

На правах рукописи

Яксон Ирина Александровна

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ЦИЛИНДРЕ ПОРШНЕВОГО
ДВИГАТЕЛЯ С ОТКРЫТОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ

Специальность 05.04.02 – "Тепловые двигатели"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2003

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», на кафедре двигателей внутреннего сгорания.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Шабанов Александр Юрьевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Овсянников Михаил Константинович
кандидат технических наук,
доцент Нестеренко Игорь Федорович

Ведущая организация - ГУП «ЦНИДИ»

Защита состоится « 18 » ноября 2003 г. в 17 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.09 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, Главное здание, ауд 130.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ «СПбГПУ».

Автореферат разослан «10» октября 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
Доктор технических наук, доцент

Хрусталёв Б.С.

Общая характеристика работы

Актуальность диссертации

При проектировании и доводке современных двигателей необходимо проведение качественных и всесторонних оценок надежности и работоспособности всех систем и деталей двигателя. Работа этих деталей протекает в условиях высоких температур и химически активной среды при одновременном действии циклически меняющихся тепловых и механических напряжений. Одним из основных факторов, влияющим на эксплуатационные характеристики двигателя является его тепловое состояние.

Проблема надежности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в большой степени связана с теплонапряженностью его основных деталей. Большая часть используемых в настоящее время методик моделирования теплового состояния деталей ДВС базируется на эмпирических и полуэмпирических соотношениях и не обеспечивает в общем случае достаточной точности результатов. Существующие общенаучные пакеты для моделирования гидродинамики и теплообмена базируются на полном моделировании гидродинамических и тепловых процессов, что приводит к неоправданно большим временным затратам на подготовку модели и проведение расчета. Кроме того, эти пакеты не в полной мере учитывают специфику протекания рабочих процессов в камере сгорания реального поршневого двигателя. В связи с этим одной из актуальных проблем двигателестроения является создание инженерных расчетно-теоретических методов исследования локального теплообмена в ДВС, сочетающего достаточную точность решения с ограниченными требованиями к временным и вычислительным ресурсам.

Цель работы

Целью работы является создание и проверка уточненной методики расчета локального теплообмена в камере сгорания ДВС, пригодной для проведения

инженерных расчетов на стадии проектирования и доводки ДВС различных типов.

Задачи исследования

В соответствии с целью работы были поставлены следующие задачи исследования:

1. Обосновать, разработать и программно реализовать методику численного определения полей мгновенных скоростей обтекания рабочим телом камеры сгорания в трехмерной постановке;
2. Обосновать и разработать математическую модель расчета мгновенных и средних за цикл локальных значений интенсивностей конвективного теплообмена в камере сгорания поршневого двигателя;
3. Провести проверку достоверности разработанных математических моделей на основании анализа результатов проведенного расчетно-экспериментального исследования теплового состояния головки цилиндров бензинового двигателя.
4. Провести численное исследование процессов газодинамики и теплообмена в поршневых двигателях различного типа с целью выяснения особенностей теплового нагружения теплонапряженных деталей и влияния конструктивных особенностей ДВС на величины и распределения тепловых потоков в камере сгорания.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в получении новых данных о движении рабочего тела в цилиндре поршневых ДВС различного типа, получении новых данных о мгновенном распределении локальных коэффициентов теплоотдачи по поверхности камеры сгорания, разработке новой методики численного исследования процессов локального теплообмена в камере сгорания поршневого ДВС.

Практическая ценность

Практическая ценность работы заключается в разработке инженерной методики численного исследования локального теплообмена в цилиндре поршневого ДВС, пригодной для использования на стадии проектирования и доводки двигателя.

Достоверность

Достоверность научных положений и выводов определяется применением общих систем уравнений гидродинамики и фундаментальных законов тепломассообмена, современных численных методов реализации математических моделей, анализом обоснованности теоретических допущений и связанных с этим погрешностей расчета, а также удовлетворительным качественным и количественным согласованием расчетных и экспериментальных данных.

Практическая реализация

Результаты работы были использованы при проведении научно-исследовательских работ на кафедре ДВС СПбГПУ по заказам предприятий отрасли, а также применяются в учебном процессе по специальности «Двигатели внутреннего сгорания».

Апробация работы

Результаты исследований, составляющих основу работы, докладывались на научных семинарах кафедры ДВС СПбГТУ 2000-2003 г.г., XXIX (2001 г.) и XXX Юбилейной (2002 г.) Неделях науки СПбГТУ.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 4 печатных работы.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 83 наименований. Она содержит 141 страницы, в том числе: 107 страниц основного текста, 29 рисунков, 8 таблиц, 1 фотоснимок.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность проблемы создания эффективных, экспериментально обоснованных расчетно-теоретических методов исследования теплового состояния теплонапряженных деталей ДВС. Приведена общая характеристика работы.

