.
Combustion and heat release
in engine firing fuel-spirit mix

POWER PLANTS

Bondarev A.V.
Imitation of transients in low-power boilers
featuring high-temperature fluidized bed

ENGINE BUILDING NEWS

Improvements in gas engine combustion processes
(based on CIMAC-2016 papers)

INFORMATION

Synopsis

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

ПРЕДПРИЯТИЯ

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

НИИ

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

ВУЗЫ

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

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

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

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

Дата включения в обновленный перечень ВАК — 29.05.2017.

Группы научных специальностей:

05.02.00 — Машиностроение и машиноведение

05.04.00 — Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

05.14.00 — Энергетика

Электронные версии журнала (2005–2019 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» (www.elibrary.ru) 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 03.07.2019
Подписано в печать 22.07.2019
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7
Зак. 22. 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. № 2 (276)

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

Показана роль кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ имени Н.Э. Баумана в историческом развитии фундаментальной теории поршневых двигателей, начиная от отцов-основателей специальности «Двигатели внутреннего сгорания (ДВС)», до настоящего времени. Проанализированы актуальные задачи исследования, прежде всего, внутрицилиндровых процессов, решенные на разных этапах развития поршневого двигателестроения усилиями кафедры. Другие направления научно-исследовательских работ, связанные с газообменом и наддувом, топливоподачей, механикой и термостойкостью ДВС упомянуты только по мере необходимости при анализе проблем совершенствования рабочего процесса. То же самое относится к работам других, российских и зарубежных научных школ, оказавших существенное влияние на развитие теории поршневых двигателей и достойных самой высокой оценки.

Введение. Современная теория поршневых двигателей достигла высокого уровня развития, в чем немалая заслуга представителей научной школы Московского государственного технического университета (МГТУ) имени Н.Э. Баумана (ранее Императорского Московского технического училища (ИМТУ) и Московского высшего технического училища (МВТУ)). Следует подчеркнуть, что по многим направлениям развития теории поршневых двигателей исследователи из ИМТУ–МВТУ–МГТУ были и остаются первопроходцами и лидерами не только в России, но и в мире.

Сначала было слово. И это слово впервые сказал Сади Карно (Sadi Nicolas Leonard Carnot, 1796–1832). Дату рождения термодинамики как фундаментальной науки можно назвать точно, что в истории науки и техники бывает крайне редко. Это 1824 год, когда в Париже была издана книга С. Карно «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Тем самым был заложен прочный фундамент для построения теории поршневых двигателей.

Началом поршневого двигателестроения считается 1860 г., когда Э. Ленуар (Jean Joseph

Etienne Lenoir, 1822–1900) создал первый работоспособный поршневой двигатель внутреннего сгорания (ДВС) — альтернативу поршневым паровым машинам. С тех пор поршневое двигателестроение достигло колоссальных успехов, в чем большая заслуга именно теории поршневых двигателей как науки. Не вдаваясь в подробности вечного философского вопроса: что первично, бытие или сознание, отметим, что теория двигателей и двигателестроение оказывали и оказывают друг на друга плодотворное влияние и их развитие следует рассматривать как одно целое.

В.И. Гриневский — основоположник теории поршневых двигателей. Основателем специальности «Двигатели внутреннего сгорания (ДВС)» и научной школы «Теория поршневых двигателей» в России является выдающийся ученый и инженер, профессор, директор ИМТУ (1914–1917) и первый избранный ректор МВТУ (1917–1919) Василий Игнатьевич Гриневский (1871–1919), по инициативе которого в 1906–1907 учебном году в Механической лаборатории ИМТУ были созданы первые экспериментальные установки с двигателями внутреннего сгорания для исследования рабочих процессов этих машин [1].

К этому времени двигатели с принудительным зажиганием, работающие по циклу Отто, и дизели, достигшие высокой степени совершенства, стали завоевывать рынок в транспортной и стационарной энергетике. Широкие перспективы ДВС были очевидны и назрела необходимость разработки научно-теоретических основ для исследования и усовершенствования внутрицилиндровых процессов, имеющих определяющее влияние на формирование эффективных показателей двигателя.

