1565297

На правах рукописи

**Ван Ичунь**

УДК: 621.436

# *ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ БЫСТРОХОДНОГО ДИЗЕЛЯ*

(05.04.02 — тепловые двигатели)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

**Москва - 1999**

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре "Поршневые двигатели внутреннего сгорания".

Научный руководитель — доктор технических наук,
профессор Кавтарадзе Р.З.

Официальные оппоненты — доктор технических наук,
профессор Петриченко М.Р.
— кандидат технических наук
Гусаков С.В.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1565297
Ван Ичунь Локальный теплоо

Ведущая организация — НИКТИД (г. Владимир)

'900 г. в "14 30" час. на заседании
ювые машины и теоретические
сударственного Технического
107005, Москва, Лефортовская
", ауд.№234Э.
иотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.
емплярах, заверенные печатью,
уманская ул., д.5, МГТУ им.
.05.
99 г.

1565297

Ефимов С.И.

**Актуальность проблемы**. Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) широко применяются на транспорте, в сельском хозяйстве, в строительстве, стационарной энергетике и военной технике. Этим объясняются их важность для народного хозяйства и необходимость непрерывного улучшения параметров. Это должно происходить при соблюдении жестких требований по надежности, долговечности и экономическим показателям.

Все это предъявляет высокие требования к развитию современных ДВС. Автомобильные ДВС, например, развиваются при непрерывном повышении удельной мощности, экономических и экологических показателей и должны обладать не только высокой механической, но и высокой тепловой прочностью. Тем самым обеспечивается высокая эксплуатационная надежность и долговечность. Уменьшение теплопередачи в систему охлаждения без ущерба для надежности и долговечности приводит к повышению КПД двигателя, поэтому в настоящее время во всем мире, в том числе и КНР, ведутся работы по созданию двигателя с уменьшенным отводом теплоты от рабочего тела. Для того, чтобы усовершенствовать существующие и создавать перспективные ДВС, соответствующие спросу современного общества, надо глубоко и всесторонне исследовать внутрицилиндровые физические процессы. Наиболее актуальной из этих задач является исследование теплообмена между рабочим телом и поверхностью основных деталей (поршень, головка цилиндра, гильза). Исходя из этого, в диссертационной работе основное внимание уделяется вопросам определения локальных тепловых нагрузок на тепловоспринимающих поверхностях камеры сгорания (КС), а также исследованию теплового состояния поршня быстроходного дизеля с учетом наличия различных теплоизолирующих покрытий. Ниже приведена краткая характеристика диссертационной работы.

**Цель работы.** Разработка расчетно-экспериментального метода исследования теплообмена в теплоизолированных КС быстроходных дизелей и сравнительный анализ эффективности естественной и искусственной теплоизоляции её поверхностей.

**Методы исследования.** В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования. Для выполнения экспериментальной части работы была создана специальная установка, моделирующая нестационарные тепловые нагрузки в КС дизелей. Измерение нестационарных тепловых потоков на рабочих режимах ДВС производилось на специальном стенде, разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Полученные экспериментальные данные явились основой при создании математических моделей и компьютерных программ для расчета теплового состояния деталей ДВС, а также теплоизолирующих слоев.

1365297

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

**Научная новизна.**

- Разработан метод расчета теплового состояния теплоизолирующих слоев на поверхностях КС на основе решения обратной задачи теплопроводности и получены эмпирические зависимости поверхностной температуры слоя от его толщины;
- Определены условия эквивалентности (с точки зрения теплоизолирующего эффекта) естественных и искусственных теплоизолирующих слоев на поверхности поршня;
- Исследовано влияние интенсивности вихря впускного воздуха на локальный теплообмен и установлено, что значение интенсивности вихря не ограничено теплонапряженным состоянием поршня.

**Достоверность и обоснованность** научных положений определяются:

◊ Применением фундаментальных законов и уравнений термодинамики и тепломассообмена с соответствующими граничными условиями, современных численных и аналитических методов реализации математических моделей;

◊ Использованием при обосновании и оценке адекватности математических моделей достоверных опытных данных, полученных при непосредственном участии автора на специальных экспериментальных установках, созданных в МГТУ им. Н.Э. Баумана;

◊ Экспериментальным подтверждением достаточной точности основных положений и гипотез, принятых при создании математических моделей.