В **первой главе** анализируется современный уровень развития теоретических и экспериментальных методов исследования гидродинамики и локального теплообмена в ДВС. Отмечено, что наибольший вклад в развитие вопросов, связанных с исследованиями процессов теплообмена в ДВС внесли Костин А.К., Кавтарадзе Р.З., Овсянников М.К., Петриченко Р.М., Петриченко М.Р., Розенблит Г.Б., Страдомский М.В., Чайнов Н.Д., Шеховцов А.Ф., Вошни Г, Хейвуд Дж. и их сотрудники.

Рассмотрены существующие в настоящее время подходы к расчету интенсивности теплоотдачи и сделан вывод, что большинство из них имеют ограниченную область применения и не дают полной картины распределения параметров теплообмена по поверхностям камеры сгорания. В первую очередь это связано с решением задачи о движении рабочего тела в камере сгорания производится в упрощенной двумерной постановке, что неприменимо случае камер сгорания сложной формы.

Для расчета конвективной теплоотдачи в большинстве случаев используются эмпирические или полуэмпирические формулы, что также не позволяет получить в общем случае необходимую точность решения.

Полное решение задачи описания трехмерных, нестационарных, турбулентных и в общем случае многофазных внутрицилиндровых процессов в

ДВС достаточно сложно. Существующие общенаучные пакеты для моделирования гидродинамики и теплообмена требуют неоправданно большим временных затрат на подготовку модели и проведение расчета и не в полной мере учитывают специфику процессов в реальном поршневом двигателе.

Решение задачи в упрощенной постановке может приводить к существенным потерям точности решения. Для обоснования допустимых пределов погрешности определения граничных условий было проведено предварительное расчетное исследование, в ходе которого определялось изменение распределения температур в теле детали при различных погрешностях задания значения коэффициента теплоотдачи для поршней различных конструкций. Было определено, что при задании граничных условий теплообмена с точностью до 5% гарантируется точность определения поля температур в пределах погрешности экспериментального исследования. При этом определение поля скоростей может быть проведено с точностью до 7–10%. Это позволяет использовать для решения гидродинамической задачи упрощенные подходы, сочетающие приемлемую точность результатов с ограниченными затратами на выполнение расчета.

На основании проведенного анализа литературы и сделанных оценок были сформулированы цели и задачи настоящей работы.

Вторая глава посвящена разработке математической модели движения рабочего тела в камере сгорания поршневого ДВС.

В результате обзора исследований локального теплообмена в ДВС и теплового состояния деталей двигателя были сделаны оценки и принят ряд допущений, упрощающих постановку и решение гидродинамической задачи с учетом результатов предварительной оценки необходимой точности решения.

Моделирование поля скоростей в камере сгорания двигателя производилось на основе полной системы уравнений Эйлера, модифицированной с учетом сделанных допущений:

$$\begin{aligned} \nabla \vec{V} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} \\ (\vec{V} \nabla) \vec{V} &= -\frac{1}{\rho} \nabla p \end{aligned} \quad (1)$$

где \vec{V} – вектор скоростей в ядре потока, ρ , P – соответственно плотность и давление рабочего тела.

В качестве граничных условий использовались условия непроницаемости на твердых поверхностях и среднерасходные скорости течения газа в клапанных щелях.

Так как давление рабочего тела в полученной модели определяется с точностью до постоянной, задавалось также равновесное давление в цилиндре в данный момент времени.

Численное решение полученной системы уравнений проводилось методом конечных элементов, являющимся консервативным и абсолютно устойчивым.

Были рассмотрены различные подходы к построению системы уравнений метода конечных элементов для задач гидродинамики.

1. Задача сводится к решению дифференциального уравнения для потенциала скорости. Уравнение для потенциала может быть получено преобразованием уравнения баланса массы системы. Расчет значений потенциальной функции в узлах модели строится на базе решения системы линейных алгебраических уравнений, полученной конечно-элементным преобразованием соответствующего вариационного функционала.
2. Прямое решение системы уравнений Эйлера в переменных «скорость-давление». Применяя по методу Галеркина ортогонализацию невязки к базисным функциям, формулу Грина и учитывая граничные условия исходная система уравнений (1) может быть приведена к матричному виду:

Обозначив через X вектор искомых величин (U^l, V^l, W^l, p^m) , система может быть записана в матричном виде:

$$KX = F,$$

где X – вектор искомых величин (U^l, V^l, W^l, p^m), K – разрешающая матрица системы уравнений МКЭ, F – вектор гидродинамических сил.

