

Теплообмен в поршневых двигателях

Научное направление «теплообмен в поршневых двигателях» в России имеет вековую историю и опирается на фундамент, первый камень в который заложен трудами профессоров МГТУ (тогда еще ИМТУ) им. Н.Э. Баумана В. И. Гриневецкого и Н.Р. Брилинга. Кафедра «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана и в настоящее время является ведущей в этой актуальной и быстро развивающейся области науки. К сожалению, не то что отметить, но и перечислить в одной статье все достижения кафедры даже только в области теплообмена невозможно, поэтому ограничимся кратким анализом, прежде всего, тех пионерских работ, которых по истечению времени можно отнести к классическим, и более подробно остановимся на достижениях последних лет.

Объем статьи не позволяет также подробно проанализировать работы кафедры в области теплонапряженности и термоупругости, теплообмена в процессе испарения капель, теплообмена во вспомогательных системах двигателя и др. Поэтому в статье упоминается только о некоторых из них, при этом особое внимание уделено работам по теплообмену в цилиндре двигателя, выполненным в МГТУ и сотрудниками МГТУ.

Разумеется, что список литературы, приведенный в конце статьи, не может быть полным.

Первые работы в области теплообмена в двигателях. Поршневой двигатель внутреннего сгорания - одно из самых величайших достижений техники – стал широко внедряться в различные области промышленности и транспорта еще с конца 19-го столетия прежде всего благодаря стараниям создателей первых работоспособных машин - француза Ж. Ленуара (1860 г.), немцев Н.А. Отто (1867 г.) и Р. Дизеля (1893 г.). Их разработкам предшествовали классические исследования С. Карно (1824 г.) и Р. Стирлинга (1816 г.), в которых четко было показано, что основной путь к увеличению КПД теплового двигателя – это расширение температурных пределов его цикла, что реальнее всего можно осуществить увеличением значения максимальной температуры. Определяющая роль охладителей и теплообменников, предсказанная С. Карно и Р. Стирлингом, нашли практические подтверждения в первых же конструкциях Ленуара, Отто и Дизеля, жизнеспособность которых, как оказалось, непосредственно зависела от интенсивности охлаждения рабочей полости. Р. Дизель в своей знаменитой книге [1] скрупулезно проанализировал термодинамические принципы работы нового двигателя, названного позже в его честь дизелем. В частности, им выдвигался принцип медленного (буквально-«постепенного») сгорания, при котором сохраняется температура конца сжатия T_c . Стараясь практически реализовать такой цикл, Р.Дизель предполагал минимизировать тепловые потери, увеличить КПД двигателя и упростить ее конструкцию, отказавшись от системы охлаждения. Принцип, предложенный им, по существу предвосхитил идею «адиабатного» двигателя. Но опыт создания и экспериментального исследования первого образца нового двигателя по патенту Дизеля заставил отказаться от первоначальной формулы изобретения и ввести водяное охлаждение цилиндра. Из первых же работ Дизеля стало ясно, что увеличение мощности двигателя требует интенсификацию его охлаждения в целях обеспечения необходимой долговечности конструкции и что чем меньше отводится теплоты от рабочего тела, тем больше КПД двигателя.

Очевидно, что решение этих противоположных вопросов требовало пристального изучения тепловых процессов в двигателях, в частности процесса теплообмена между высокотемпературным рабочим телом и стенками камеры сгорания, определяющего теплонапряженные состояния основных деталей (поршень, гильза, крышка цилиндра, клапаны).

Однако изучению и прогнозированию процессов теплообмена в цилиндре двигателя, прежде всего, определению отведенной от рабочего тела теплоты, мешало отсутствие знаний о внутрицилиндровых процессах, в частности, отсутствие метода теплового расчета двигателя. Блестящая работа профессора МГТУ (ИМТУ) В. И. Гриневецкого «Тепловой расчет рабочего процесса», опубликованная в 1907 в переводной книге Г. Гюльд-

нера, как дополнение от редактора [2], стала тем прочным фундаментом, на котором оказалось возможным строить теорию теплообмена для поршневых двигателей. В заключительной части своей работы В.И. Гриневецкий писал: «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 придется решать до сих пор ощупью» [2].

Вопросы теплообмена в поршневых двигателях «в чистом виде» в первые начал изучать В. Нуссельт (1882-1957) – один из крупнейших теплофизиков прошлого столетия, создатель теории подобия в теплопередаче. Обработывая опытные данные, полученные на калорической бомбе, а также опыты Д. Клерка по тепловому балансу тихоходного газового двигателя, В. Нуссельт получил и в 1923 г. опубликовал формулу для коэффициента теплоотдачи в цилиндре поршневого двигателя [3]:

$$\alpha = 1,16 (1 + 1.24c_m) \cdot T_\infty^{1/3} \cdot P^{2/3} + 0.421 \frac{(T_\infty / 100)^4 - (T_w / 100)^4}{T_\infty - T_w}, \quad (1)$$

где T_∞, P – текущая температура (К) и текущее давление (бар) рабочего тела в цилиндре, T_w – температура (К) поверхности камеры сгорания, c_m – средняя скорость поршня (м/с). Следует отметить, что В. Нуссельт был автором 11 опубликованных работ по актуальным вопросам двигателестроения, а на кафедре термодинамики Мюнхенского технического университета, которой он руководил, только в области поршневых двигателей его докторантами были защищены 24 диссертации! В теории поршневых двигателей В. Нуссельт известен, прежде всего, как автор формулы (1).

Основополагающие работы Н.Р. Брилинга и его последователей. МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана был первым высшим учебным заведением страны, где еще в 20-х годах XX века стали проводить глубокие исследования процессов теплообмена в поршневых двигателях. Руководителем и автором этих работ был выдающийся ученый, профессор Н.Р. Брилинг (1876-1961) – впоследствии член-корреспондент АН СССР. Он – ученик и соратник В.И. Гриневецкого, получивший инженерное образование в Германии и был знаком с работами немецких ученых в области двигателестроения.

