

На правах рукописи

Машкур Махмуд А.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ГАЗОДИНАМИКИ И
ТЕПЛООБМЕНА ВО ВПУСКНОЙ И ВЫПУСКНОЙ СИСТЕМАХ ДВС

Специальность 05.04.02 – "Тепловые двигатели"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2005

Общая характеристика работы

Актуальность диссертации

В современных условиях ускоренного темпа развития двигателестроения, а также доминирующих тенденций интенсификации рабочего процесса при условии повышения его экономичности, все более пристальное внимание уделяется сокращению сроков создания, доводки и модифицированию имеющихся типов двигателей. Основным фактором, существенно снижающим как временные, так и материальные затраты, в этой задаче является применение современных вычислительных машин. Однако их использование может быть эффективным лишь при условии адекватности создаваемых математических моделей реальным процессам, определяющим функционирование ДВС. Особенно остро на данном этапе развития современного двигателестроения стоит проблема теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и головки цилиндра, неразрывно связанная с повышением агрегатной мощности.

Процессы мгновенного локального конвективного теплообмена между рабочим телом и стенкам газо-воздушных каналов (ГВК) все еще остаются недостаточно изученными и являются одним из узких мест в теории ДВС. В связи с этим создание надежных, экспериментально обоснованных расчетно-теоретических методов исследования локального конвективного теплообмена в ГВК, дающих возможность получать достоверные оценки температурного и теплонапряженного состояния деталей ДВС, является актуальной проблемой. Ее решение позволит осуществить обоснованный выбор конструкторских и технологических решений, повысить научно-технический уровень проектирования, даст возможность сократить цикл создания двигателя и получить экономический эффект за счет снижения себестоимости и затрат на экспериментальную доводку двигателей.

Цель и задачи исследования

Основная цель диссертационной работы заключается в решении комплекса теоретических, экспериментальных и методических задач,

связанных с созданием новых уточных математических моделей и методов расчета локального конвективного теплообмена в ГВК двигателя. В соответствии с поставленной целью работы решались следующие основные задачи, в значительной мере определившие и методическую последовательность выполнения работы:

1. Проведение теоретического анализа нестационарного течения потока в ГВК и оценка возможностей использования теории пограничного слоя при определении параметров локального конвективного теплообмена в двигателях;
2. Разработка алгоритма и численная реализация на ЭВМ задачи невязкого течения рабочего тела в элементах системы впуска-выпуска многоцилиндрового двигателя в нестационарной постановке для определения скоростей, температуры и давления, используемых в качестве граничных условий для дальнейшего решения задачи газодинамики и теплообмена в полостях ГВК двигателя.
3. Создание новой методики расчета полей мгновенных скоростей обтекания рабочим телом ГВК в трехмерной постановке;
4. Разработка математической модели локального конвективного теплообмена в ГВК с использованием основ теории пограничного слоя.
5. Проверка адекватности математических моделей локального теплообмена в ГВК путем сравнения экспериментальных и расчетных данных.

Реализация этого комплекса задач позволяет осуществить достижение основной цели работы - создания инженерного метода расчета локальных параметров конвективного теплообмена в ГВК бензинового двигателя.

Актуальность проблемы определяется тем, что решение поставленных задач позволит осуществить обоснованный выбор конструкторских и технологических решений на стадии проектирования двигателя, повысить научно-технический уровень проектирования, позволит сократить цикл создания двигателя и получить экономический эффект за счет снижения себестоимости и затрат на экспериментальную доводку изделия.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что:

1. Впервые использована математическая модель, рационально сочетающая одномерное представление газодинамических процессов во впускной и выпускной системе двигателя с трехмерным представлением течения газа в ГВК для расчета параметров локального теплообмена.
2. Развита методологические основы проектирования и доводки бензинового двигателя путем модернизации и уточнения методов расчета локальных тепловых нагрузок и теплового состояния элементов головки цилиндров.
3. Получены новые расчетные и экспериментальные данные о пространственных течениях газа во впускных и выпускных каналах двигателя и трехмерном распределении температур в теле головки блока цилиндров бензинового двигателя.

Достоверность результатов обеспечена применением апробированных методов расчетного анализа и экспериментальных исследований, общих систем уравнений, отражающих фундаментальные законы сохранения энергии, массы, импульса с соответствующими начальными и граничными условиями, современных численных методов реализации математических моделей, применением ГОСТов и других нормативных актов, соответствующей градуировкой элементов измерительного комплекса в экспериментальном исследовании, а также удовлетворительным согласованием результатов моделирования и эксперимента.