**Практическая значимость** работы состоит в том, что

♦ Разработаны алгоритмы и программы, реализующие уточненные математические модели локального теплообмена в теплоизолированных КС быстроходных дизелей, позволяющие с достаточной для практики точностью решать задачи проектирования перспективных, а также доводки и модернизации существующих дизелей;

♦ Создана относительно простая экспериментальная установка для моделирования локальных нестационарных тепловых потоков в теплоизолированных и обычных КС, позволяющая сократить сроки и материальные затраты, необходимые для создания двигателей с уменьшенным отводом теплоты от рабочего тела.

**Апробация работы.** Диссертационная работа заслушана и одобрена на заседании кафедры "Поршневые двигатели внутреннего сгорания" МГТУ им. Н.Э. Баумана в ноябре 1999 г.

По основным разделам диссертационной работы были сделаны доклады:

I. На международной научно-технической конференции "Двигатель - 97", 14-16 октября, 1997 г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

II. На 2-ой Всероссийской национальной конференции по теплообмену, 26-30 октября, 1998 г., Москва, МЭИ.

III. На XII школе-семинаре молодых ученых и специалистов "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках" под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, 25-28 мая 1999 г., Москва.

IV. На 3-ой международной научно-технической конференции "Решение экологических проблем в автотранспортном комплексе", 26-28 января, 1999 г., Москва, МАДИ.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 6 печатных работах, а также в отчетах кафедры Э-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана по госбюджетным и хоздоговорным работам за 1997-1998 гг.

**Объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 112 страниц основного текста, 50 рисунков и фотографий, 15 страниц со списком использованной литературы, включающим 156 наименований.

**Содержание диссертации:**

***Во введении*** обоснована актуальность проблемы создания эффективных расчетно-экспериментальных методов исследования локального теплообмена в камерах сгорания быстроходных дизелей с теплоизолирующими покрытиями.

Приведена общая характеристика диссертационной работы.

***В первой главе*** приводится аналитический обзор теоретических и экспериментальных работ по исследованию локального теплообмена в дизелях, подчеркивается значение теплообмена и рассмотрены его особенности в рабочем процессе поршневых двигателей, дается обзор известных работ, выполненных в различных странах, в том числе и в КНР. В частности, проанализированы работы Белинкого Л.М., Брилинга Н.Р., Вагнера В.А., Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З., Костина А.Л., Максимова Е.А., Овсянникова М.К., Петриченко М.Р., Петриченко Р.М., Розенблита Г.Б., Стефановского Б.С., Страдомского М.В., Хачияна А.С., Чайнова Н.Д., Шеховцова А.Ф., Alkidas A., Annand W., Boulouchos K., Eichelberg G., Enomoto Y., Furuhama S., Gosman A., Morel T., Nishiwaki K., Nusselt W., Oguri T., Pflaum W., Sitkei G., Stieper K., Woschni G. и их сотрудников.

Отдельно выделяется обзор работ, проведенных по данному направлению в КНР Dai Yi, Guo Qiyi, Ma Chunfa, Shan Chunxian, Yang Jianglin и их сотрудниками.

Проведенный анализ опубликованных работ по исследованию локального теплообмена в ДВС, а также потребности современного двигателестроения, определили круг конкретных задач, решению которых посвящена диссертационная работа:

1. Создание экспериментальной установки для моделирования локальных нестационарных тепловых потоков в КС быстроходных дизелей, позволяющей испытывать отдельные детали ДВС из различных материалов и с различными теплоизолирующими покрытиями, а также проводить градуировку датчиков теплового потока.
2. Экспериментальное определение нестационарных тепловых потоков как на моделирующей установке, так и на работающем дизеле с

непосредственным впрыском в зависимости от интенсивности вихревого движения впускного воздуха и определение граничных условий для расчета теплового состояния поршня.

3. Усовершенствование алгоритма и программы расчета теплового состояния деталей ДВС на основе численного метода контрольных объемов и проведение численных экспериментов с целью выявления качественного и количественного воздействия на теплообмен как естественной (слой нагара), так и искусственной (керамическое покрытие) теплоизоляции.
4. Определение поверхностной температуры теплоизолирующего покрытия на основе обратных методов теплопроводности и исследование её влияния на параметры рабочего процесса ДВС.
5. Анализ полученных результатов расчетно-экспериментального исследования процессов теплообмена в ДВС и выдача практических рекомендаций.

***Вторая глава*** посвящена разработке метода экспериментального исследования нестационарного теплообмена в КС быстроходного дизеля.