Н.Р. Брилинг в 1931г. издал монографию [4], тем самым заложил основы в создании отечественной школы по теплообмену в поршневых двигателях. Проведя опыты по определению тепловых потерь в цилиндре малооборотного ($n = 200 \text{ мин}^{-1}$) компрессорного дизеля, он обнаружил, что интенсивное вихреобразование, обусловленное пневматическим распыливанием топлива, интенсифицирует теплообмен в цилиндре, и предложил свой вариант формулы Нуссельта

$$\alpha = 1,16 (1 + 1.45 + 0.185 \cdot c_m) (T_\infty P^2)^{1/3} + 0.421 \frac{(T_\infty / 100)^4 - (T_w / 100)^4}{T_\infty - T_w}, \quad (2)$$

имеющий, как и (1), аддитивную структуру

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_\omega + \alpha_K + \alpha_R,$$

где α_0 – коэффициент теплоотдачи, соответствующий в целом неподвижному газу в камере сгорания (его выражение Нуссельт получил на сферической бомбе при наличии в ней свободной конвекции); α_K – то же, соответствующее условиям вынужденной конвекции со скоростью, пропорциональной средней скорости c_m поршня; α_R – коэффициент теплоотдачи излучением и его значение было определено Нуссельтом в результате экспериментов с применением позолоченной, а также выкрашенной в черный цвет поверхностей бомб. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_\omega = 1.45 (T_\infty \cdot P^2)^{1/3}$ Н. Р. Брилинг связывает с «теплоотдачей от вихрей» [4], указывая при этом, что в быстроходных дизелях теплообмен «следует тому же закону, какой был нами найден для стационарного двигателя Дизеля, с той лишь разницей,

что в теплопередаче отсутствует постоянный член, выражающий тепло от вихревых движений, вызванных искусственно в процессе распыливания топлива». Поэтому в расчетах быстроходных дизелей бескомпрессорного типа полагается, что $\alpha_{\omega} = 0$.

Заслуга Н. Р. Брилинга очевидна: сохранив структуру нуссельтовской формулы (1), он совершенно недвусмысленно доказал, что в каждом конкретном случае (способ смесеобразования, быстроходность, уровень форсирования) коэффициенты должны уточняться по результатам прямых экспериментов. Этот вывод Н. Р. Брилинга нашел развитие в работах других выдающихся представителей научной школы МГТУ - Н. Н. Брызгова и Н.В. Иноземцева [5, 6], содержащих конкретизацию выражения $\alpha_0, \alpha_{\omega}, \alpha_K$ для отдельных типов двигателей.

Н. Н. Брызгов [5] уточнил значения α_{ω} для предкамерных двигателей. Согласно его экспериментам в случае обычных предкамер первый член в скобках в формуле Нуссельта – Брилинга меняется и α -формула принимает вид - $(1+3.5+0.185 \cdot c_m)$, а в случае предкамерных двигателей с так называемой акро-камерой - $(1+4.2+0.185 \cdot c_m)$. Интенсификацию теплообмена Н.Н. Брызгов объясняет наличием акро-камеры, представляющей собой углубление дуговой формы на огневой поверхности поршня, расположенное навстречу вытекающих из предкамеры горячих газов. В конце сжатия в углубление остается слой воздуха, который принимает на себя тепловой поток от высокотемпературного рабочего тела и служит как тепловая защита для поршня. Форма акро-камеры способствует вихревому движению движения заряда в основной камере и интенсифицирует теплообмен со стенками.

Н.В. Иноземцев (1902-1956), выпускник МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана 1927 г., ставший впоследствии крупным ученым в области тепловых двигателей, лауреатом Сталинской премии, заведующим кафедрой «Термодинамика» и ректором МАИ, модифицировал α -формулу Нуссельта – Брилинга, заменив первый член в скобках для двухтактных быстроходных дизелей на $(1+5+0.185 \cdot c_m)$, а для четырехтактных дизелей с непосредственным впрыскиванием топлива – на $(1+2.2+0.185 \cdot c_m)$ [6]. Огромный авторитет В. Нуссельта, как теплофизика, и Н.Р. Брилинга, как двигателялиста, привело к тому, что предложенную ими структуру α -формулы вплоть до конца 60-их годов прошлого века принимали как догму, меняя в них только коэффициенты в выше указанном члене. В качестве примера можно привести работы как советских исследователей - И.А. Трактовенко (1947 г.), А.Н. Гнездилова (1952), Н.И. Цветкова (1953), Л.М. Белинского (1955), А.Г. Морозова (1957), И.М. Ленина и А.В. Кострова (1963), так и зарубежных Н.W. van Tuyn (1959), A. Stambuleanu (1966).

Заслуги Н.Р. Брилинга в развитии теории теплообмена применительно к тепловым двигателям не ограничиваются введением уточненной α -формулы (2). Он и дальше активно занимался исследованием теплообмена в поршневых двигателях, в частности, исследованием влияния отношения хода поршня к диаметру S/D на тепловую напряженность дизеля. Этот вопрос стал особенно актуальным при создании форсированных дизелей и был затронут Н.Р. Брилингом в 1957 г. [7]. Позже к нему неоднократно возвращались и другие исследователи, используя идею Н.Р. Брилинга о том, что тепловая напряженность поршня соответствует общей отдаче теплоты в стенку камеры сгорания. Количество этой теплоты оценивается так называемой поршневой мощностью $N_{порш} \sim p_e c_m$, где p_e - среднее эффективное давление, $c_m = \frac{Sn}{30}$ - средняя скорость поршня. Очевидно, что короткоходный двигатель обеспечит меньшую отдачу теплоты в стенку, чем двигатель с $S/D=1$. Так как поршневая мощность короткоходного двигателя при частоте вращения $n=idem$ будет меньше, чем у двигателя с $S/D=1$, то это позволяет повысить давление наддува, не опасаясь тепловой напряженности поршня.