На основе экспериментального материала, накопленного в промышленности и лаборатории ИМТУ, В.И. Гриневский создал и в 1907 г. опубликовал метод теплового расчета ДВС [2]. В том же году В.И. Гриневский начал читать курс «Двигатели внутреннего сгорания» и организовал учебную лабораторию ДВС [1].

* 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.

Следует подчеркнуть, что работа В.И. Гриневецкого [2] — это первый не только в русской, но в мировой литературе научный труд, посвященный построению теории рабочих процессов ДВС. Действительно, в то время в европейских странах, на родине изобретателей первых ДВС, ничего аналогичного, имеющего значение для становления теории ДВС, не было: Ж. Э. Ленуар, будучи талантливым изобретателем, не имел фундаментального образования и не мог этого сделать. Н. А. Отто (1832–1891), окончивший реальное училище, был коммерсантом и изобретателем-самоучкой, и несмотря на полученное позже звание почетного доктора Вюрцбургского университета, тоже не мог внести вклад в теорию ДВС. Доказательством такого утверждения являются многочисленные материалы по результатам испытания двигателей, оставленные Н.А. Отто и изученные специалистами [3]. Р. Дизель (1853–1913), получивший прекрасное образование в Мюнхенском высшем техническом училище (ныне ТУ Мюнхен), где он учился у проф. К. Линде, был, видимо, первым из отцов-основателей двигателестроения, который подходил к вопросу как инженер-конструктор: сначала проводил расчеты, потом проектировал, изготавливал и испытывал двигатель. Однако его известная книга [4] — обоснование преимуществ двигателя Дизеля, подкрепленное инженерными расчетами, не содержала метода теплового расчета двигателя. Изобретатель первого прообраза современных дизелей, работающих по циклу со смешанным подводом теплоты, российский инженер Г.В. Тринклер (1876–1957), который был знаком с русским изданием книги Г. Гюлднера [2] с дополнением В.И. Гриневецкого, в своей книге [5] признавал приоритет последнего. В частности Г.В. Тринклер писал: «В 1907 году профессор МВТУ В.И. Гриневецкий впервые дал разработанную теорию рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания, которая в дальнейшем была углублена его учеником, профессором того же вуза Е.К. Мазингом и профессором Н.Р. Брилингом. Эта полноценная теория служит основой при изучении и количественной оценке рабочих процессов, совершающихся в цилиндре двигателя, и является важным пособием при проектировании ДВС» [5]. Эти слова одного из отцов-основателей дизелестроения Г.В. Тринклера, изобретательская и научная деятельность которого в основном проходила в Германии в период после Гриневецкого [6], убедительно подтверждает приоритет основателя специальности ДВС в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В.И. Гриневецкий в списке используемой литературы [2] указывает на существующие для того времени значимые работы европейских авторов, т. е. он прекрасно знал, что метода тепло-

вого расчета ДВС еще не существует, иначе он не стал бы заниматься его разработкой. Кроме того, в самой книге Г. Гюлднера [2], которая охватывает практически все известные работы по ДВС, опубликованные к тому времени в Европе, прежде всего в Германии — на родине современных ДВС, ничего подобного не было, что и привело В.И. Гриневецкого к созданию метода теплового расчета ДВС.

Уместна параллель — чуть позже, вслед за В.И. Гриневецким в 1909/10 учебном году Н.Е. Жуковский в ИМТУ впервые прочитал, а в 1916 г. издал на французском языке лекционный курс «Теоретические основы воздухоплавания», основанный на результатах собственных исследований. Нет сомнений, что В.И. Гриневецкий и Н.Е. Жуковский соответственно освободили теорию поршневых двигателей и аэродинамику из плена эмпирики. К сожалению, труд В.И. Гриневецкого был издан только на русском языке, что помешало признанию его приоритета за рубежом.

Таким образом, «Тепловой расчет рабочего процесса» В.И. Гриневецкого [2] является уникальной работой, заложившей основу теории поршневых двигателей и можно заключить, что он является основоположником теории поршневых двигателей, а кафедра «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана — колыбелью этой теории.