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что разработаны алгоритм и программа расчета замкнутого рабочего цикла бензинового двигателя с одномерным представлением газодинамических процессов во впускной и выпускной системах двигателя, а также алгоритм и программа расчета параметров теплообмена в ГВК головки блока цилиндров бензинового двигателя в трехмерной постановке, рекомендованные к внедрению. Результаты теоретического исследования, подтвержденные

экспериментом, позволяют значительно сократить затраты на проектирование и доводку двигателей.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на научных семинарах кафедры ДВС СПбГПУ в 2002-2004 г.г., на XXXI и XXXIII Неделях науки СПбГПУ (2002 и 2004 г.г.).

Публикации

По материалам диссертации **опубликовано** 6 печатных работ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 129 наименований. Она содержит 189 страницы, в том числе: 124 страниц основного текста, 41 рисунков, 14 таблиц, 6 фотоснимков.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы. Приведена общая характеристика работы.

В **первой главе** содержится анализ основных работ по теоретическому и экспериментальному исследованиям процесса газодинамики и теплообмена в ДВС. Ставятся задачи исследования.

Проведен обзор конструктивных форм выпускных и впускных каналов в головке блока цилиндров и анализ методов и результатов экспериментальных и расчетно-теоретических исследований как стационарного, так и нестационарного течений газа в газоздушных трактах двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены существующие в настоящее время подходы к расчету и моделированию термо- и газодинамических процессов, а также интенсивности теплоотдачи в ГВК. Сделан вывод, что большинство из них имеют ограниченную область применения и не дают полной картины распределения параметров теплообмена по поверхностям ГВК. В первую очередь это связано с тем, что решение задачи о движении рабочего тела в ГВК производится в упрощенной одномерной или двумерной

постановке, что неприменимо случае ГВК сложной формы. Кроме того, отмечено, что для расчета конвективной теплоотдачи в большинстве случаев используются эмпирические или полуэмпирические формулы, что также не позволяет получить в общем случае необходимую точность решения.

Наиболее полно эти вопросы ранее были рассмотрены в работах Бравина В.В., Исакова Ю.Н., Гришина Ю.А., Круглова М.Г., Костина А.К., Кавтарадзе Р.З., Овсянникова М.К., Петриченко Р.М., Петриченко М.Р., Розенблита Г.Б., Страдомского М.В., Чайнова Н.Д., Шабанова А.Ю., Зайцева А.Б., Мундштукова Д.А., Унру П.П., Шеховцова А.Ф., Вошни Г, Хейвуда Дж., Benson R.S., Garg R.D., Woollatt D., Chapman M., Novak J.M., Stein R.A., Daneshyar H., Horlock J.H, Winterbone D.E., Kastner L.J., Williams T.J., White V.J., Ferguson C.R. и др.

Проведенный анализ существующих проблем и методик исследования газодинамики и теплообмена в ГВК позволил сформулировать основную цель исследования как создание методики определения параметров течения газа в ГВК в трехмерной постановке с последующим расчетом локального теплообмена в ГВК головок цилиндров быстроходных ДВС и применением этой методики для решения практических задач снижения тепловой напряженности головок цилиндров и клапанов.

В связи с изложенным в работе поставлены следующие задачи:

- Создать новую методику одномерно-трехмерного моделирования теплообмена в системах выпуска и впуска двигателя с учетом сложного трехмерного течения газа в них с целью получения исходной информации для задания граничных условий теплообмена при расчете задач теплонапряженности головок цилиндров поршневых ДВС;

- Разработать методику задания граничных условий на входе и выходе из газоздушного канала на базе решения одномерной нестационарной модели рабочего цикла многоцилиндрового двигателя;

- Проверить достоверность методики с помощью тестовых расчетов и сопоставления полученных результатов с данными эксперимента и расчетов по методикам, ранее известным в двигателестроении;

- Провести проверку и доработку методики путем выполнения расчетно-экспериментального исследования теплового состояния головок цилиндров двигателя и проведения сопоставления экспериментальных и расчетных данных по распределению температур в детали.

Вторая глава посвящена разработке математической модели замкнутого рабочего цикла многоцилиндрового ДВС.

Для реализации схемы одномерного расчета рабочего процесса многоцилиндрового двигателя выбран известный метод характеристик, гарантирующий высокую скорость сходимости и устойчивости процесса расчета.

Газовоздушная система двигателя описывается в виде аэродинамически взаимосвязанного набора отдельных элементов – цилиндров, участков впускных и выпускных каналов и патрубков, коллекторов, глушителей, нейтрализаторов и труб.