Теплообмен в процессе смесеобразования. Теплонапряженное состояние деталей двигателя. Среди фундаментальных исследований из области теплообмена в поршневых двигателях достойное место занимает работа [8] Д.Н. Вырубова (1900-1978)– професс-

сора МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана, основоположника научной школы по смесеобразованию и сгоранию в поршневых двигателях. До выхода этой работы для расчета теплоотдачи сферических капель дизельного топлива обычно использовались результаты Л.Г. Лойцянского и Б. А. Шваба, полученные для нагретых шаров диаметром 70 и 150 мм в турбулентном потоке, и приводившие к значительным расхождениям при их использовании для капель дизельного топлива. В наиболее известных для того зарубежных работах Ulsamer, а также Gumz, для расчета теплоотдачи капель применялись зависимости, полученные для цилиндрических тел. Показав себя прекрасным экспериментатором, Д.Н. Вырубов предложил оригинальный метод исследования теплоотдачи сферических тел. Металлический шар, укрепленный на растяжках, которыми служили провода термомпары со спаем в центре шара, быстро вводился в поток нагретого воздуха, и производились наблюдения повышения его температуры во времени. В виду высокой теплопроводности металла температура всей массы шара принималась одинаковой. Результаты опытов, проведенных с шарами диаметром от 2,4 до 14,8 мм в диапазоне числа Рейнольдса Re от 200 до 3000, позволили Д.Н. Вырубову получить критериальную зависимость

$$Nu = 0,54 Re^{0,5} \quad (3)$$

Эта формула Д. Н. Вырубова и в настоящее время находит широкое применение при расчете теплоотдачи и испарения капель в поршневых и ракетных двигателях. Она используется и в всемирно известных учебниках и монографиях по теории теплообмена и теории горения Мак-Адамса, Д.А. Франк-Каменецкого, С.С. Кутателадзе и других. На основе указанной работы Д.Н. Вырубов написал и в 1940 г. и защитил в МГТУ (тогда МММИ) им. Н.Э. Баумана докторскую диссертацию.

Тенденция развития поршневых двигателей путем их форсирования по мощности и частоте вращения, особенно наметившая после второй мировой войны, сделала еще более актуальной проблемы теплообмена в этих машинах. Уже упомянутая выше работа Н.Р. Брилинга [7] была практически первой, где было дано систематическое исследование проблем тепловой напряженности для форсированных двигателей. Только после этих исследований, в которых особое внимание было уделено влиянию геометрических размеров цилиндра на теплообмен, появились известные работы Г. Вошни, Г.Б. Розенблита, Г. Хохенберга и др., предложивших α -формулы, содержащие диаметр цилиндра. Особенно активно исследования теплового и теплонапряженного состояния поршневых двигателей на кафедре Э2 были развернуты начиная 60-их годов XX столетия благодаря, прежде всего, поддержке заведующего кафедрой проф. А.С. Орлина, а затем его преемника проф. М.Г. Круглова. Докторская диссертация Н.Д. Чайнова, выполненная на кафедре Э2 и защищенная в 1975 г., была посвящена исследованию теплового и напряженного состояния крышки цилиндров и базировалась на последних достижениях в механике твердого деформируемого тела. В частности, задача термоупругости крышки цилиндра впервые была решена с применением теории функций комплексного переменного. Исследования по теплонапряженному состоянию деталей двигателя успешно развивается и сегодня по руководством проф. Н.Д. Чайнова - подготовлено несколько докторов и около трех десятка кандидатов наук, двое из которых доц. А.Н. Краснокутский и доц. Л.Л. Мягков продолжают активную научную работу на кафедре Э2. Несмотря на то, что исследования, проводимые проф. Н.Д. Чайновым и его учениками, относятся в основном к области конструирования, динамики и прочности поршневых двигателей, в них довольно часто затрагиваются и успешно решаются специфичные задачи теплообмена в дизелях. В качестве примера можно привести монографию [9] Н.Д. Чайнова и Н.А. Иващенко совместно с В.Г. Заренбиным, выпускником кафедры Э2, защитившим позже (1995) в МГТУ им. Н.Э. Баумана докторскую диссертацию, посвященную исследованию теплофизических процессов в трибосистемах двигателя. Интересные исследования с применением экспериментальных методов, а также методов физического и математического моделирования теплового состояния деталей двигателя, нашли отражения в кандидатских диссертациях: В.М. Фомина (1973), В.Е. Тимофеева (1976), Ю. И. Сазонова (1977), Р.А. Мгеладзе (1981), С.Ю. Русинковского (1986), А.А. Си-

дорова (1988), П.А. Лошакова (1993), А.В. Каренькова (2006) и др., выполненных под руководством проф. Н.Д. Чайнова.

Ощутимый прогресс, наступивший в области вычислительной техники с начала 70-их годов прошлого столетия, плодотворно подействовал на развитие поршневых двигателей в целом, и на решение проблем теплообмена и теплонапряженного состояния этих машин. Кафедра Э2 МГТУ им. Н. Э. Баумана в СССР была первой, где были развернуты исследовательские работы с широким применением численных методов и математического моделирования в области теплообмена и теплонапряженного состояния. Здесь, прежде всего, следует отметить работы проф. Н.А. Иващенко, впервые применившего метод конечных элементов (МКЭ) для расчета теплового и состояния деталей двигателя [10]. Этот подход был настолько новым и необычным для тогдашних времен, что по настоянию редколлегии журнала термин «конечный элемент» заменили словом «элемент» [10]. В дальнейшем профессором Н.А. Иващенко на базе МКЭ была разработана программа TDN для расчета теплового и напряженно-деформированного состояния деталей, находившая применение практически на всех ведущих заводах и КБ, а также в вузах СССР. Следует подчеркнуть, что это было задолго до появления таких программных продуктов, как COSMOS или ANSYS, широко используемых в двигателестроении в последние годы. Развитие МКЭ применительно поршневым двигателям нашли отражения в докторской диссертации Н.А. Иващенко (1994), а также в монографиях [9, 11] и работах его учеников. Под руководством проф. Н.А. Иващенко были подготовлены и защищены кандидатские диссертации Н.В. Петрухиным по исследованию теплообмена в двигателях с уменьшенным отводом теплоты от рабочего тела (1988), С.М. Пятаевым и М. И. Рамазановым (гидродинамика и теплообмен в системе охлаждения, 1987 и 2002, соответственно), В.И. Колмаковым (интенсификация охлаждения поршней, 1985), Н.А. Горбуновой (компьютерная оптимизация рабочего процесса и теплообмена, 1989), Е.Е. Систейкиной (усовершенствование теплообменных поверхностей охладителей, 1994), Х.Э.С.А.Г. Хассаном (тепловое состояние двигателя при форсировании, 2004), В.Г.Новиковым (экспериментальное исследование теплового состояния деталей, 2004), З.Р. Кавтарадзе (моделирование локальных температур рабочего тела и локальных $[NO_x]$ в камере сгорания, 2006) и др.