Метод Гриневецкого–Мазинга. Современный взгляд. Теория рабочих процессов, прежде всего теория горения топлива в условиях двигателя, и теплообмен относятся к тем ключевым вопросам, уровень разработки которых определил судьбу поршневых двигателей как самых экономичных и поэтому самых распространенных из всех существующих тепловых машин. Сегодня очевидно, что уровень совершенствования процессов сгорания и теплообмена определяет будущее поршневых двигателей, но еще в 1907 г. В.И. Гриневецкий заявил: «Желательны исследования лабораторного характера по вопросам о неполноте сгорания и о теплоотдаче за разные периоды рабочего процесса, а также о догорании. Исследования этого рода представляют весьма тонкие экспериментальные задачи и почти не могут производиться вне лаборатории. Практическое значение подобных исследований, однако, довольно велико, независимо от их ценности для расчета рабочего процесса. Вопросы о неполноте сгорания и о теплоотдаче к стенкам представляются весьма важными для конструктора, которому их приходится решать до сих пор ощупью» [2].

Определив основные задачи теории рабочих процессов, В.И. Гриневецкий разработал метод теплового расчета. Его ученик, профессор ИМТУ—

МГТУ Евгений Карлович Мазинг (1880–1944), развивая идеи своего учителя, в дальнейшем уточнил этот метод, предложив оригинальную для тех времен идею: оценить неполноту (т. е. несовершенство) процесса сгорания содержанием сажи, полученной в результате анализа отработавших газов (ОГ) [7].

В результате был создан метод, позволяющий определить основные параметры конструкции двигателя в зависимости от технического задания, названный методом Гриневецкого–Мазинга, ставший основой для известных учебников и монографий, опубликованных сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана — учениками и последователями В.И. Гриневецкого. Среди них прежде всего следует упомянуть работы Н.Р. Брилинга (вопросы теплообмена) [8] и Б.Г. Либровича (теория ДВС с разделенной камерой сгорания (КС)) [9].

Метод Гриневецкого–Мазинга основан (если применить современную терминологию) на термодинамической, т. е. нульмерной, однозонной модели рабочего процесса [6]. Модель квазистационарная и базируется на алгебраических уравнениях термодинамики, в частности на уравнении состояния $pV = mRT$, в котором в качестве изменяющегося параметра входит объем цилиндра V . При этом процессы впуска–выпуска рассматриваются как изобарные, а процессы сжатия–расширения — как политропные. Процесс сгорания моделируется с применением коэффициента использования теплоты ξ в процессе сгорания. Дальше вводится коэффициент выделения теплоты χ , а также Q_w — количество теплоты, отдаваемое стенкам цилиндра, и определяется количество теплоты, которое затрачивается на увеличение внутренней энергии рабочего тела и на совершение механической работы

$$\xi H_u = \chi H_u - Q_w. \quad (1)$$

Очевидно, что определить коэффициенты ξ и χ , а также Q_w можно только экспериментально. Задание этих коэффициентов по существу означает перевод P – V -диаграммы идеального термодинамического цикла, т. е. цикла без потерь, в замкнутую индикаторную диаграмму (в диаграмму реального цикла). Располагая расчетной индикаторной диаграммой еще на стадии проектирования, можно прогнозировать эффективные показатели двигателя.

Выражение (1) подтверждает дальновидность слов В.И. Гриневецкого, приведенных выше. По существу он определил основную задачу теории поршневых двигателей: для моделирования рабочего цикла, т. е. для получения индикаторной диаграммы, надо уметь смоделировать тепловыделение и теплоотдачу к стенкам цилиндра.

Следует подчеркнуть, что метод Гриневецкого–Мазинга, показав необходимость проведения широкомасштабных исследований в этих направлениях, позже инициировал создание в МВТУ–МГТУ научных школ члена-корр. АН СССР Н.Р. Брилинга (по теплообмену в ДВС) и профессора Д.Н. Вырубова (смесеобразование и сгорание).