Процессы аэродинамики в системах впуска-выпуска описываются с помощью уравнений одномерной газодинамики невязкого сжимаемого газа:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{u}{F} \frac{dF}{dx} = 0 \quad ; \quad F = \frac{\pi}{4} D^2 \quad ; \quad (1)$$

Уравнение движения:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{4f}{D} \frac{u^2}{2} \frac{u}{|u|} = 0 \quad ; \quad f = \frac{\tau_w}{0.5 \rho u^2} \quad ; \quad (2)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - a^2 \frac{\partial \rho}{\partial x} - (k-1) \rho \left[q + u \frac{4f}{D} \frac{u^2}{2} \frac{u}{|u|} \right] = 0 \quad ; \quad a^2 = \frac{kp}{\rho} \quad , \quad (3)$$

где a - скорость звука ; ρ -плотность газа ; u -скорость потока вдоль оси x ; t - время ; p -давление ; f -коэффициент линейных потерь; D -диаметр трубопровода; $k = \frac{C_P}{C_V}$ -отношение удельных теплоемкостей .

В качестве граничных условий ставятся (на основе основных уравнений: неразрывности, сохранения энергии и отношения плотности и скорости звука в неизэнтропическом характере течения) условия на клапанных щелях в цилиндрах, а также условия на впуске и выпуске из двигателя.

Математическая модель замкнутого рабочего цикла двигателя включает в себя расчетные соотношения, описывающие процессы в цилиндрах двигателя и частях впускных и выпускных систем.

Термодинамический процесс в цилиндре описывается с помощью методики, разработанной в СПбГПУ.

Программа обеспечивает возможность определения мгновенных параметров течения газа в цилиндрах и в системах впуска и выпуска для разных конструкций двигателей.

Рассмотрены общие аспекты применения одномерных математических моделей методом характеристик (замкнутого рабочего тела) и показаны некоторые результаты расчета изменения параметров течения газа в цилиндрах и во впускных и выпускных системах одно- и многоцилиндровых двигателей. Полученные результаты позволяют оценить степень совершенства организации систем впуска-выпуска двигателя, оптимальность фаз газораспределения, возможности газодинамической настройки рабочего процесса, равномерность работы отдельных цилиндров и т.д. Давления, температуры и скорости потоков газа на входе и выходе в газовоздушные каналы головки блока цилиндра, определенные с помощью данной методики, используются в последующих расчетах процессов теплообмена в этих полостях в качестве граничных условий.

Третья глава посвящена описанию нового численного метода, позволяющего реализовать расчет граничных условий теплового состояния со стороны газовоздушных каналов. Основными этапами расчета являются: одномерный анализ нестационарного процесса газообмена на участках системы впуска и выпуска методом характеристик (вторая глава), трехмерный расчет квазистационарного течения потока во впускном и

выпускном каналах методом конечных элементов МКЭ, расчет локальных коэффициентов теплоотдачи рабочего тела. Результаты выполнения первого этапа программы замкнутого цикла используются в качестве граничных условий на последующих этапах.

Для описания газодинамических процессов в канале была выбрана упрощенная квазистационарная схема течения невязкого газа (система уравнений Эйлера) с переменной формой области из-за необходимости учета движения клапанов:

$$\begin{aligned}\nabla \vec{V} &= 0 \\ (\vec{V} \nabla) \vec{V} &= -\frac{1}{\rho} \nabla p.\end{aligned}\quad (4)$$

В качестве граничных условий задавались мгновенные, усредненные по сечению скорости газа на входном и выходном сечении.

Эти скорости, а также температуры и давления в каналах, задавались по результатам расчета рабочего процесса многоцилиндрового двигателя.

Для расчета задачи газодинамики был выбран метод конечных элементов МКЭ, обеспечивающий высокую точность моделирования в сочетании с приемлемыми затратами на реализацию расчета.

Расчетный алгоритм МКЭ для решения данной задачи строится на базе минимизации вариационного функционала, полученного путем преобразования уравнений Эйлера с использованием метода Бубнова-Галеркина:

$$\begin{aligned}\int \left((UU^l \Phi_x^l + VU^l \Phi_y^l + WU^l \Phi_z^l + p^m \psi_x^m) \Phi^k \right) dx dy dz &= 0, \\ \int \left((UV^l \Phi_x^l + VV^l \Phi_y^l + WV^l \Phi_z^l + p^m \psi_y^m) \Phi^k \right) dx dy dz &= 0, \\ \int \left((UW^l \Phi_x^l + VW^l \Phi_y^l + WW^l \Phi_z^l + p^m \psi_z^m) \Phi^k \right) dx dy dz &= 0, \quad (5) \\ \int \left(U^l \Phi_x^l + V^l \Phi_y^l + W^l \Phi_z^l \right) \psi^m dx dy dz &= 0.\end{aligned}$$

Сложная геометрическая конфигурация каналов, наличие в объеме клапана, фрагмента направляющей втулки делает необходимым

использование объемной модели расчетной области. Примеры расчетных моделей впускного и выпускного канала двигателя ВАЗ-2108 приведены на рис. 1.