Проф. Н.А. Иващенко разработал также численный метод решения обратных задач теплопроводности для деталей двигателя. Метод позволяет определить термические граничные условия для расчета теплового состояния деталей. Он успешно используется также при обработке результатов экспериментальных исследований нестационарного теплообмена (моделирование условий работы датчика, действующего на принципе дополнительной стенки). Ряд работ, выполненных проф. Н.А. Иващенко и сотрудниками, посвящается проблемам повышения эффективности рабочего процесса адиабатного двигателя (совместно с Л.В. Греховым и Н.В. Петрухиным, 1989). В.И. Ивин и Л.В. Грехов исследовали теплообмен при турбулентном течении газа в выпускной системе. Проблемам измерения температуры в нестационарном потоке выпускных газов были посвящены диссертационные работы Л.М. Павлович (1971) и А.Ю. Рыбакова (1977), выполненные под руководством проф. М.Г. Круглова.

Следует особо сказать об исследованиях теплообмена в двигателях с внешним подводом теплоты (двигатели Стирлинга). Под руководством основоположника этой специализации на кафедре Э2 доц. С.И. Ефимова (1932-2002), прекрасного человека и ученого, был выполнен целый ряд интересных работ, однако это тема отдельного разговора.

Результаты исследования теплообмена и теплового состояния деталей, полученные проф. Н.Д. Чайновым и Н.А. Иващенко, а также их учениками, нашли отражение во 2-ом и 3-ем томах известного 4-х томного учебника кафедры, предыдущее (третье) издание которого было удостоено Государственной премией СССР (1974).

Теплообмен в цилиндре двигателя. Проф. М.Г. Круглов (1921-2004), будучи в 1978-1996 г.г. заместителем председателя Госкомитета науки и техники СССР, заместителем Министра и советником Министра науки и технической политики РФ, курировал важ-

нейшие направления развития новых и перспективных технологий в СССР. Исполняя одновременно (1975-1987) обязанности заведующего кафедрой Э2 в МВТУ им. Н.Э. Баумана он активно способствовал расширению исследований в области теплообмена в двигателях. С его инициативой с 1980 г. начались расчетно-теоретические и экспериментальные исследования локального теплообмена в быстроходных двигателях. Это направление нашло дальнейшее развитие в работах проф. Р.З. Кавтарадзе, защитившего в 1991 г. докторскую диссертацию, а также в работах его учеников, среди которых успешно защитили кандидатские диссертации: Д.Ш. Бенидзе (1991), И.Е. Лобанов (1998), Ван Ичунь (1999),



X Школа-Семинар по проблемам теплообмена и газодинамики в энергетических установках под руководством академика А.И. Леонтьева (Химки, 1995). Участники секции «Поршневые двигатели». Слева на право: к.т.н., доц. А.Д. Блинов (ЗМЗ, бывший аспирант МГТУ), к.т.н., доц. А.Н. Краснокутский (МГТУ), академик РАН А.И. Леонтьев, д.т.н., проф. Н.Д. Чайнов (МГТУ), к.т.н., доц. В.Б.Петров (Владимирский университет, бывший аспирант МГТУ), д.т.н., проф. Р.З. Кавтарадзе (МГТУ)

Д.О. Онищенко (2003), А.С. Голосов (2003), А.А. Скрипник (2004), В.А. Федоров (2004). Докторскую диссертацию защитил И.Е. Лобанов (2006). Характерным для работ этой группы является исследование теплообмена в поршневых двигателях с применением современных методов теории двигателей и теплофизики, а также измерительной и вычислительной техники. Проведенные исследования позволили получить ряд оригинальных результатов, отметим некоторых из них:

- По расчетно-теоретической части -

1. Впервые в теории ДВС использован численный метод контрольных объемов (МКО). Разработан вариант МКО для расчета теплового состояния деталей ДВС (М. Г. Круглов, Р. З. Кавтарадзе [12,13]). Получен дискретный аналог дифференциального уравнения энергии в случае произвольной нерегулярной сетки, тем самым показана возможность использования конечно-разностных уравнений при конечно-элементной разбивке расчетной области. Показано, что МКО приводит таким же дискретным аналогам, что и МКЭ, а с точки зрения устойчивости и точности опережает его.
2. Разработана и реализована математическая модель сложного (радиационно- конвективного) теплообмена в цилиндре дизеля, учитывающая течение рабочего тела, как излучающей и поглощающей лучистую энергию турбулентной среды, на поверхностях КС с произвольной кривизны (Р.З. Кавтарадзе [14,15]). В такой постановке задача до этого не решалась, а известные исследования базировались на физически слабо обоснованных допущениях. На западе работы аналогичного характера (Дж. Хейвуд, К.Боухоулос и М.Эберле, К. Штипер и др.) появились значительно позже.