Выдающийся представитель этого направления профессор И.И. Вибе (1902–1969), автор самой известной в мире модели тепловыделения, как и другие советские специалисты его поколения, был воспитан на методе Гриневецкого–Мазинга.

Научная школа Н.Р. Брилинга (1876–1961) по теплообмену в ДВС. Профессор МВТУ–МГТУ Н.Р. Брилинг, ученик В.И. Гриневецкого, развивая метод Гриневецкого–Мазинга, занимался решением проблем усовершенствования процесса сгорания и определения тепловых потерь в стенке КС. На примерах традиционного топлива и спирта он исследовал влияние их испаряемости на рабочий процесс двигателей с искровым зажиганием, разрабатывал метод определения скорости распространения пламени, а позже создал теорию быстроходных дизелей, частота вращения n коленчатого вала в которых увеличивалась за счет снижения хода поршня S при постоянном значении его средней скорости $c_m = S_n/30 = \text{const}$. Н.Р. Брилингом экспериментально была доказана перспективность конструкции неразделенной КС, способствующей повышению турбулентности заряда, а также перспективность применения высоких давлений впрыскивания для качественного распыливания топлива при повышенной быстроходности дизеля. Последнее было достигнуто применением насос-форсунок вместо разделенной системы топливоподачи. Быстроходный (одновременно короткоходовой) дизель позволил уменьшить количество теплоты, передаваемой в систему охлаждения, что привело к повышению экономичности двигателя при высокой литровой мощности.

За рубежом Н.Р. Брилинг больше известен как автор α -формулы для расчета теплоотдачи в цилиндре так называемых компрессорных дизелей с пневматическим распыливанием топлива:

$$\alpha = 5,388 \cdot 10^{-4} (1 + 1,45 + 0,185 \cdot c_m) (T_\infty P^2)^{1/3} + 0,421[(T_\infty/100)^4 - (T_w/100)^4]/(T_\infty - T_w), \quad (2)$$

представляющей собой уточнение α -формулы Нуссельта — исторически первой формулы для расчета теплоотдачи в цилиндре поршневого двигателя. В формуле (2) T_∞ , P^2 — текущие значения температуры и давления рабочего тела, T_w — температура поверхности камеры сгорания. Выражение $1,45 (T_\infty P^2)^{1/3}$ автор связывает с «теплоотдачей от вихрей». Поэтому аддитивный аналог этой формулы имеет вид:

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_{\text{в}} + \alpha_K + \alpha_R, \quad (3)$$

где α_0 , $\alpha_{\text{в}}$, α_K , α_R — коэффициенты теплоотдачи, соответствующие соответственно неподвижному газу в камере сгорания, «теплоотдаче от вихрей», условиям вынужденной конвекции со скоростью, пропорциональной средней скорости c_m поршня, и теплоотдаче излучением.

Таким образом, Н.Р. Брилинг, проводя опыты по определению тепловых потерь в цилиндре малооборотного компрессорного дизеля ($n = 200$ об/мин), обнаружил, что при интенсивном вихреобразовании, обусловленном пневматическим распылением топлива, коэффициент теплоотдачи заметно увеличивается [10]. Заслуга Брилинга очевидна: сохранив структуру α -формулы Нуссельта. Он доказал, что в каждом конкретном случае (в зависимости от способа смесеобразования, быстроходности, мощности) коэффициенты необходимо уточнять по результатам экспериментов. Этот вывод получил развитие в работах советских и зарубежных исследователей, в частности для отдельных типов двигателей различные вариации α -формулы Нуссельта и Брилинга предложили: Н.Н. Брызгов (1937), Н.В. Иноземцев (1941), И.А. Трактовенко (1947), А.Н. Гнездилов (1952), Н.И. Цветков (1953), Л.М. Белинский (1955), А.Г. Морозов (1957), И.М. Ленин и А.В. Костров (1963), Н.В. van Tuyn (1959), А. Stambuleanu (1966) и др. [10]. В официальном издании [11] имя Н.Р. Брилинга справедливо внесено как «одного из крупных ученых и организаторов кафедры ДВС». Добавим, что он является основателем научной школы по теплообмену в поршневых двигателях в СССР.