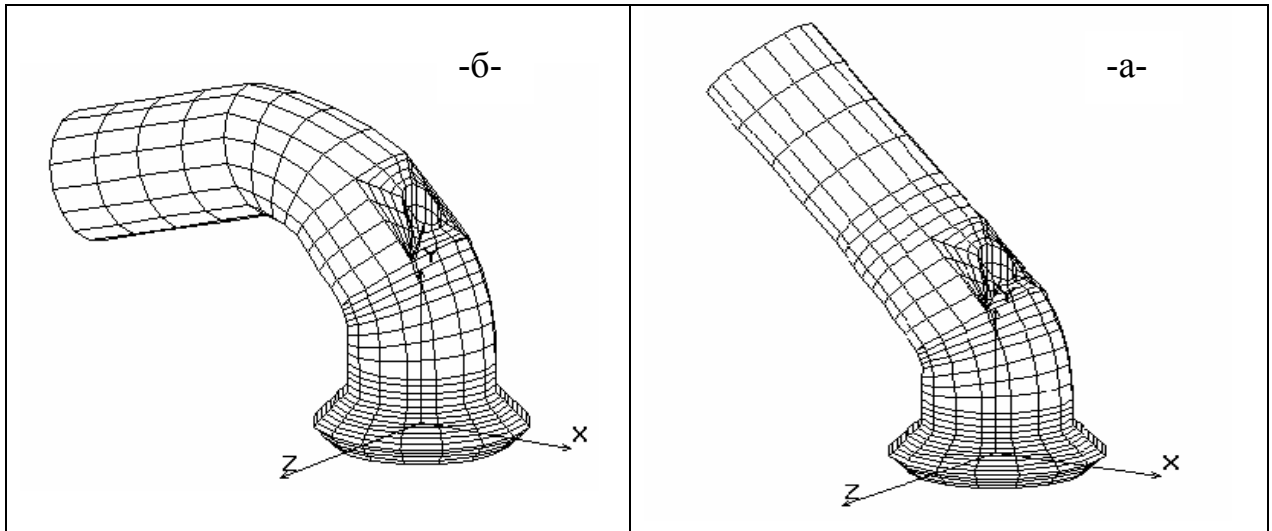


Рис.1. Модели (а) впускного и (б) выпускного каналах двигателя ВАЗ-2108.

Для расчета теплообмена в ГВК выбрана объемная двухзонная модель, основным допущением которой является разделение объема на области невязкого ядра и пограничного слоя. Для упрощения решение задач газодинамики ведется в квазистационарной постановке, то есть без учета сжимаемости рабочего тела. Проведенный анализ погрешности расчета показал возможность подобного допущения за исключением кратковременного участка времени сразу после открытия клапанной щели, не превышающего 5...7% от общего времени цикла газообмена.

Процесс теплообмена в ГВК при открытых и закрытых клапанах имеет различную физическую природу (вынужденная и свободная конвекция соответственно), поэтому и описываются они по двум различным методикам.

При закрытых клапанах используется методика, предложенная МГТУ, в которой учитывается два процесса теплового нагружения головки на этом участке рабочего цикла – за счет собственно свободной конвекции и за счет вынужденной конвекции, обусловленной остаточными колебаниями столба

газа в канале под воздействием переменности давления в коллекторах многоцилиндрового двигателя.

При открытых клапанах процесс теплообмена подчиняется законам вынужденной конвекции, инициируемой организованным движением рабочего тела на такте газообмена. Расчет теплообмена в этом случае предполагает двухэтапное решение задачи – анализ локальной мгновенной структуры газового потока в канале и расчет интенсивности теплообмена через пограничный слой, образующийся на стенках канала.

Расчет процессов конвективного теплообмена в ГВК строился по модели теплообмена при обтекании плоской стенки с учетом либо ламинарной, либо турбулентной структуры пограничного слоя. Критериальные зависимости теплообмена были уточнены по результатам сопоставления данных расчета и эксперимента. Окончательный вид этих зависимостей приведен ниже:

Для турбулентного пограничного слоя:

$$Nu_x = 0.0296 Re_x^{0.8} Pr^{0.43} \quad (6)$$

Для ламинарного пограничного слоя:

$$Nu_x = \Phi(m, Pr) \sqrt{Re_x} K \tau$$
$$Nu_x = \frac{\alpha_x X}{\lambda_t} \quad , \quad (7)$$

где: α_x – локальный коэффициент теплоотдачи; Nu_x, Re_x – местные значения чисел Нуссельта и Рейнольдса соответственно; Pr – число Прандтля в данный момент времени; m – характеристика градиентности потока; $\Phi(m, Pr)$ – функция, зависящая от показателя градиентности потока m и числа Прандтля рабочего тела Pr ; $K \tau = Re_d^{0.15}$ - поправочный множитель.