3. Для специфических условий теплообмена в цилиндре дизеля предложены интегральные соотношения (Р.З. Кавтарадзе, [16]), представляющее собой обобщение известных интегральных условий Кармана (для динамического пограничного слоя) и Польгаузена-Кружилина (для теплового пограничного слоя). С использованием модифицированной аналогии Рейнольдса получено дифференциальное уравнение пограничного слоя, решением которого определяется локальный радиационно-конвективный теплообмен на тепловоспринимающих криволинейных поверхностях КС. Обобщенность метода подтверждается тем, что известные из фундаментальной теплофизики задачи С.С.Кутателадзе, А.И.Леонтьева и Э.П.Волчкова; Б.Н.Юдаева; Э.Н.Сабурова и Ю.Л.Леухина, А.Э.Сидорова и др., получаются как частные случаи поставленной и решенной для дизелей задачи пограничного слоя.
4. Разработана многозонная модель для расчета локальных нестационарных температур рабочего тела в объеме цилиндра дизеля, основанная на концепциях МКО (Н.А. Иващенко, Р.З. Кавтарадзе [17,18]). В модели используется многозонное представление объема цилиндра, учитываются процессы впрыскивания, взаимодействия струй топлива и закрученного потока воздуха, распределения по отдельным зонам, испарения и сгорания топлива (А.А. Скрипник [18,19]), а также тепло- и массообмен между отдельными зонами и теплообмен между рабочим телом и поверхностями КС. В такой постановке задача решена впервые. Практическое значение метода обусловлено необходимостью знания локальных нестационарных температур в пространстве КС, как исходных данных при расчете: а) локальных тепловых нагрузок на основные детали двигателя; б) концентрации оксидов азота (А.С. Голосов, З.Р. Кавтарадзе [18]). На базе этих разработок созданы программные продукты КОВ (А.С. Голосов, З.Р. Кавтарадзе) и Fakel (А.А. Скрипник).
5. Предложена формула для расчета нестационарного осредненного по поверхности КС коэффициента теплоотдачи с учетом тепловыделения в цилиндре [20], предложен метод определения эмпирических коэффициентов, входящих в a - формулу (Р.З. Кавтарадзе, В.А. Федоров [21]). Получено выражение коэффициента теплоотдачи в виде комплексного числа (А.И. Гайворонский, В.А. Федоров [22]), позволяющее определить плотность теплового потока на поверхности камеры сгорания с учетом фазового сдвига между тепловым потоком и разности температур газа и стенки. Такой фазовый сдвиг характерен для процессов периодического теплообмена в цилиндрах поршневых машин. Полученное выражение справедливо на протяжении всего рабочего цикла двигателя, включая промежутки времени, когда тепловой поток на поверхности КС меняет свое направление и использование закона теплоотдачи Ньютона теряет физический смысл.
6. Исследовано теплоизолирующее действие слоя нагара в процессе теплообмена в турбулентном пограничном слое с применением обратных методов теплопроводности [23,24,25]. Предложен двухточечный метод определения турбулентного числа Прандтля при радиационно-конвективном теплообмене в камере сгорания. Получены аналитические зависимости для теплового потока, учитывающие влияние радиационного теплообмена на тепловой пограничный слой. Предложена полуэмпирическая зависимость для определения степени черноты рабочего тела в зависимости от нагрузки двигателя [23].
7. Решены задачи расчета теплового состояния деталей, образующих камеру сгорания, в трехмерной постановке с учетом наличия тонких слоев нагара на тепловоспринимающие поверхности с применением экспериментально определенных граничных условий (доц. Д.О. Онищенко [26]). Исследовано влияние конструктивных особенностей, а также физических условий на теплонапряженное состояние деталей.
8. Исследовано влияние интенсивности вихревого движения заряда на тепловое состояние деталей двигателя (Р.З. Кавтарадзе совместно с Г. Вошни, К. Цайлингер,

- К. Штипер и М.Р. Петриченко [27,28,29,30]). Математическое моделирование с применением нелинейных уравнений Навье-Стокса и Фурье-Остроградского позволило изучить технологию адиабатизации пограничного слоя вихревого потока высокотемпературного газа над плоскостью с произвольным распределением тангенциальной скорости по радиусу цилиндра.
- Исследованы особенности рабочего процесса и процесса теплообмена в газодизелях, работающих на различных газообразных топливах, и получены формулы для расчета задержки воспламенения (Р.З. Кавтарадзе совместно К. Цайлингер и Г. Цитцлер[31]). С применением трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса и $k - \epsilon$ модели турбулентности исследовано влияние формы камеры сгорания на процессах сгорания и теплообмена в газовых двигателях с искровым зажиганием, работающих на природном газе (А.И. Гайворонский, В.А. Федоров, А.В. Шибанов [32]).
 - Получены характеристики радиационно-конвективного теплообмена, необходимые для моделирования сложного теплообмена в камере сгорания дизеля (В.А. Федоров [33]).

-По экспериментальной части-

- Сотрудниками кафедры Э2 (проф. Н.А. Иващенко, проф. Р.З. Кавтарадзе, к.т.н. Д.Ш. Бенидзе), совместно сотрудниками института теплофизики АН Украины (проф. Е.А. Максимов) и КамАЗ (д.т.н. В.Н. Никишин), в НТЦ КамАЗ с применением измерительной аппаратуры AVL создана экспериментальная установка и проведены (1985-1987) обширные опытные исследования нестационарного теплообмена в камерах сгорания семейства быстроходных дизелей КамАЗ. Работа проводилась при финансовой поддержке КамАЗ. Ряд полученных результатов нашли отражения в книге [16].
- По хозяйственной работе с НИКТИД (г. Владимир) для испытания двигателей ЗМЗ спроектирован, создан, испытан в МГТУ и передан заказчику (1994-1995) измерительный комплекс с преобразователями и приборами «AVL» и компьютерной обработкой информации, предназначенный для индицирования и исследования внутрицилиндровых процессов (основная часть работы была выполнена В.В. Араповым).
- В лаборатории кафедры Э2 проведены (1997-2000) экспериментальные исследования нестационарных тепловых потоков в камере сгорания дизеля Д-144 (В.В. Арапов, Р.З. Кавтарадзе, Н.А. Лапушкин). Впервые была оценена роль нагароотложения, как теплоизолятора. На основе экспериментальных данных с применением обратных методов теплопроводности разработан метод определения температуры на поверхности слоя нагара (И.Е. Лобанов, Ван Ичунь [23,24,25]), имеющей большое значение для исследования локального теплообмена в дизелях.
- В лаборатории кафедры Э2 были проведены (1996-2001) испытания поршней и головки дизеля Д-144 с теплоизолирующим из керамики (из диоксида циркония) покрытием (В.В. Арапов). Была создана моделирующая установка для исследования нестационарных тепловых потоков на поверхности, покрытой различными теплоизоляторами (В.В. Арапов, Ван Ичунь [24,25]).
- На кафедре Э2 была создана (2002-2004) моделирующая установка для исследования периодического теплообмена в камерах сгорания поршневых двигателей (В.В. Арапов, В.А. Федоров). Была разработана методика компьютерной обработки экспериментальных данных (В.А. Федоров).
- В рамках хозяйственной работы с ООО «ЗМЗ» проведены исследования (2002-2003) по обработке экспериментальных данных, полученных на ЗМЗ, и предложен расчетно- экспериментальный метод для прогнозирования локальных температур и

