

2. Изопериметрические неравенства. Пусть S , V и N обозначают соответственно площадь поверхности, объем и число всех капель. Рассмотрим так называемый параметр формы

$$p = \frac{S^3}{36pV^2},$$

при помощи которого формулируется классическое изопериметрическое неравенство $p \geq 1$.

Оказывается, что геометрия капель подчиняется еще одному изопериметрическому неравенству $p \leq N$, которое можно рассматривать как аналог классического. Для любой совокупности капель получаем двойное неравенство $1 \leq p \leq N$. Вводя новый параметр $q = \frac{p}{N}$, переписываем двойное неравенство в виде: $0 < q \leq 1$. Равенство $q = 1$ имеет место тогда, и только тогда, когда все капли имеют одинаковый размер. Чем больше отличаются капли друг от друга по размеру, тем больше удалено q от единицы. Таким образом, параметр q является критерием однородности или равномерности распыливания жидкости на капли. Иногда однородную и неоднородную совокупности капель называют также монодисперсной и полидисперсной. Заметим, что для осколков, форма которых отлична от шаровой, неравенство $p \leq N$ не имеет места.

В заключение приведем расчетное значение параметра q для рассмотренной выше функции $f(R)$:

$$q = \frac{16}{9p} = 0,5658842421... < 1.$$

Литература.

1. Антонюк П.Н. Распределение по размерам капель распыливаемой жидкости // Сб. науч. тр. по материалам Межд. конф. Двигатель-2007, посвящ. 100-летию школы двигателестроения.– М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. – С. 135-139.
2. Антонюк П.Н. Фракталы в геометрии природы // Институт истории естествознания и техники им. С.И.Вавилова. Годичная научная конференция, 2009.– М.: Анонс Медиа, 2009.– С. 247-250.

ТЕПЛООБМЕН В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ - НАУЧНАЯ ШКОЛА МГТУ им. Н.Э.БАУМАНА

Кавтарадзе Р.З. (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

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» (Э2) МГТУ им. Н.Э. Баумана и в настоящее время является ведущей в этой актуальной и быстро развивающейся области науки. В.И. Гриневецкий в 1907 г. (!) 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 приходится решать до сих пор ошупью» [1].

Вопросы теплообмена в поршневых двигателях «в чистом виде» впервые начал изучать В. Нуссельт (1882-1957) – один из крупнейших теплофизиков прошлого столетия, создатель теории подобия в теплопередаче. 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. Исследования Н. Р. Брилинга нашли развитие в работах других выдающихся представителей научной школы МГТУ - Н. Н. Брызгова и Н.В. Иноземцева. Из данного направления необходимо отметить также работы как советских исследователей - И.А. Трактовенко (1947 г.), А.Н. Гнездилова (1952), Н.И. Цветкова (1953), Л.М. Белинкого (1955), А.Г. Морозова (1957), И.М. Ленина и А.В. Кострова (1963), так и зарубежных Н.В. van Tyen (1959), А. Stambuleanu (1966) и др.

Среди фундаментальных исследований из области теплообмена в поршневых двигателях достойное место занимает работа [2] Д.Н. Вырубова (1900-1978) – профессора МГТУ (МВТУ) им. Н.Э. Баумана, основоположника научной школы по смесеобразованию и сгоранию в поршневых двигателях, предложившего оригинальный метод исследования теплоотдачи сферических тел.

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. Это способствовало появлению известных работ В. Аннанда, В. Пфлаума, Г. Вошни, Г.Б. Розенблита, Г. Хохенберга, А.К. Коостина, Р.М. Петриченко и М.Р. Петриченко и др., предложивших α -формулы и методы расчета теплоотдачи в цилиндре двигателя.

Особенно активно исследования теплового и теплонапряженного состояния поршневых двигателей на кафедре Э2 были развернуты начиная 60-их годов XX столетия под руководством заведующего кафедрой проф. А.С. Орлина, а затем его преемника проф. М.Г. Круглова. Здесь следует отметить работы проф. Н.Д. Чайнова, посвященные исследованию теплового и напряженного состояния деталей двигателя, в которых задачи термоупругости впервые были решены с применением теории функций комплексного переменного.

В настоящее время в области термopочности и динамики двигателей активно работают доц. А.Н. Краснокутский и доц. Л.Л. Мягков. 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. Ряд работ, выполненных проф. Н.А. Иващенко и сотрудниками, посвящается проблемам повышения эффективности рабочего процесса адиабатного двигателя (совместно с проф. Л.В. Греховым и к.т.н. Н.В. Петрухиным, 1989). Доц.

В.И. Ивин и проф. Л.В. Грехов исследовали теплообмен при турбулентном течении газа в выпускной системе. Проблемам измерения температуры в нестационарном потоке выпускных газов были посвящены работы Л.М. Павлович (1971) и А.Ю. Рыбакова (1977), выполненные под руководством проф. М.Г. Круглова. По инициативе проф. М.Г. Круглова с 1980 г. начались расчетно-теоретические и экспериментальные исследования локального теплообмена и связанных с ним вопросов теории рабочих процессов.

Это направление нашло дальнейшее развитие в работах аспирантов и сотрудников кафедры Э2, среди которых успешно защитили кандидатские диссертации: Д.Ш. Бенидзе (1991), И.Е. Лобанов (1998), Ван Ичунь (1999), Д.О. Онищенко (2003), А.С. Голосов (2003), Н.А. Лапушкин (1995), А.А. Скрипник (2004), В.А. Федоров (2004), З.Р. Кавтарадзе (2006), А.В. Шибанов (2007). Докторскую диссертацию защитил И.Е. Лобанов (2006). Успешно работают над завершением диссертационной работы молодые сотрудники кафедры А.А. Зеленцов, С.С. Сергеев и др. 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:

-По расчетно-теоретической части-

1. Впервые в теории ДВС в начале 1980-х годов использован численный метод контрольных объемов (МКО), получивший в настоящее время широкое развитие.