При непосредственном участии автора в лаборатории кафедры Э2 МГТУ им. Н.Э. Баумана была создана экспериментальная установка, позволяющая испытывать образцы с различными керамическими покрытиями и проводить градуировку датчиков (рис. 1). Принцип действия экспериментальной установки состоит в следующем: электродвигатель 1 (220 В) приводит во вращение металлический диск 4 радиусом R, имеющий отверстие, ограниченное частью сегмента с углом раствора $\beta$ и радиусами $r_1$ и $r_2$. На диск в районе отверстия направлена газовая горелка 20, в которую газ поступает из баллона 19, воздух подается нагнетателем 17. Вентили 16 и 18 служат для регулирования расходов воздуха и газа соответственно и тем самым для изменения интенсивности тепловой нагрузки на образец 6, представляющий собой модель стенки камеры сгорания. На образце расположен датчик 7 нестационарного теплового потока, регистрирующий величину теплового потока, направленного из горелки 20 на металлический диск 4. Стационарный тепловой поток, проходя через отверстия, на поверхности образца принимает импульсный характер, т.е. превращается в нестационарный тепловой поток. Величина и частота импульса определяется частотой вращения диска и площадью его отверстия. Водяной холодильник 3 предназначен для охлаждения металлического диска 4, нагретого горелкой. Электрический сигнал от датчика 7, проходя через усилитель 8, поступает в компьютер 12, где сначала преобразуется в температуру, а потом с помощью специальной программы - в плотность теплового потока. Датчик 15 регистрирует частоту вращения диска.

Второй этап экспериментального исследования предусматривал определение нестационарных тепловых нагрузок непосредственно в КС быстроходного дизеля по методу, разработанному в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Схема и принцип работы экспериментальной установки опубликованы в

совместных работах МГТУ им. Н.Э. Баумана и института теплофизики АН Украины и приведены в диссертации. Автором были также использованы некоторые данные, полученные на этой установке Р.З. Кавтарадзе, В.В. Араповым и др.

Локальные нестационарные тепловые нагрузки как на моделирующей установке, так и в КС дизеля, определялись с помощью медно-константановых датчиков теплового потока, принцип действия которых основан на использовании дополнительной (вспомогательной) стенки. Нестационарные температуры на тепловоспринимающей и теплоотдающей поверхностях тонкого диска ($\delta \leq 1$мм) из константана с использованием обратных методов теплопроводности пересчитываются в нестационарный тепловой поток, тем самым определяются локальные термические граничные условия, необходимые для расчета теплового и напряженного состояния деталей ДВС. Погрешность измерения при использовании датчиков теплового потока оценена как результат случайных погрешностей самого датчика и тарировочного устройства и составляет ±7,5%.

Математическое моделирование нестационарного теплового состояния датчика, проведенное с учетом граничных условии, характерных для КС дизеля (прямая задача) и с использованием компьютерной программы, разработанной с участием автора, показало, что во вспомогательной пластине температурное поле имеет почти одномерный характер и при соблюдении теплоизоляции датчика радиальные градиенты температур не возникают. Таким образом, была обоснована правомерность применения метода одномерной обратной задачи теплопроводности и проведена оценка погрешности измерения для датчиков используемого типа.

В проведенных исследованиях были определены локальные нестационарные тепловые потоки в КС быстроходных дизелей в широком диапазоне изменения нагрузочных и скоростных режимов работы (рис. 2). При этом было учтено влияние на теплообмен таких факторов, как нагароотложение на стенках камеры сгорания и интенсивность завихрения впускного воздуха.

Так как с повышением частоты последовательных циклов глубина проникновения температурной волны в тепловоспринимающих деталях двигателя уменьшается, были введены ограничения на размеры используемого датчика.

Таким образом, после обработки результатов измерения, полученных на описанных в данной главе экспериментальных установках, получаются термические граничные условия (т.е. локальные тепловые нагрузки) для основных деталей двигателя (поршень, головка цилиндра и т.д.), теплонапряженное состояние которых и является основным ограничением при форсировании дизелей по мощности.

***В третьей главе*** приведено исследование теплового состояния теплоизоляторов на основе решения обратной задачи теплопроводности.