Сравнение полей скоростей в цилиндре нижнеклапанного двигателя ДМ-1, рассчитанных по обеим постановкам показало, что решение, полученное в переменных «скорость-давление» оказывается более гладким. На элементах существенно вытянутой формы решение в переменных «скорость – давление» оказывается более устойчивым. Исходя из сделанного сопоставления, для проведения расчетного исследования была выбрана модель, базирующаяся на решении квазистационарной системы уравнений Эйлера для несжимаемой жидкости в переменных «скорость - давление».

В приближении квазистационарного течения решение гидродинамической задачи производилось на основе полностью трехмерной конечно-элементной модели пошагово для каждого угла поворота коленчатого вала.

На рис. 1 приведены результирующие поля скоростей движения рабочего тела в цилиндре бензинового двигателя МеМЗ-245 с клиновидной камерой сгорания. По результатам расчетов была выявлена сложная, существенно трехмерная неосесимметричная структура течения, изменяющаяся во времени. Наблюдается формирование и разрушение циркуляционных течений и застойных зон в процессе сгорания, расширения и сжатия рабочего тела в цилиндре.

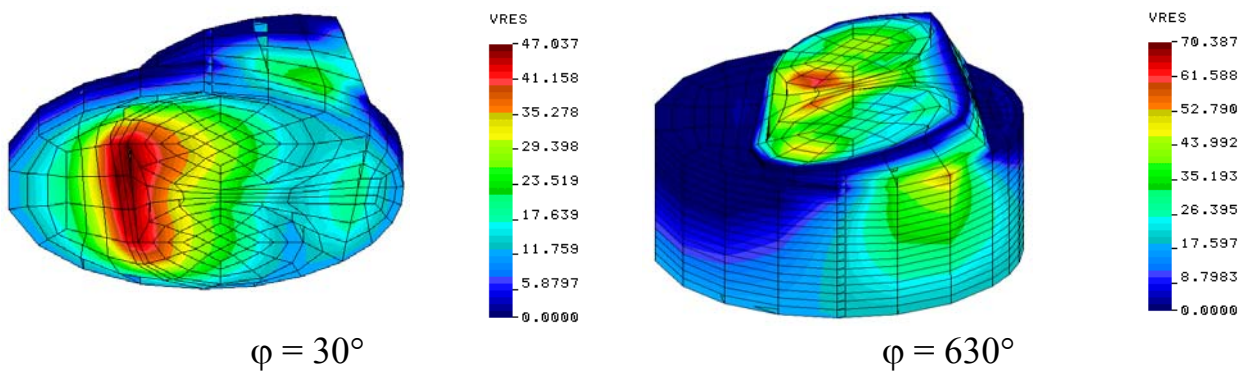


Рис. 1

На рис. 2 приведены поля скоростей для дизельного двигателя 12ЧН 18/20 с камерой сгорания типа Гессельман. В модели учитывается наличие в поршне углублений под клапана, делающих камеру сгорания не осесимметричной и оказывающих влияние на пространственную структуру течения. Наблюдаются такие особенности течения как ускорение потока в клапанной щели при открытых клапанах, а также неосесимметричность течения, вызванная сложной формой поверхности поршня.