По мгновенным значениям тепловых потоков в расчетных точках тепловоспринимающей поверхности проводилось усреднение за цикл с учетом периода закрытия клапана.

Четвертая глава посвящена описанию экспериментального исследования температурного состояния головки цилиндров бензинового двигателя.

Экспериментальное исследование выполнялось с целью проверки и уточнения теоретической методики. В задачу эксперимента входило получение распределения стационарных температур в теле головки цилиндров и сравнение результатов расчетов с полученными данными.

Экспериментальная работа проведена на кафедре ДВС СПбГПУ на испытательном стенде с автомобильным двигателем ВАЗ-2108. Работы по препарированию головки цилиндров выполнены автором на кафедре ДВС СПбГПУ по методике, используемой в исследовательской лаборатории ОАО «Звезда» (г. Санкт-Петербург).

Для измерения стационарного распределения температур в головке использовано 6 хромель-копелевых термопар, установленных вдоль поверхностей ГВК.

Замеры проводились как по скоростной, так и по нагрузочным характеристикам при различных постоянных частотах вращения коленчатого вала.

В результате проведенного эксперимента получены показания термопар, снятых при работе двигателя по скоростным и нагрузочным характеристикам.

Таким образом, проведенные исследования показывают, каковы реальные значения температур в деталях головки блока цилиндра ДВС.

Больше внимание уделено в главе обработке результатов эксперимента и оценке погрешностей.

В **пятой главе** приводятся данные расчетного исследования, которое проводилось с целью проверки математической модели теплообмена в ГВК сопоставлением расчетных данных с результатами эксперимента.

На рис. 2 представлены результаты моделирования скоростного поля во впускном и выпускном каналах двигателя ВАЗ-2108 методом конечных элементов. Полученные данные полностью подтверждают невозможность решения данной задачи в какой-либо иной постановке, кроме трехмерной,

поскольку стержень клапана оказывает существенное влияние на результаты в ответственной зоне головки цилиндра.