Научная школа Д.Н. Вырубова (1900–1978) по смесеобразованию и сгоранию. Крупнейшим ученым, работающим в области теории поршневых двигателей в МВТУ–МГТУ им. Н.Э. Баумана, является лауреат Государственной премии СССР (1974), профессор Д.Н. Вырубов, основоположник научной школы по смесеобразованию и сгоранию в двигателях. Он опубликовал фундаментальную работу [12] тогда, когда, говоря словами автора, несмотря на настоятельную необходимость в экспериментальных данных о коэффициентах теплоотдачи шарообразных тел для расчета разнообразных технических процессов, публикаций данного направления практически не было ни в зарубежной, ни в советской литературе. Заметим, что известная тепловая шкала турбулентности Л.Г. Лойцянского и Б.А. Шваба, опубликованная в трудах ЦАГИ в 1935 г., не содержала таких данных. В связи с этим при расчете испарения капель в цилиндре дизеля использовали данные о коэффициентах теплоотдачи, полученные в 1932 г. немецким исследователем Ульзамером (Ulsamer) для цилиндрических тел [12].

Д.Н. Вырубов ставил свои эксперименты при строгом соблюдении фундаментальных положений теории подобия, применив металлические шары, укрепленные на растяжках, которыми служили термпары со спаем в центре шара. Шары вводили в поток нагретого воздуха и наблюдали повышение их температуры. Высокая теплопроводность металла и небольшие диаметры шаров (от 2,4 до 14,8 мм) обеспечивали нагревание почти до одинаковой температуры всей массы шаров. В результате проведенных экспериментов Д.Н. Вырубовым была получена формула для исследования теплоотдачи шарообразных тел, справедливая для диапазона числа Рейнольдса $Re = 150–30\,000$:

$$Nu = 0,54Re^{0,5}. \quad (4)$$

Эта формула и в настоящее время находит широкое применение при расчете теплоотдачи и испарения капель в поршневых и ракетных двигателях. Она используется во всемирно известных зарубежных и российских учебниках и монографиях по теории теплообмена и теории горения, таких как книги Мак-Адамса, Д.А. Франк-Каменецкого, С.С. Кутателадзе, Б.В. Раушенбаха и др.

На основе формулы (4) была разработана теория испарения одиночной капли жидкого топлива в условиях камеры сгорания ДВС, пространство которой для статистического ансамбля капель топлива, т. е. для топливного факела, осуществляется на основе статистического закона распределения капель по размерам, чаще всего закона Розина–Рамлера, а для более упрощенных моделей — с применением среднего диаметра капли.

Известная на западе книга Г. Ситкея (G. Sitkei) [13], венгерского академика, изданная на немецком языке, написана на основе результатов НИР, проведенных в МВТУ (МГТУ) им. Н.Э. Баумана Д.Н. Вырубовым, а также Г.Г. Калишем, Н.В. Иноземцевым, Н.Р. Брилингом, Б.Г. Либровичем, О.Б. Леоновым и др. И несмотря на то что Г. Ситкей неоднократно ссылается на работы Д.Н. Вырубова, он более известен за рубежом как основоположник теории процессов смесеобразования и сгорания в ДВС, чем Д.Н. Вырубов.

Среди многочисленных учебников и учебных пособий, изданных сотрудниками МГТУ, особое место занимает книга, написанная Д.Н. Вырубовым совместно с доцентом В.П. Алексеевым [14] в добрых традициях теории горения нобелевского лауреата, академика Н.Н. Семенова, в которой использованы обыкновенные дифференциальные уравнения для описания нестационарных процессов и экспоненциальных зависимостей, позволяющих получить простые аналитические реше-

ния. Содержание книги соответствовало дисциплине «Физические основы процессов смесеобразования и сгорания». Следует отметить, что выделение этого курса из общей теории ДВС и его формирование в качестве отдельной лекционной дисциплины впервые было осуществлено в МГТУ им. Н.Э. Баумана по инициативе Д.Н. Вырубова, читавшего этот курс. В дальнейшем в связи с трансформациями учебных программ он несколько раз менял названия, однако основная цель — совершенствование процесса сгорания — оставалась неизменной. В настоящее время курс читается для магистров под расширенным названием «Специальные главы теории поршневых двигателей». Многие из изложенных в книге [14] проблем и сегодня не потеряли свою актуальность, однако отметим только одну из них — задержку воспламенения в дизелях.