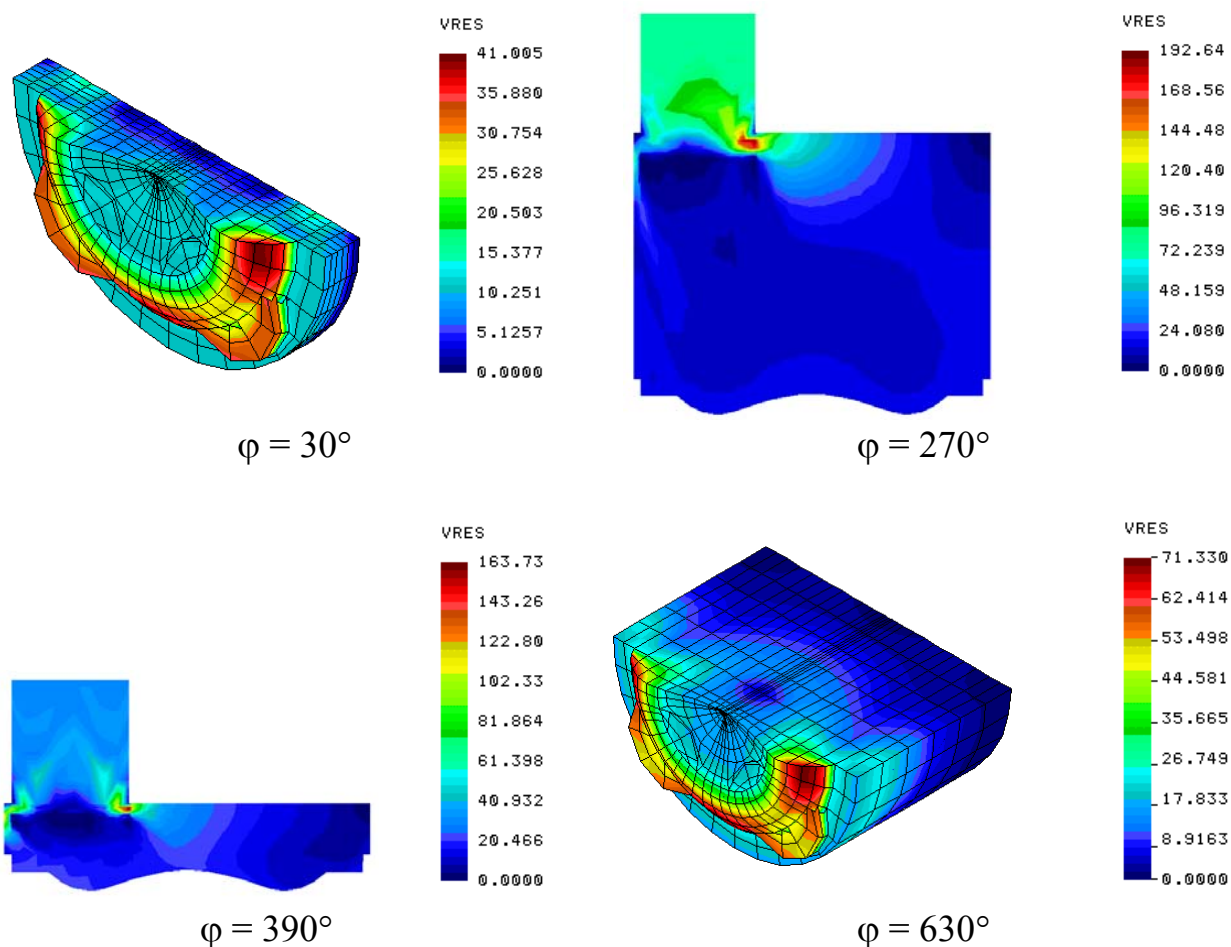


Рис. 2

Было проведено численное исследование влияния конструктивных особенностей камер сгорания двигателей различных типов на картину движения рабочего тела в них, позволившее выявить особенности структуры потоков и ее зависимость от варьировавшихся параметров (формы и размеров камеры сгорания, наличия и формы вытеснителей и т.д.).

Третья глава посвящена разработке математической модели локального конвективного теплообмена в камере сгорания ДВС.

Для определения мгновенных полей интенсивности теплоотдачи необходимо знание локальных мгновенных значений скоростей рабочего тела у огневой поверхности камеры сгорания двигателя и поля локальных температур рабочего тела.

С целью учета теплового расслоения заряда в камере сгорания бензинового двигателя в настоящей работе для определения положения границы зоны горения в камере сгорания бензинового двигателя был использован метод, разработанный Р.М.Петриченко, основанный на обработке индикаторной диаграммы. Было выяснено, что повышение точности расчета по сравнению с моделями, не учитывающими стратификацию заряда, является незначительным (1 – 2 %), и в пределах заявленной точности неоправданно из соображений ресурсоемкости расчетов.

В основу методики определения термодинамических параметров топливовоздушной смеси в камере сгорания бензинового двигателя легли результаты, полученные в работах А.С.Лоскутова.

Для определения термодинамических параметров рабочего тела в камере сгорания дизельного двигателя использовалась методика синтеза индикаторных диаграмм дизельных двигателей, разработанная на кафедре ДВС СПбГТУ.

Определение локальных параметров теплообмена производилось с использованием точного решения, полученного Е. Эккертом для локального значения числа Нуссельта при движении газа в ламинарном пограничном слое при постоянной температуре стенки, устанавливающему связь местной интенсивности теплоотдачи с гидродинамическим режимом течения окружающего потока.

Определение точек присоединения проводилось на основе анализа скоростного поля вблизи исследуемой стенки. По известным градиентам

скоростей строились изопотенциали потока и определялись условные трубки тока, по которым отсчитывалась криволинейная координата. Анализ структуры потока проводился с использованием стандартных процедур МКЭ.