локальных образований NO_x в камерах сгорания дизелей ЗМЗ-5145.10 и ЗМЗ-5148.10 (Н.А. Иващенко, А.С. Голосов, З.Р. Кавтарадзе, Д.О. Онищенко [18]).

7. Проведено измерение локальных температур на огневом днище поршня дизеля КамАЗ, конвертированного на природный газ (А. И. Гайворонский, В.А. Федоров, А.В. Шибанов). Проведены экспериментальные исследования теплового состояния поршней для двух модификации двигателя ЯМЗ-238 – серийного дизеля и газодизеля, работающего на природном газе (А.И. Гайворонский, В.А. Федоров). Исследования проводились на испытательных стендах ВНИИГАЗ (2005-2006).
8. По контракту с фирмой «Daimler-Benz» в институте двигателей внутреннего сгорания при Мюнхенском Техническом Университете профессором Р.З. Кавтарадзе была (1995) выполнена экспериментальная работа, цель которой - определение локальных нестационарных тепловых потоков в камере сгорания дизеля OM 346 ($S/D=14/12.8$; $P_e=0.9$ МПа; $n=2000$ мин⁻¹) в широком диапазоне изменения интенсивности вихря впускного воздуха. Создан экспериментальный стенд и проведены измерения. Стенд в дальнейшем был использован в Мюнхенском техническом и в Ростокском университетах для продолжения исследования по теплообмену. Результаты исследования были опубликованы как в России, так и в Германии [27,28,29].
9. По контракту с фирмой MAN в институте двигателей внутреннего сгорания при Мюнхенском Техническом Университете проф. Р.З. Кавтарадзе была (1999-2000) выполнена экспериментальная работа, по исследованию внутрицилиндровых процессов на одноцилиндровом отсеке дизеля MAN 24/30, оснащенного системой Common Rail и работающего по газодизельному циклу. Помимо теплового состояния деталей была исследована задержка воспламенения при использовании в качестве топлива природного газа, а также различных синтезгазов. Результаты исследования опубликованы в России и США [31].

Международное сотрудничество. Кафедру «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана связывает тесное сотрудничество с ведущими зарубежными научными центрами, известными своими исследованиями в области теплообмена и теории ДВС - с кафедрой и НИИ двигателей Мюнхенского технического института, кафедрой двигателей и НИИ термодинамики Университета г. Росток, фирмой AVL (Австрия), Высшим мореходным училищем г. Варнемюнде (Германия), техническим университетом им. Отто фон Герике (Магдебург), Дрезденским техническим университетом, техническим университетом г. Ченстохова (Польша), Пекинским технологическим институтом и др. Сотрудники кафедры неоднократно выступали научными докладами по проблемам теплообмена в поршневых двигателях на международных симпозиумах и конференциях. Для чтения курсов лекции и проведения научной работы в различных университетах мира приглашались:

1. Проф. Н.А. Иващенко (лекции проблемам развития поршневых двигателей в Пекинском технологическом институте, 2006);
2. Проф. Н.Д. Чайнов (лекции по проблемам исследования теплонапряженного состояния деталей в Пекинском технологическом институте, 1998, 2002);
3. Проф. Р.З. Кавтарадзе (научная работа и чтение лекции по проблемам локального теплообмена в двигателях: в Мюнхенском техническом университете-1990, 1994, 2000; в университете г. Росток-1986-1987, 1994; Пекинском технологическом институте -1998, 2002).

В МГТУ им. Н.Э. Баумана для чтения коротких курсов лекции по современным проблемам теплообмена в двигателях в разное время приглашались крупные ученые из различных университетов мира. Среди них такие, как заведующий кафедрой Мюнхенского технического университета, проф. Г. Вошни; директор института двигателей при Мюнхенском техническом университете, проф. К. Цайлингер; директор института термодинамики при университете г. Росток, проф. К. Штипер.



Г. Вошни и Р. Кавтарадзе (Мюнхен, 1990)



Директор НИИ ДВС (1984-2004) и заведующий кафедрой ДВС (1999-2004) Мюнхенского технического университета К. Цайлингер выступал с научными докладами и лекциями на юбилейной конференции «Мотор-97» (МГТУ) и на XII Школе-семинаре академика А.И. Леонтьева (2001).

В 1995-2004 г.г. на кафедре Э2 под руководством профессоров Н.А. Иващенко, Н.Д. Чайнова и Р.З. Кавтарадзе проходили научную стажировку преподаватели из Пекинского технологического университета, специализирующиеся в области теплообмена двигателей: Проф. Вей, заведующий кафедрой, проф. Чжан Вей Чжен, доценты, Сун Байган, Ван Ичунь (прошел курс аспирантуры и защитил кандидатскую диссертацию в МГТУ, 1999) и др.

Такой обмен специалистами, безусловно, способствовал развитию и усовершенствованию методов исследования теплообмена в поршневых двигателях.