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 [3]. 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 [3], представляющее собой обобщение известных интегральных условий Кармана (для динамического пограничного слоя) и Польшгаузена-Кружилина (для теплового пограничного слоя).

4. Разработана многозонная модель для расчета локальных нестационарных температур рабочего тела в объеме цилиндра дизеля, основанная на концепциях МКО [3,4].

5. Предложена зависимость для расчета нестационарного осредненного по поверхности КС коэффициента теплоотдачи с учетом тепловыделения в цилиндре [3] и получено выражение коэффициента теплоотдачи в виде комплексного числа [3], позволяющее определить плотность теплового потока на поверхности камеры сгорания с учетом фазового сдвига между тепловым потоком и разности температур газа и стенки.

6. Исследовано теплоизолирующее действие слоя нагара в процессе теплообмена в турбулентном пограничном слое с применением обратных методов теплопроводности [3].

7. 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].

8. 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 [3].

9. Исследовано влияние интенсивности вихревого движения заряда на тепловое состояние деталей двигателя (совместно с Г. Вошни, К. Цайлингер, К. Штипер и М.Р. Петриченко [3,5,6]).

10. Исследованы особенности рабочего процесса и процесса теплообмена в газодизелях, работающих на различных газообразных топливах, и получены формулы для расчета задержки воспламенения [6,7].

11. Проведены исследования с применением трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса и $k-\epsilon$ модели турбулентности исследовано влияние формы камеры сгорания на процессах сгорания и теплообмена в газовых и двухтопливных двигателях [6].

12. Проведены исследования термических граничных условий в камере сгорания авиационных поршневых двигателей (совместно сотрудниками ЦИАМ) [8].

-По экспериментальной части-

1. Совместно с институтом теплофизики АН Украины и КамАЗ 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 [3].

2. По контракту с НИКТИД 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.

3. Проведены (1997-2000) экспериментальные исследования нестационарных тепловых потоков в камере сгорания дизеля Д-144. Впервые была исследована роль нагароотложения, как теплоизолятора. С применением обратных методов теплопроводности разработан метод определения температуры на поверхности слоя нагара [3].

4. Были проведены (1996-2001) испытания поршней и головки дизеля Д-144 с теплоизолирующим (керамическим) покрытием и была создана моделирующая установка для исследования нестационарных тепловых потоков на поверхности, покрытой различными теплоизоляторами [3].

5. Была создана (2002-2004) моделирующая установка для исследования периодического теплообмена в камерах сгорания поршневых двигателей.

6. В рамках контракта с ООО «ЗМЗ» проведены исследования (2002-2003) по прогнозированию локальных температур и локальных образований NO_x в камерах сгорания дизелей ЗМЗ-5145.10 и ЗМЗ-5148.10.

7. Совместно с ВНИИГАЗ проведены измерения локальных температур поршней и головок цилиндра дизелей КамАЗ и ЯМЗ, конвертированных на природный газ (2005-2008).

8. По контракту с фирмой «Daimler-Benz» в институте двигателей внутреннего сгорания при Мюнхенском Техническом Университете была (1995) выполнена экспериментальная работа «Исследование локальных нестационарных тепловых потоков в камере сгорания дизеля OM 346 (S/D=14/12.8; $Pe=0.9$ МПа; $n=2000$ мин⁻¹) в широком диапазоне изменения интенсивности вихря впускного воздуха» [5].

9. По контракту с фирмой MAN в институте двигателей внутреннего сгорания при Мюнхенском Техническом Университете была (1999-2000) выполнена экспериментальная работа по исследованию рабочего процесса, локального теплообмена и задержки воспламенения (дизель MAN 24/30) при использовании в качестве топлива природного газа, различных синтезгазов и водорода [7].

Начиная с 1990 г. по настоящее время сотрудниками кафедры по вопросам теплообмена и связанным в двигателях опубликованы около 200 публикаций в периодических изданиях, в том числе 7 монографий и учебников. Ряд из них опубликованы в США, Германии, Великобритании, Чехии, КНР.

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

Литература:

1. 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.

2. Д.Н. Вырубов. Теплоотдача и испарение капель. Журнал технической физики. Том IX, вып. 21. -1939. С. 1923-1931.

3. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях (2-ое издание). М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007.-472 с.

4. Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З. Многозонные модели рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.-58 с.

5. 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.

6. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.-720 с.

7. 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.

8. Кавтарадзе Р.З., Зеленцов А.А., Кавтарадзе З.Р., Никитин Ю.Н., Финкельберг Л.А. Моделирование локального нестационарного теплообмена в камере сгорания и теплоснапряженного состояния поршня авиационного двигателя. Известия РАН. Энергетика. №2, 2010. – С. 133-151.

9. Кавтарадзе Р.З., Ван Ичунь. Локальный теплообмен в теплоизолирующей камере сгорания быстроходного дизеля// Известия РАН. Энергетика, № 4, 2001. – С. 149-158.

КОНВЕРТИРОВАНИЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО

Климова Е.В., Краснов В.М. (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

Введение

Анализируя современную топливно-энергетическую и экологическую обстановку в мире и прогнозируя ее развитие на ближайшие несколько десятков лет нужно отметить, что нашей стране необходимо развивать ветвь альтернативных