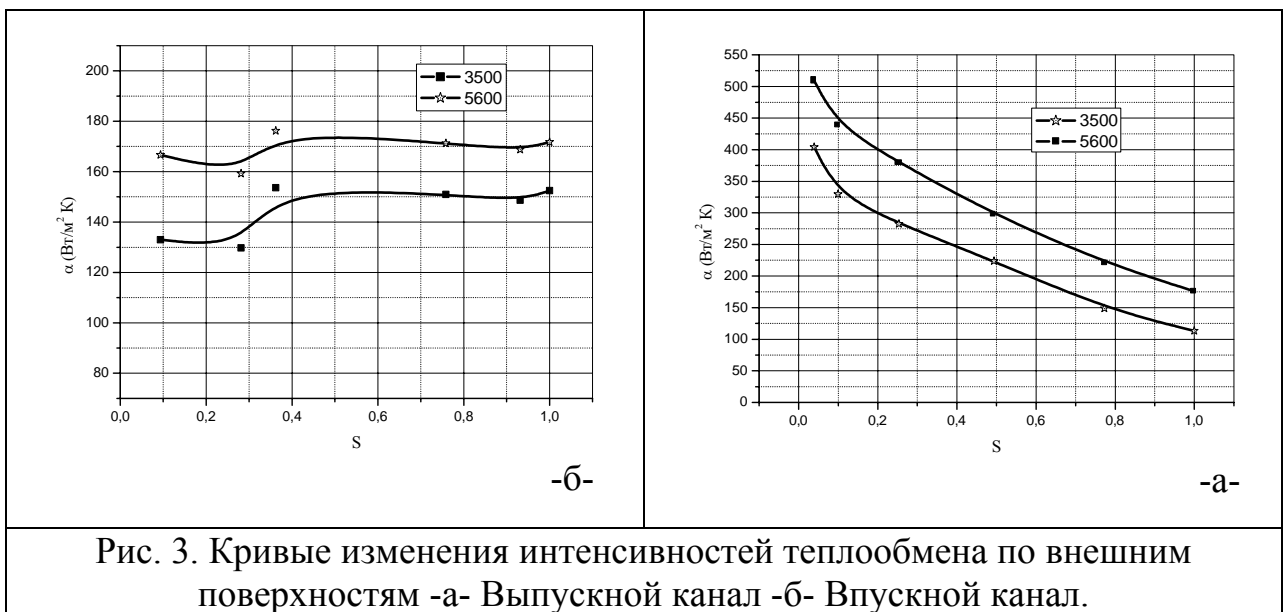
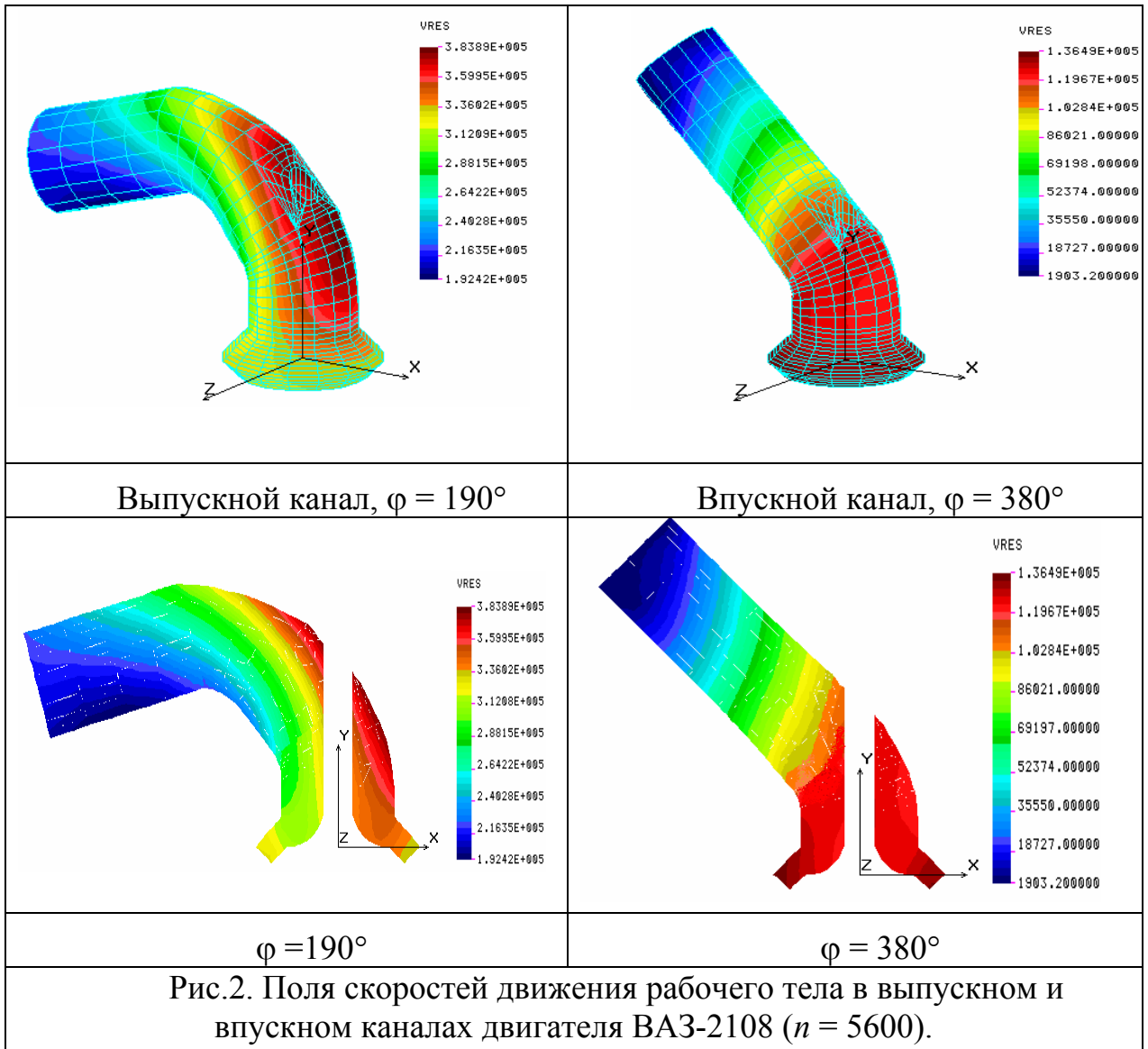
На рис. 3-4 приведены примеры результатов расчета интенсивностей теплообмена во впускном и выпускном каналах. Исследования показали, в частности, существенно неравномерный характер теплоотдачи как по образующей канала, так и по азимутальной координате, что, очевидно, объясняется существенно неравномерной структурой газоздушного потока в канале.