Стажер из КНР Чжан Гэньюнь и заведующий кафедрой Э2 проф. Н.А. Иващенко (МГТУ, 2003)

Финансирование научных исследований. По проблемам локального теплообмена в поршневых двигателях, а также по смежным проблемам, сотрудниками кафедры велись работы на контрактной основе как с российскими (КамАЗ, ЗМЗ, ВТЗ, ЯМЗ, Коломенский завод и др.), так европейскими (Daimler-Benz, MAN B&W) производителями. За 1992-2004 получены 7 грантов министерства образования и науки РФ по фундаментальным исследованиям в области машиностроения, с 2005 г. ведется работа по гранту РФФИ по исследованию периодического радиационно-конвективного теплообмена в быстроходных дизелях. В области теплообмена в двигателях в три раза (1990,1994, 2000) получена стипендия Немецкой службы академического обмена (DAAD), которая присуждается на конкурсном основе и предусматривает проведения научно-исследовательской работы в университетах Германии. Кроме того, была получена Государственная научная стипендия РФ в области энергетики (2000, 2002). Книга [16] удостоена премии МГТУ им. Н.Э. Баумана за 2002 г.

Публикации. Начиная с 1990 г. по настоящее время сотрудниками кафедры по вопросам теплообмена в двигателях опубликованы около 150 публикаций в периодических изданиях, в том числе 5 монографий и учебников. Среди них: «Исследования процессов газообмена и теплообмена в дизелях методами математического и физического моделирования»(1986), «Экспериментальные методы определения локальных тепловых нагрузок на поверхностях камеры сгорания дизелей» (1995) «Рабочие процессы дизелей» (1995), «Математическое моделирование и исследование процессов в ДВС» (1997), а также [16,17]. Практически все основополагающие работы, выполненные на кафедре Э2 в области теплообмена, опубликованы в периодических изданиях РАН, а также в научной периодике Германии, США, КНР, Чехии и др. В настоящее время в издательстве МГТУ готовится второе издание книги [16], а также книги по специальным главам теории поршневых двигателей.

Подготовка научных кадров. К привлечению молодых кандидатов наук для преподавательской и научной работы сильно мешают не только крайне низкие зарплаты, предусмотренные для работников университетов, но и отсутствие возможности приобретения кафедрой современного оборудования. Российские производители двигателей могли бы внести свой вклад в решении данной проблемы. Тем не менее, подготовке молодых научных работников и преподавателей в области поршневых двигателей в целом, и в области теплообмена в частности, на кафедре «Поршневые двигатели» уделяется особое внимание. Программа подготовки инженеров и магистров на кафедре предусматривает курс лекции «Теплообмен в поршневых двигателях» (34 ч.). Вопросы теплообмена предусмотрены также в программах курсов «Специальные главы теории ДВС» (для инженерной и магистерской подготовки), «Теория рабочих процессов ДВС» (для бакалавров). Практически все упомянутые выше кандидатские диссертации, защищенные в последние годы, начинались со студенческой скамьи. Ряд студентов работают в качестве исполнителей при выполнении различных грантов, активно участвуют научных семинарах и конференциях, проводимых в МГТУ и в других организациях.

Вот уже больше 30 лет аспиранты и студенты кафедры активно участвуют в всемирно известной международной школе-семинаре по проблемам теплообмена и газодинамики в энергетических установках под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Школа-семинар проводится при поддержке РАН и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Следует заметить, что в свое время на этой школе были представлены и прошли апробацию первые научные результаты докторских диссертации ряда сотрудников кафедры Э2 (Ю.А. Гришин, Р.З. Кавтарадзе, С.Р. Березин). Эту школу прошли также практически все аспиранты кафедры Э2, защитившие кандидатские диссертации в области теплообмена в двигателях. Эта хорошая традиция продолжается и сейчас. На XVI школе-семинаре (май 2007, Санкт-Петербург) интересные доклады представили студенты V курса кафедры Э2 А.А. Зеленцов и С.С. Сергеев, получившие за активную научную работу стипендии ученого совета МГТУ и РАО ЭС.

Заинтересованность студентов, магистрантов, аспирантов и молодых преподавателей вопросами теплообмена в двигателях вселяет надежду, что это традиционное и одновременно актуальное направление науки о двигателях в стенах МГТУ им. Н.Э. Баумана будет и дальше успешно развиваться.

Литература

1. Diesel R. Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors zum Ersatz der Dampfmaschine und der heute bekanten Wärmemotoren.-Berlin, Springer-Verlag, 1893.-96 S.
2. Гриневецкий В. И. Тепловой расчет рабочего процесса. Дополнение редактора перевода к книге Г. Гюльднера «Газовые, нефтяные и прочие двигатели внутреннего сгорания», Москва, типо - литография «И.Н. Кушнерев и К⁰», 1907. С. 569-594.
3. Nusselt W. Der Wärmeübergang in der Verbrennungskraftmaschinen//VDI –Forschungsheft, №264.-1923.- S.47-54.
4. Брилинг Н.Р. Исследование рабочего процесса и теплопередачи в двигателе дизель. Государственное научно-техническое издательство. Москва, Ленинград. 1931. 320 с.
5. Либрович Б.Г., Брызгов Н.Н. Исследование предкамерного двигателя. -Москва. -ОНТИ, 1937.-198 с.
6. Иноземцев Н.В. Исследование и расчет рабочего процесса авиационного дизеля.- Москва: Оборонгиз.1941.-106 с.
7. Брилинг Н.Р. Теория короткоходного дизеля//Труды лаборатории двигателей АН СССР. Вып. 3, 1957.
8. Д.Н. Вырубов. Теплоотдача и испарение капель. Журнал технической физики. Том IX, вып. 21. -1939. С. 1923-1931.
9. Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А. Заренбин В.Г. Тепломеханическая напряженность деталей двигателей. М.: Машиностроение, 1977.-152 с.
10. Мизернюк Г.Н., Иващенко Н.А. Определение стационарных температурных полей в деталях двигателей внутреннего сгорания методом элемента. Известия вузов. Машиностроение, №6.-1973. С.112-116.
11. Шелков С.М., Мирошников В.В., Иващенко Н.А., Хак Д.Л. Оптимизация конструкции теплонапряженных деталей дизелей. М.: Машиностроение, 1983.-112 с.
12. Kawtaradse R.S. Zur Berechnung der Temperaturfelder für Bauteile des Dieselmotors//Schiffbauforschung.-1988. №1. S. 63-66.
13. Круглов М.Г., Кавтарадзе Р.З. Краевые задачи теплопроводности для транспортных энергетических установок и их решение численным методом// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. -1989.-№5.-С.149-157.
14. Kawtaradse R.S. Mathematisches Modell des komplexen Wärmeaustausches-Konvektion und Strahlung-im Brennraum des Dieselmotors//Technische Mechanik-1989.-В.10.-Heft 3.-S. 175-177.
15. Кавтарадзе Р.З. Решение задач конвективного и сложного теплообмена в камере сгорания дизеля с учетом пристенного турбулентного течения// АН СССР. Теплофизика высоких температур.-1990. –Т. 28.-№5. С.969-977. (Переиздано в США: R. Z. Kavtaradze. Solution of Problems of Convective and Complex Heat Transfer in a Diesel Combustion Chamber, Taking Account of Near-Wall Turbulent Flow//High Temperature.-New York, London.- March,1991. P.740-748)
16. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.-592-с.
17. Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З. Многозонные модели рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.-58 с.
18. Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З., Голосов А.С., Кавтарадзе З.Р., Скрипник А.А. Метод расчета локальных концентраций оксидов азота в поршневых двигателях с внутренним смеобразованием на основе многозонной модели. Известия МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». № 1. 2004. С. 43-59.