Быть получено выражение для определения мгновенного локального значения коэффициента конвективной теплоотдачи для произвольной точки поверхности КС:

$$\alpha_x = \Phi(m, Pr) \frac{\lambda_t}{X} \sqrt{\frac{U_x X}{\nu}} \cdot k_\alpha,$$

где $\Phi(m, Pr)$ – функция, зависящая от показателя градиентности потока m и числа Прандтля рабочего тела Pr , λ_t – коэффициент теплопроводности рабочего тела, X – текущая криволинейная координата, U_x – текущая касательная скорость, k_α – коэффициент, учитывающий реальный процесс выгорания топлива, введенный для учета турбулизации пограничного слоя в процессе сгорания.

$$k_\alpha = k_0 + k(x),$$

где $k_0 = 1.5 \dots 2.5$.

$$k(x) = \frac{x(\varphi)}{x(0)} - 1, \varphi > 0,$$

где $x(\varphi)$ – удельная доля выгоревшего топлива.

Теплофизические параметры газа в каждый момент времени принимались переменными в зависимости от текущих значений температуры и давления в камере сгорания.

На рис. 3 приведены графики изменения коэффициента теплоотдачи α для четырех сечений, проведенных по поверхности камеры сгорания двигателя МеМЗ-245.

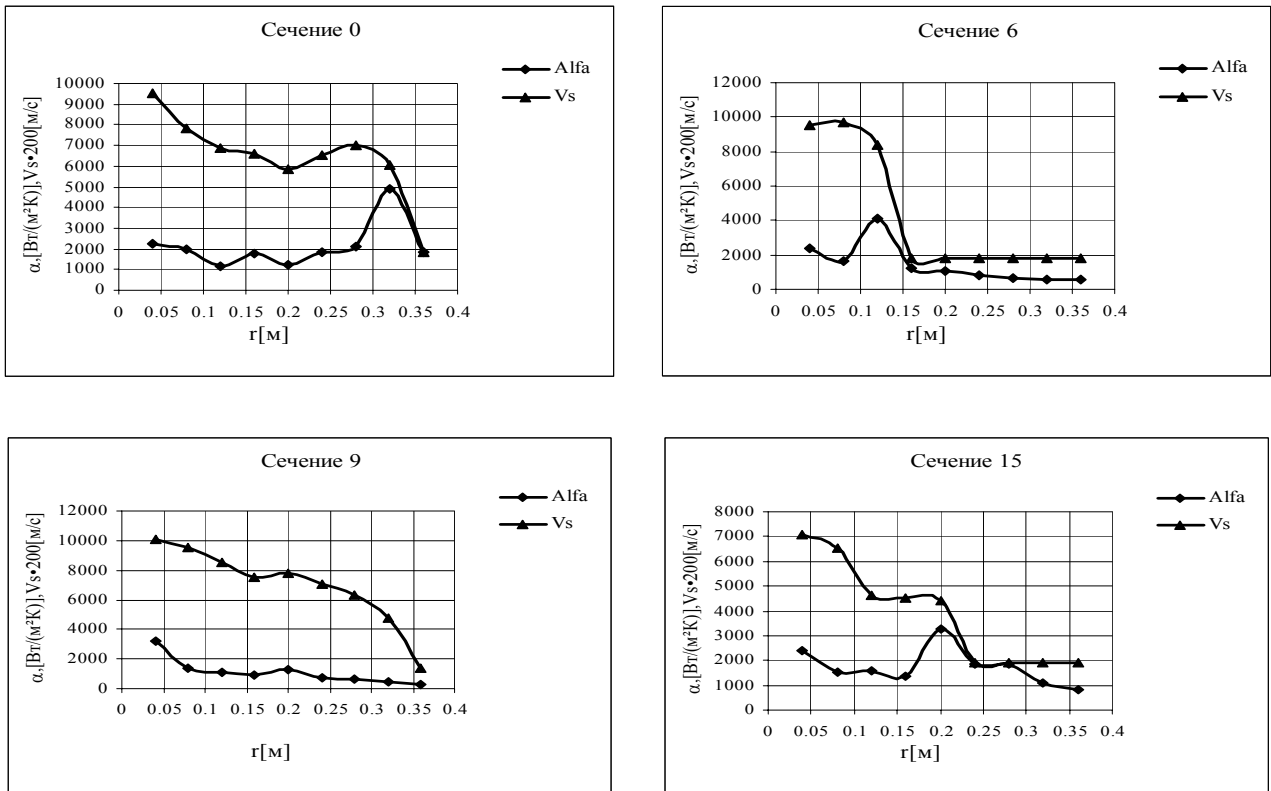


Рис 3

Схема сечений приведена на рис. 4. На рис. 5 приведена картина трехмерного распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности камеры сгорания этого двигателя для угла $\varphi = 90^\circ$ п.к.в. для режима $n = 5000$ об/мин и $M_e = 55$ Н·м.