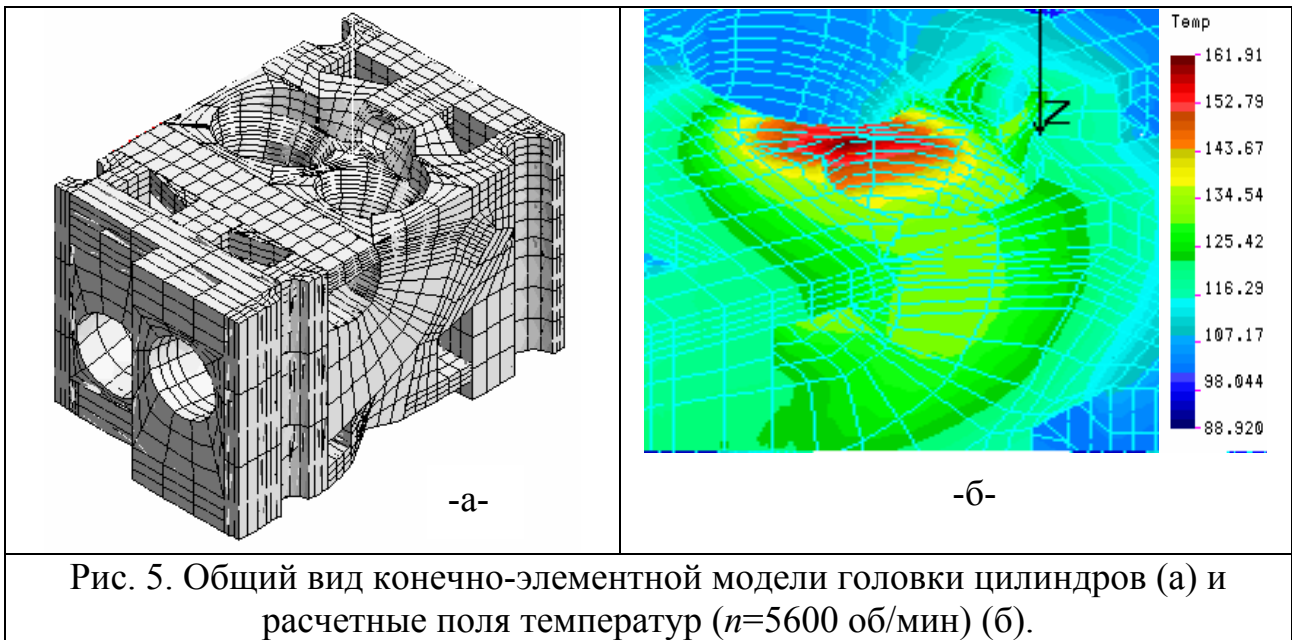
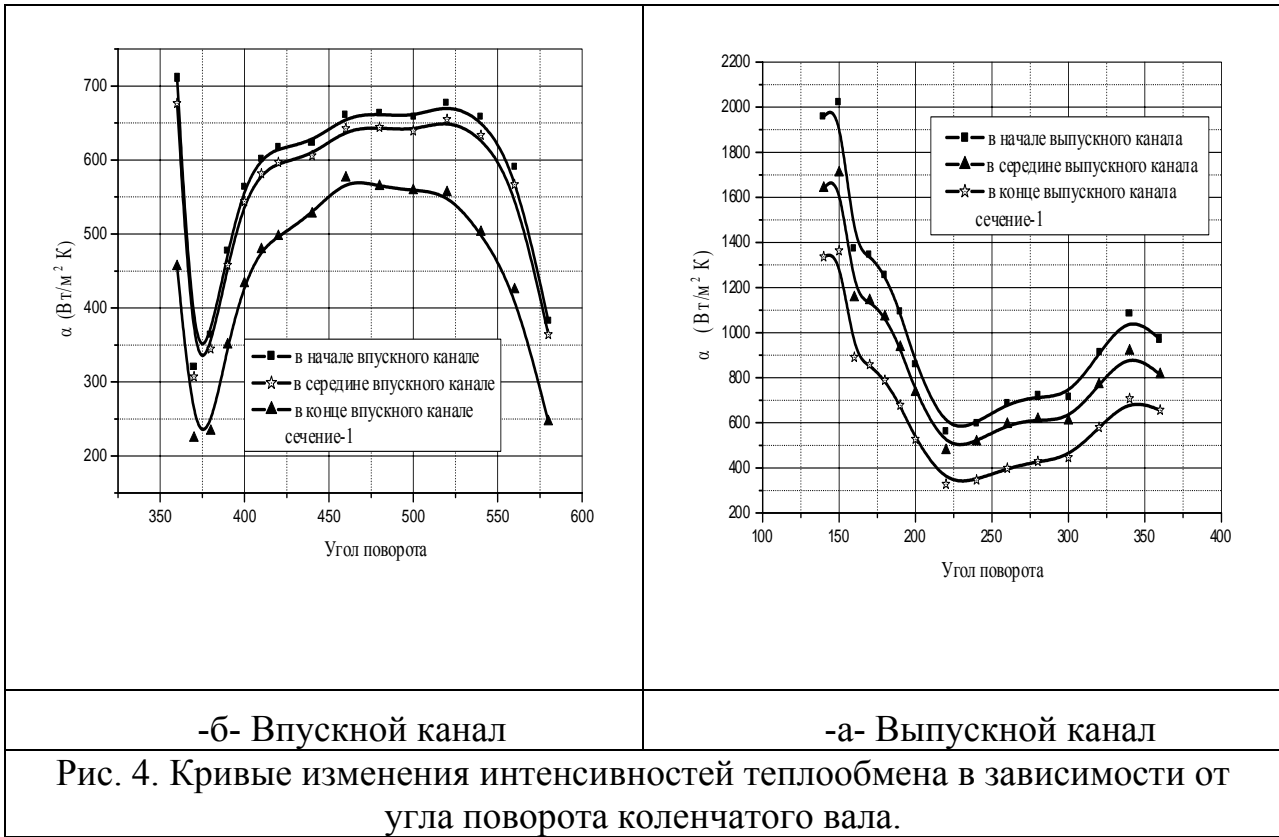
Итоговые поля коэффициентов теплоотдачи использовались для дальнейших расчетов температурного состояния головки блока цилиндров. Граничные условия теплообмена по поверхностям камеры сгорания и полостей охлаждения задавались с использованием методик, разработанных в СПбГПУ.