Как известно, в химической физике началом периода задержки воспламенения считается момент, когда горючая смесь помещается в сосуд, имеющий температуру стенок $T_{\text{во}}$, а концом — момент достижения температуры смеси предвзрывного разогрева $T_p = T_{\text{во}} + RT_{\text{во}}^2/E$. Однако, в зоне горения для достижения такой температуры требуется существенно меньше теплоты, чем теплота, идущая на прогрев и испарение впрыскиваемого топлива. Очевидно что такое определение задержки воспламенения в дизелях не находит применения. В.П. Алексеевым было предложено следующее определение [14, 15]: «Периодом задержки воспламенения τ_i называется время от начала поступления топлива в камеру сгорания до момента, когда тепловыделение в результате химических реакций Q_x становится равным количеству теплоты, затраченной на прогрев и испарение впрыснутого топлива $Q_{\text{исп}}$ ». Согласно этому определению уравнение для расчета задержки воспламенения имеет вид:

$$\int_0^{\tau_i} \frac{dQ_x}{d\tau} d\tau - \int_0^{\tau_i} \frac{dQ_{\text{исп}}}{d\tau} d\tau = 0. \quad (5)$$

До этого задержка воспламенения определялась по развернутой индикаторной диаграмме как период от начала подъема иглы форсунки до момента отдаления линии давления при сгорании от линии давления при сжатии без впрыскивания топлива [16]. Очевидно, что в таком случае присутствие фактора визуализации повышает вероятность неточного определения периода задержки воспламенения. Использование же условия (5) при расчете зависимости $dQ_x/d\tau = f(\tau)$ на основе индикаторной диаграммы с применением первого закона термодинамики дает отрицательное значение тепловыделения, равное затрате теплоты на прогрев и испарение топлива, тем самым точно определяет момент, когда скорость тепло-

выделения станет положительной. Именно этот момент и является моментом начала сгорания (моментом конца периода задержки воспламенения). В свое время этот предложенный в МГТУ им. Н.Э. Баумана метод был альтернативой эмпирической формуле А.И. Толстова [6], опубликованной в 1955 г. и требующей модернизации в связи с появлением форсированных дизелей с повышенным давлением впрыскивания топлива. В настоящее время метод МГТУ является наиболее надежным и признанным во всем мире из всех существующих методов определения задержки воспламенения [6]. Формулы для расчета периода задержки воспламенения, полученные для дизельного и газодизельного процессов (для природного газа и различных синтез-газов) в МГТУ им. Н.Э. Баумана [6, 17] и находившие широкое применение у зарубежных исследователей [18, 19, 20], предусматривают определение начала сгорания, предложенное в работах В.П. Алексеева и Д.Н. Вырубова. К сожалению, большинство современных российских исследователей и в настоящее время отдают предпочтение устаревшим зависимостям для расчета задержки воспламенения.

Следует упомянуть также об экспериментальном методе определения интенсивности вихревого движения заряда в цилиндре дизеля, имеющей решающее значение для быстрого распада струй жидкого топлива и повышения качества процесса смесеобразования. Метод измерения скорости движения заряда был разработан Д.Н. Вырубовым и В.П. Алексеевым и описан в [14, 21]. Он предусматривает использование ионизированных частиц самого заряда, тем самым исключает влияние инерционности частиц на точность измерения. Этим разработанный метод выгодно отличался от опубликованных в то время работ европейских исследователей [21]. Кроме того, Д.Н. Вырубовым и с учениками были проведены ширококомасштабные работы по визуализации динамики свободных и пристеночных струй топлива и процесса сгорания в частично прозрачных камерах сгорания с применением методов скоростной фото- и киносъемки [14].