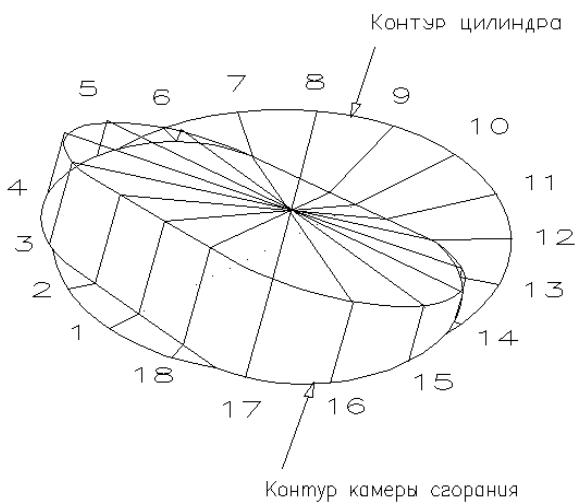


Рис. 4

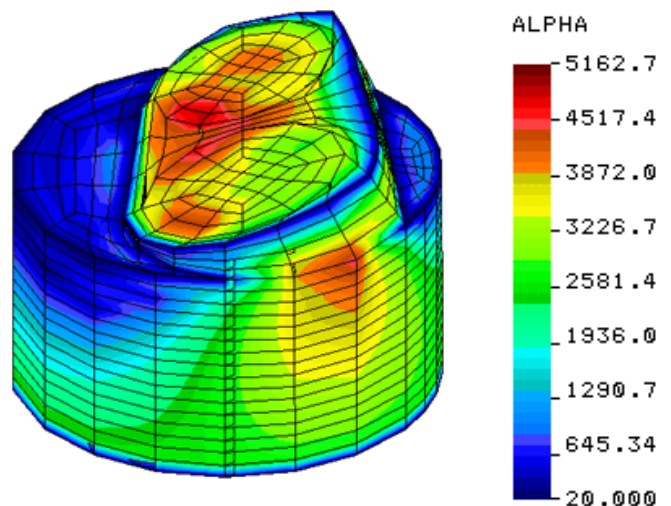


Рис. 5

Представленные графики и рисунки показывают, что кривые изменения мгновенных интенсивностей теплоотдачи имеют сложную, меняющуюся в течение рабочего цикла форму. Выделяются области с большей и меньшей интенсивностью теплоотдачи, определяемые характером течения рабочего тела в соответствующих точках внешнего потока. Наблюдается смещение области с повышенной интенсивностью теплообмена к оси цилиндра. Максимум теплоотдачи располагается в области межклапанной перемычки. Зоны с низкой интенсивностью теплоотдачи соответствуют низким скоростям движения рабочего тела, характерным для периферийной зоны камеры сгорания.

На рис. 6 приведены примеры распределения коэффициентов теплоотдачи по поверхности камеры сгорания дизельного двигателя 12 ЧН 18/20 для углов поворота коленчатого вала, соответствующих различным фазам рабочего процесса: сгоранию, выпуску, впуску и сжатию. Картина распределения коэффициентов теплоотдачи соответствует сложившимся представлениям о теплообмене в камерах сгорания типа Гессельман. Коэффициент теплоотдачи достигает максимального значения в углублении камеры сгорания. Картина поля интенсивности теплоотдачи искажается, как и скоростное поле, наличием в поверхности поршня выборки под клапана, что делает ее неосесимметричной.