Расчет температурных полей в головке цилиндров проводился для установившихся режимов работы двигателя с частотой вращения коленчатого вала от 2500 до 5600 об/мин по внешней скоростной и нагрузочным характеристикам.

В качестве расчетной схемы головки блока цилиндров двигателя ВАЗ-2108 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. 5. Результаты расчетного исследования представлены в виде изменения температур в теле головки цилиндров в местах установки термодатчиков. Сопоставление данных расчета и эксперимента показало их удовлетворительную сходимость, погрешность расчета не превысила 3...4%.





Выводы по работе.

По результатам проведенной работы можно сделать следующие основные выводы:

1. Предложена и реализована новая одномерно-трехмерная модель расчета сложных пространственных процессов течения рабочего тела и теплообмена в каналах головки блока цилиндров произвольного поршневого ДВС, отличающаяся большей по сравнению с ранее предложенными методами точностью и полной универсальностью результатов.

2. Получены новые данные об особенностях газодинамики и теплообмена в газовоздушных каналах, подтверждающие сложный пространственно неравномерный характер процессов, практически исключающий возможность моделирования в одномерных и двумерных вариантах постановках задачи.

3. Подтверждена необходимость задания граничных условий для расчета задачи газодинамики впускных и выпускных каналов исходя из решения задачи нестационарного течения газа в трубопроводах и каналах многоцилиндрового двигателя. Доказана возможность рассмотрения этих процессов в одномерной постановке. Предложена и реализована методика расчета этих процессов на базе метода характеристик.

4. Проведенное экспериментальное исследование позволило внести уточнения в разработанные расчетные методики и подтвердило их точность и достоверность. Сопоставление расчетных и замеренных температур в детали показало максимальную погрешность результатов, не превышающую 4%.

5. Предложенная расчетно-экспериментальная методика может быть рекомендована для внедрения на предприятиях отрасли двигателестроения при проектировании новых и доводке уже существующих поршневых четырехтактных ДВС.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Шабанов А.Ю., Машкур М.А. Разработка модели одномерной газодинамики во впускных и выпускных системах двигателей внутреннего сгорания// Деп. в ВИНТИ: N1777-B2003 от 07.10.03., 14 с.
2. Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Машкур М.А. Конечно-элементный метод расчета граничных условий теплового нагружения головки блока цилиндров поршневого двигателя// Деп. в ВИНТИ: N1827-B2004 от 19.11.04., 17 с.
3. Шабанов А.Ю., Махмуд Машкур А. Расчетно-экспериментальной исследование температурного состояния головки блока цилиндров двигателя // “Двигателестроение”: Научно-технический сборник, посвященный 100-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации профессора Н.Х. Дьяченко // Отв. ред. Л. Е. Магидович. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2004. с. 119-123.
4. Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Машкур М.А. Новый метод расчета граничных условий теплового нагружения головки блока цилиндров поршневого двигателя // Двигателестроение, N5 – 2004, 12 с.
5. Шабанов А.Ю., Махмуд Машкур А. Применение метода конечных элементов при определении граничных условий теплового состояния головки цилиндра // XXXIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2004, с 54.
6. Машкур Махмуд А., Шабанов А.Ю. Применение метода характеристик к исследованию параметров газа в газоздушных каналах ДВС. XXXI Неделя науки СПбГПУ. Ч. II. Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003, с. 37.

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 Ерофеев Валентин Леонидович
кандидат технических наук,
доцент Кузнецов Дмитрий Борисович

Ведущая организация - ГУП «ЦНИДИ»

Защита состоится « ____ » 2005 г. в ____ часов 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. ____.

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

Автореферат разослан « ____ » 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

Доктор технических наук, доцент

Хрусталёв Б.С.