Наличие нагара на тепловоспринимающих поверхностях камеры сгорания оказывает сильное блокирующее воздействие на нестационарный теплообмен между рабочим телом и основными деталями, образующими КС: нестационарные тепловые потоки на поверхностях деталей уменьшаются и сдвигаются по фазе (рис.2). На основе обратных методов теплопроводности проведены расчеты значений температуры на поверхности слоя нагара. Результат, представленный на рис.3, показывает, что нагароотложение может рассматриваться как естественная теплоизоляция поверхности КС ДВС. В случае использования искусственной теплоизоляции (например, керамических покрытий), когда температура поверхности высокая (Tw>700K), происходит выгорание нагароотложений, т.е. "естественная теплоизоляция " полностью уступает место искусственной. Этим объясняется также известный факт стабилизации толщины слоя нагара, когда при высоких нагрузках двигателя в случае чистой поверхности КС в начале наблюдается появление и заметный рост толщины слоя нагара, а после достижения её определенной толщины она стабилизируется и рост замедляется. Очевидно, что величина температуры поверхности теплоизолирующего слоя кроме его толщины определяется и граничными условиями со стороны рабочего тела. Поэтому значение этой температуры может меняться в зависимости от типа двигателя и режимов его работы.

Проведенные расчетные исследования требуют задания толщины слоя при известных его теплофизических свойствах. Теоретическое определение толщины теплоизолирующего слоя основано на методе, разработанном в МГТУ им. Н.Э. Баумана и заключается в использовании функции

$$\Omega(\delta) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{T\infty i - \left(\frac{q_{wi}}{\alpha_i} + T_{wi}\right)}{\left[\frac{T\infty i + \left(\frac{q_{wi}}{\alpha_i} + T_{wi}\right)}{2}\right]}, \qquad (1)$$

которая при истинном значении толщины слоя δ имеет минимум. Это предположение основано на допущении, что для процессов поршневого сжатия-расширения (когда в цилиндре нет сгорании) отношение локального коэффициента теплоотдачи на поверхности датчика $\alpha_\delta$ к коэффициенту теплоотдачи $\alpha_B$ , осредненному по поверхностью КС и рассчитанному по известным $\alpha$ - формулам, постоянно независимо от наличия нагара. В (1) температура $T_\infty$ рабочего тела определяется из уравнения состояния идеального газа с использованием индикаторной диаграммы P=P(φ). На рис. 4 показаны графики функции $\Xi(\varphi)=\alpha_\delta/\alpha_B$ для процесса в цилиндре без сгорания при различных частотах их вращения. Видно, что отклонение

функции $\Xi(\varphi)$ от осредненного значения составляет не более 5%, поэтому её можно принять постоянной и независимой от наличия нагара. Искомая толщина слоя нагара находится как минимум функции (1) при условии, что $\alpha_i = \alpha_{\varepsilon i}$. Как видно из рис. 5, функция $\Omega(\delta)$ в рассматриваемом примере имеет ярко выраженный минимум при $\delta$ =9,9 мкм.

По результатам экспериментальных исследований было установлено, что интенсивность вихря впускного воздуха оказывает влияние на характер перераспределения локальных тепловых нагрузок на поверхности камеры сгорания. Однако значения последних зависят не только от локальных газодинамических условий, но и от локальной толщины нагароотложения на участках этих поверхностей, при этом последнее может оказать преобладающее влияние.

Численные эксперименты по определению поверхностной температуры теплоизолирующего покрытия показывают, что её величина гораздо выше (на несколько сотен градусов) температуры поверхности детали (см. рис. 3), что объясняется низким коэффициентом проникновения теплоты $в = \sqrt{\lambda c \rho}$ нагароотложения.

***В четвертой главе*** приведено решение краевой задачи теплопроводности для поршня быстроходного дизеля численным методом контрольных объемов.

КО в случае ортогональной сетки приведены на рис. 6. Такая сетка всегда регулярная.