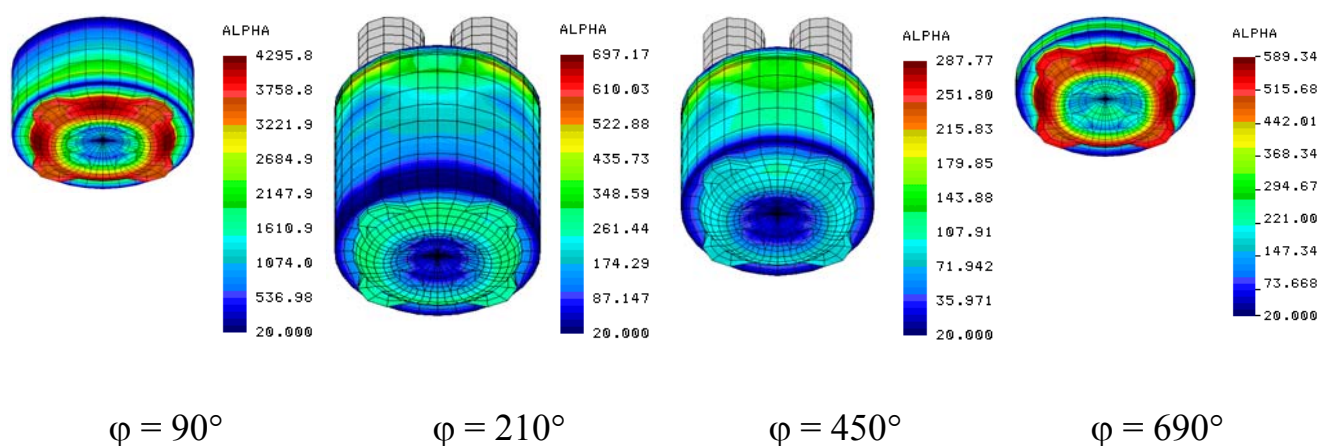


Рис. 6

Было проведено численное исследование влияние формы камер сгорания на характер протекания процессов теплообмена в них, позволившее выявить особенности процессов теплообмена и их зависимость от варьировавшихся параметров.

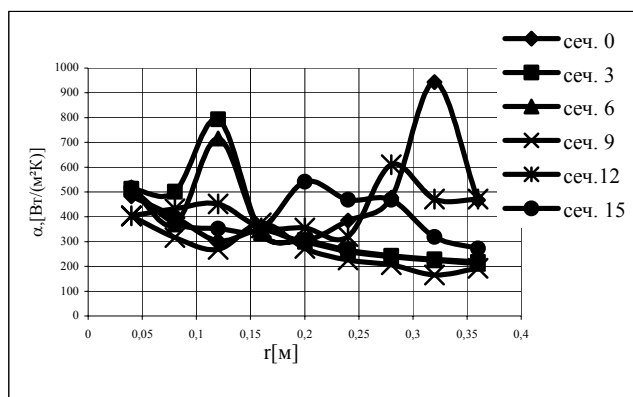


Рис 7

На рис. 7 представлен график изменения среднего за цикл коэффициента теплоотдачи по приведенной выше схеме сечений головки цилиндров двигателя МеМЗ-245 для режима работы двигателя с $n = 5000$ об/мин. Средний коэффициент

теплоотдачи достигает максимума в зонах максимальной кривизны камеры сгорания, соответствующих максимальным касательным скоростям движения рабочего тела

В четвертой главе приводятся данные расчетного исследования, которое проводилось с целью проверки математической модели локального теплообмена в камере сгорания сопоставлением расчетных данных с результатами эксперимента.

С целью проверки приведенной расчетной методики было проведено численное исследование теплового состояния головки цилиндров и сопоставление его результатов с существующими экспериментальными данными. Для сравнения использовались результаты экспериментальной работы группы под руководством Шабанова А.Ю., проведенной на кафедре ДВС СПбГТУ на испытательном стенде с автомобильным двигателем МеМЗ-245. Для измерения стационарных температур в головке было использовано 8 хромель-копелевых термопар, установленных вблизи огневой поверхности КС. Схема расположения термопар представлена на рис 8.