19. Скрипник А.А., Фролов С.М., Кавтарадзе Р.З., Эфрос В.В. Моделирование воспламенения в струе жидкого топлива// РАН. Химическая физика. №1, том 23. 2004. С. 54-61.
20. Кавтарадзе Р.З. Об определении нестационарного теплового потока в цилиндре поршневых машин//Сообщения АН Грузии.-Тбилиси:-1982. Т.106-№3.-С.565-568.
21. Кавтарадзе Р.З., Федоров В.А. Уточненная зависимость для расчета коэффициента нестационарной теплоотдачи с учетом тепловыделения камеры сгорания поршневого двигателя//Труды четвертой Российской национальной конференция по теплообмену. Том 3. Москва, Издательский дом МЭИ. 2006. С. 243-245.
22. Кавтарадзе Р.З., Гайворонский А.И., Федоров В.А. Влияние переменной плотности на распределение температур при периодических процессах в замкнутых полостях//Труды XIV школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. 26-30 мая 2003 г., Рыбинск. Том 2. Изд-во МЭИ, 2003. – С. 74-77.
23. Кавтарадзе Р.З., Лобанов И.Е. К вопросу расчета пограничного слоя и турбулентного числа Прандтля при радиационно-конвективном теплообмене //Известия РАН. Энергетика, №1, 1999.-С.172-176. (Переиздано в США: Kavtaradze R.Z., Lobanov I.E. The Question of Calculating the Boundary Layer and Turbulent Prandtl Number for Combined Radiative and Convective Heat Exchange//Applied Energy. Allerton Press, New York. Vol.37, N1. 1999. pp.162-167).
24. Kavtaradze R.Z., Lapushkin N. A., Arapov V.V., Wang Yichun. Effect of the In-cylinder Carbon Deposit and Inlet Swirl Intensity on the Lokal TransientHeat Transfer//Chinese Internal Combustion Engine Engineering. Vol.19, N 4. 1998.-pp.41-45 (На китайском языке, резюме на английском).
25. Кавтарадзе Р.З., Ван Ичунь. Локальный теплообмен в теплоизолирующей камере сгорания быстроходного дизеля. Известия РАН. Энергетика, № 4, 2001. – С. 149-158.
26. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Голосов А.С. Анализ трехмерного состояния поршня двигателя с применением экспериментальных граничных условий//Труды третьей Российской национальной конференции по теплообмену. Том 7. Изд-во МЭИ. М.; 2002.–С. 135-138.
27. Woschni G., Kawtaradse R.S., Zelinger K. Dralluntersuchung im Vierventil-Dieselmotor mit Hilfe stationärer Durchströmung. LVK TU-München, 1995.-49 S.
28. Вошни Г., Цайлингер К., Кавтарадзе Р.З. Вихревое движение воздуха в быстроходном дизеле с четырьмя клапанами на цилиндр// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение», №1, 1997. С.74-84.
29. Stieper K., Polej A. Brennraumseitige örtliche thermische Randbedingungen für Verbrennungsmotoren// MTZ. №7-8, 1998. S.500-505.
30. Петриченко М.Р., Валишвили Н.В., Кавтарадзе Р.З. Пограничный слой в вихревом потоке на неподвижной плоскости// РАН. Сибирское отделение. Теплофизика и аэромеханика. Том 9, № 3, 2002. –С. 411-421. (Переиздано в США: Petrichenko M.R., Valishvili N.V., Kavtaradze R.Z. Boundary layer in a vortex flow over the stationary plane. Thermophysics and Aeromechanics. Vol. 9, N 3. 2002. – pp. 391- 401).
31. Кавтарадзе Р.З., Цайлингер К., Цитцлер Г. Задержка воспламенения в дизеле при использовании различных топлив//РАН. Теплофизика высоких температур, том 43, №6, 2005. С. 947-965. (Переиздано в США: Kavtaradze R.Z., Zeilinger R., Zitzler G. Ignition Delay in a Diesel Engine Utilizing Differenz Fuels. High Temperature. Vol. 43. N6, 2005.-P.951-960).
32. Кавтарадзе Р.З., Гайворонский А.И., Шибанов А.В., Онищенко Д.О., Федоров В.А. Численный анализ влияния формы камеры сгорания на турбулентное движение и сгорание газа в цилиндре дизеля//Труды четвертой Российской национальной конференция по теплообмену. Том 3. Москва, Издательский дом МЭИ. 2006. С. 246-249.
33. Кавтарадзе Р.З., Гайворонский А. И., Федоров В.А., Онищенко Д.О., Шибанов А.В. Расчет радиационно-конвективного теплообмена в камере сгорания дизеля//РАН. Теплофизика высоких температур. Т.45, №4, 2007. (Переиздано в США: Calculation of Radiation-Convectional Heat Transfers in the Chamber of Combustion of a Diesel Engine// High Temperature. Vol. 45, N4, 2007).