Можно допустить, что теплофизические свойства материала внутри рассмотренного контрольного объема постоянные, тогда из уравнения Фурье

$$\int_{r1'}^{r3'}\int_{z2'}^{z4'}\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\lambda\frac{\partial T}{\partial r})drdzd\tau+\int_{r1'}^{r3'}\int_{z2'}^{z4'}\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau}\frac{\partial}{\partial z}(\lambda\frac{\partial T}{\partial z})drdzd\tau$$

$$=\int_{r1'}^{r3'}\int_{z2'}^{z4'}\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau}c\rho\frac{\partial T}{\partial \tau}drdzd\tau \qquad (2)$$

получаем конечно-разностное уравнение для $i$-того контрольного объема (рис.6)

$$\frac{\overline{\lambda_{3i}}}{a_{3i}}(U_3-U_i)F_{3i}+\frac{\overline{\lambda_{1i}}}{a_{1i}}(U_1-U_i)F_{1i}+\frac{\overline{\lambda_{4i}}}{a_{4i}}(U_4-U_i)F_{4i}+\frac{\overline{\lambda_{2i}}}{a_{2i}}(U_2-U_i)F_{2i}$$

$$=c_i\rho_iV_i\frac{U^{\tau+\Delta\tau}-U^{\tau}}{\Delta\tau}, \qquad (3)$$

где $U$ — дискретный аналог искомой функции $T(r, z, \tau)$ в определенной точке (узле) расчетной области; $a_{ji}$— отрезок, соединяющий узел $i$ с соседними узлами $j$=1, 2, ...$m$; $F_{ji}$—площадь соприкосновения $i$-того контрольного объема и соседнего $j$-того контрольного объема.

Для решения стационарных и нестационарных, плоских и осесимметричных краевых задач теплопроводности для деталей ДВС автором были модифицированы алгоритм и программа расчета на основе численного метода контрольных объемов, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре Э2. Были расширены возможности программного комплекса, в частности, были введены новые модули, учитывающие наличие на поверхности детали тонких слоев инородных материалов с теплофизическими свойствами, резко отличающими от теплофизических свойств материала основной детали.

Увеличение интенсивности вращательного движения крупномасштабного вихря в КС дизеля способствует блокированию теплообмена между зарядом и огневыми поверхностями головки цилиндра и поршня (рис. 7 и 8). В результате получается, что увеличение интенсивности вихря заряда, осуществляемое при разработке новых дизелей с целью улучшения процессов смесеобразования и их эффективных показателей, не только не приводит к увеличению тепловой напряженности поршня, но в определенной степени понижает температуру поршня в характерных точках (рис. 7 и 8) и уменьшает теплообмен между рабочим телом и огневым днищем поршня, а также головкой цилиндра.

В результате проведенных численных экспериментов было установлено, что в исследуемом диапазоне режимов работы ДВС керамическое покрытие из двуокиси циркония толщиной δ=2мм оказывает практически такое же теплоизолирующее воздействие, что и слой нагароотложения толщиной δ=125мкм. При этом температурные поля поршня, как видно из рис. 9, оказываются практически идентичными. Влияние интенсивности вихря впускного воздуха на температурное поле поршня при этом оказывается таким же, что и в случае без теплоизолирующего покрытия.

Установлена линейная зависимость температуры на поверхностях слоев нагара и керамики от толщины слоя. В частности, по результатам численных экспериментов получено, что зависимость температуры поверхности слоя нагара от его толщины в рассматриваемом диапазоне изменения мощности и частоты вращения двигателя в случае серийной головки имеет вид

$$T_W = 2{,}2\delta + 250 \,, \tag{4}$$

а в случае опытной головки (с увеличенной на 20% интенсивностью вихря впускного воздуха)

$$T_W = 1{,}5\delta + 200 \,. \tag{5}$$

В выражениях (4) и (5) δ = [мкм], $T_W$ = [°C].

На рис. 10 представлено изменение максимальной температуры поверхности слоя керамики с ростом его толщины. При увеличении толщины слоя керамики до 3 мм скорость роста поверхностной температуры высокая, а при δ>3 мм она замедляется. Заметим, что в опытных работах, проведенных различными авторами с целью тепловой защиты деталей ДВС, чаще всего используется керамика толщиной δ≅(2÷3)мм.

Сопоставление данных на рис. 10 с расчетными результатами, полученными для слоя нагара различной толщины, показывает, что в случае искусственной теплоизоляции линейный характер фукции $T_W = f(\delta)$ нарушается, однако, как и в случае естественной теплоизоляции, в первом приближении этой функции можно придать явный вид по аналогу с выражениями (4) и (5). Тогда в случае серийной головки:

$$T_W = 180\delta + 220, \tag{6}$$

а в случае опытной головки:

$$T_W = 117\delta + 200. \tag{7}$$

В этих выражениях δ = [мм], $T_W$ = [°C].