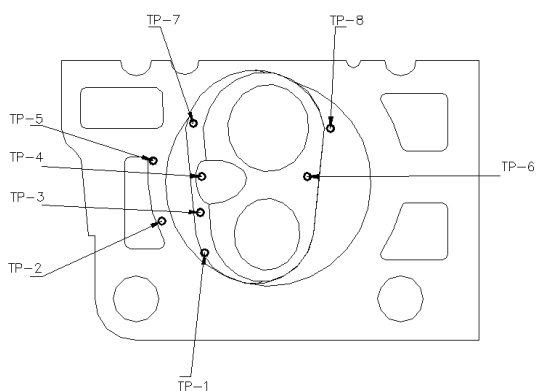


Рис. 8

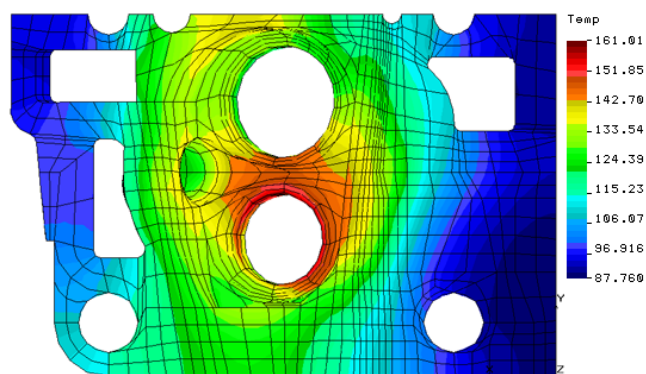


Рис. 9

Расчет температурных полей в головке цилиндров проводился для установившихся режимов работы двигателя с частотой вращения к.в. от 2000 до 5000 об/мин по внешней скоростной характеристике.

В качестве расчетной схемы головки блока цилиндров двигателя МеМЗ-245 выбрана секция головки, относящаяся к первому цилиндру. При моделировании теплового состояния использован метод конечных элементов в трехмерной постановке.

Полная картина тепловых полей для расчетной модели приведена на рис 9. Результаты расчетного исследования представлены в виде изменения температур в теле головки цилиндров в местах установки термопар. Сопоставление результатов расчета и термометрирования головки показало удовлетворительное их совпадение и подтверждают достоверность разработанных математических моделей.

Выводы

В настоящей диссертации в соответствии с поставленными задачами исследования проведено моделирование локального теплообмена в камере сгорания ДВС.

По результатам проведенных теоретических и численных исследований могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. Использование двухмерных моделей не полностью отражает реальную картину процессов и приводит к погрешностям в расчете мгновенных

значений скоростей. В связи с этим была разработана полномасштабная трехмерная модель движения рабочего тела, учитывающая реальные конфигурации рабочих поверхностей деталей, текущие параметры рабочего тела, переменность объема и граничных условий.

2. Проведенный анализ позволил выделить подход к решению задачи газодинамики, основанный на численном решении квазистационарного уравнения Эйлера, как наиболее оптимальный в плане соотношения «затраты-точность».
3. Численное исследование процессов движения воздушного заряда в камерах сгорания различного типа позволило выявить особенности газодинамической картины течения в них, а также оценить влияние конструктивных особенностей некоторых камер на процессы газодинамики. Была выявлена сложная структура потоков, сочетающая зоны циркуляций с застойными зонами, локальные участки ускорения и замедления течения, связанные с перемещением поршня и изменением объема камеры сгорания.
4. На стенках камеры сгорания образуется ламинарный пограничный слой, который можно считать квазистационарным. Разработанная на базе сделанных допущений модель теплообмена учитывает реальную форму тепловоспринимающей поверхности, локальные скорости обтекания, реальные параметры рабочего тела, турбулизацию воздушного заряда на такте сгорания-расширения. Модель позволяет производить расчет как на тактах сжатия-расширения, так и на тактах газообмена;
5. Проведенное численное исследование процессов теплообмена в камерах сгорания различного типа показало сложный, пространственно неоднородный, изменяющийся во времени характер распределения мгновенных локальных коэффициентов теплоотдачи по исследуемым поверхностям. В ходе расчетного исследования были выявлены и рассмотрены особенности локализации полей коэффициентов

конвективного теплообмена в камерах сгорания двигателей различного типа с учетом влияния изменения некоторых конструктивных параметров на расчетные поля.

6. Удовлетворительное совпадение результатов расчетного и экспериментального исследования температурного состояния головки блока цилиндров двигателя MeM3–245 подтвердило в целом правильность и обоснованность теоретических разработок.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Яксон И.А., Шабанов А.Ю., Салангаараччи Д. Численное моделирование пространственных течений в камерах сгорания дизельных и бензиновых двигателей // Деп в ВИНТИ: N789-B2002 от 30.04.02. 14 с.
2. Яксон И.А., Шабанов А.Ю. Оценка влияния погрешности задания граничных условий на точность расчетов теплонапряженного состояния деталей ЦПГ ДВС // Деп в ВИНТИ: N790-B2002 от 30.04.02. 18 с.
3. Яксон И.А., Шабанов А.Ю. Оценка влияния погрешности задания граничных условий на точность расчетов теплонапряженного состояния деталей ЦПГ ДВС // Тезисы докладов и сообщений. XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч. II: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001, с. 8-9.
4. Яксон И.А., Шабанов А.Ю., Салангаараччи Д. Численное моделирование пространственных течений в камерах сгорания дизельных и бензиновых двигателей // Тезисы докладов и сообщений. XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч. III: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002, с. 12-14.