Фундаментальные работы проф. Д.Н. Вырубова и его научной школы по исследованию процессов смесеобразования и сгорания положили начало созданию в МГТУ им. Н.Э. Баумана аналогичных школ в области реактивных и газотурбинных двигателей [1].

Литература

1. 100 лет специальности «Двигатели внутреннего сгорания» в МГТУ им. Н.Э. Баумана под ред. Н.А. Ивашенко. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2007. 296 с.

2. *Гриневецкий В.И.* Тепловой расчет рабочего процесса. Дополнение редактора перевода к книге Г. Гюльднера «Газовые, нефтяные и прочие двигатели внутреннего сгорания», Москва, типолитография «И.Н. Кушнерев и К^о», 1907. С. 569–594.
3. *Sittauer H.L. Nicolaus August Otto, Rudolf Diesel.* 4. Auflage. Teubner, Leipzig, 1990. 220 p.
4. *Diesel R.* Theorie und Konstruktion eines rationellen Warmemotors zum Ersatz der Dampfmaschine und der heute bekannten Warmemotoren. Berlin. Springer-Verlag, 1893. 96 p.
5. *Тринклер Г.В.* Двигателестроение за полу столетие. Очерки современника. Л. : Государственное издательство водного транспорта, 1954. 160 с.
6. *Кавтарадзе Р.З.* Теория поршневых двигателей. Специальные главы. 2-е изд. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 589 с.
7. *Мазинг Е.К.* Тепловой расчет рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания. 2-е изд., доп. М., 1935. (Первое издание в 1928 г.).
8. *Брилинг Н.Р.* Исследование рабочего процесса и теплопередачи в двигателе дизель. М. : изд-во ГНТИ, 1931.
9. *Либрович Б.Г.* Рабочий процесс предкамерного двигателя, М.; Л. : ОНТИ НКТП СССР. 1937.
10. *Кавтарадзе Р.З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях. 3-е изд., доп. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 515 с.
11. Основатели научных школ МГТУ им. Н.Э. Баумана: Краткие очерки/под ред. Е.Г. Юдина, К.Е. Демихова. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. — 632 с.
12. *Вырубов Д.Н.* Теплоотдача и испарение капель // Журнал технической физики. Т. IX, вып. 21. 1939. С. 1923–1931.
13. *Sitkei G.* Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren. Springer-Verlag. Berlin-Göttingen-Heidelberg. —1964. 222 p.
14. *Алексеев В.П., Вырубов Д.Н.* Физические основы процессов в камерах сгорания поршневых двигателей внутреннего сгорания. М. : МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1977. — 84 с.
15. *Алексеев В.П.* Уравнение для определения задержки воспламенения в камере сгорания дизеля // Известия ВУЗов, Машиностроение. 1974. № 6.
16. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей // А.С. Орлин, Д.Н. Вырубов, В.И. Ивин, М.Г. Круглов, О.Б. Леонов, Г.Н. Мизернюк/ под ред. А.С. Орлина. Издание 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1971. 400 с.
17. *Кавтарадзе Р.З., Цайлингер К., Цитцлер Г.* Задержка воспламенения в дизеле при использовании различных топлив // РАН. Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43, № 6. С. 947–965.
18. *Boehman A.L., Le Corre O.* Combustion on Syngas in Internal Combustion Engines/ / Combustion Science and Technology. 008. № 6 (180). P. 1193–1206.
19. *Lata D.B., Misra A.* Analysis of ignition delay period of dual fuel Diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels. Int // Journal of hydrogen energy. 2011. № 36. P. 3746–3756.
20. *Lieuwen T., Yang V., Yetter R (eds.).* Synthesis Gas Combustion. Fundamentals and Applications. CRC Press. New York, 2010. 403 p.
21. *Орлин А.С., Круглов М.Г.* Комбинированные двухтактные двигатели. М. : Машиностроение, 1968. 576 с.

(Продолжение следует)