Результаты определения эквивалентных толщин теплоизоляционного покрытия в зависимости от коэффициента проникновения теплоты используемого материала хорошо описываются эмпирической формулой

$$\delta_{экв} = 8{,}5 + 0{,}0103\ в, \tag{8}$$

где $\delta_{экв}$ =[мкм], $в$=[Вт.с$^{1/2}$/м$^2$.К].

Полученное выше с помощью минимизации функции Ω(δ) значение δ≅10 мкм (рис. 5) для толщины слоя нагара в данном случае является эталонным для сравнения и его значение получается из (8). Очевидно, что при $в \to 0$ уравнение (8) теряет силу. Из (8) следует также, что такой же теплоизолирующий эффект, что и слой нагара толщиной $\delta_{экв} = 10$ *мкм*, для условий КС дизеля дает слой из двуокиси циркония толщиной $\delta_{экв} \cong 30$ *мкм*, из хромели толщиной $\delta_{экв} \cong 97$ *мкм*, из стали толщиной $\delta_{экв} = 133$ *мкм*, из меди толщиной $\delta_{экв} \cong 390$ *мкм*.

По результатам численных экспериментов было установлено, что изменение температур поверхности теплоизоляторов происходит практически идентично при δ=2мм для слоя керамики и δ=125мкм для слоя нагара. На рис. 9 приведены температурные поля поршня и видно, что керамический слой толщиной δ=2мм оказывает практически такое же

теплоизолирующее воздействие на поршень, что и слой нагара толщиной δ=125мкм. При этом эквивалентность этих теплоизоляторов одинаковая для опытной и серийной головок цилиндра.

Сопоставление результатов, полученных без теплоизолирующих покрытий (рис. 8) и при их наличии (рис. 9), показывает существенное улучшение условий работы первого компрессионного кольца. Кроме того, очевидна целесообразность тепловой защиты теплонапряженных деталей дизеля в случае его значительной форсировки по мощности.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Создана экспериментальная установка для моделирования локальной тепловой нагрузки в КС дизелей, которая позволяет исследовать эффективность различных теплоизолирующих покрытий поверхностей КС, а также производить градуировку датчиков для измерения нестационарного теплового потока. Экспериментальные данные, полученные на моделирующей установке, используются как исходные для решения обратной задачи теплопроводности с целью расчета теплового состояния теплоизолирующих слоев на поверхности КС.
2. Экспериментальные исследования нестационарных локальных тепловых потоков на тепловоспринимающей поверхности головки быстроходного дизеля Д-144 (Ne=44кВт, n=2200мин$^{-1}$, S/D=12/10,5, без наддува, с воздушным охлаждением) в широком диапазоне изменения нагрузки, а также при прокрутке, показали, что нагароотложение оказывает сильное блокирующее воздействие на нестационарный теплообмен между рабочим телом и основными деталями, образующими камеру сгорания. Нагароотложение следует рассматривать как естественную теплоизоляцию, свойственную ДВС. В случае использования искусственной теплоизоляции (например, керамических покрытий), температура тепловоспринимающих поверхностей КС повышается и при $T_w$>700K происходит выгорание нагара.
3. Экспериментальные данные по нестационарному локальному теплообмену в КС быстроходного дизеля КамАЗ-7405 (Ne=176кВт, n=2200мин$^{-1}$, S/D=12/12, с наддувом, с водяным охлаждением), полученные при работе на серийной и опытной головках цилиндра, показали, что увеличение интенсивности вихря приводит к уменьшению тепловой нагрузки на тепловоспринимающей поверхности в среднем на 5-7%. Тем самым установлено, что увеличение интенсивности крупномасштабного вихря в КС дизеля наряду с нагароотложением способствует блокированного теплообмена между рабочим телом и огневыми поверхностями головки цилиндра и поршня.
4. Увеличение интенсивности вихревого движения заряда, осуществляемое при создании новых перспективных, а также при доводке существующих

конструкций быстроходных дизелей исследуемого типа с целью улучшения их эффективных показателей, не ограничивается тепловой напряженность поршня и головки цилиндра.

5. Для решения стационарных и нестационарных, плоских и осесимметричных краевых задач теплопроводности для деталей ДВС были модифицированы алгоритм и программа расчета на основе численного метода контрольных объемов, разработанного для исследований подобного типа на кафедре Э 2 МГТУ им. Н.Э. Баумана. Были расширены возможности программного комплекса, в частности, были введены новые модули, учитывающие наличие на поверхности детали произвольной конфигурации тонких слоев инородных материалов с теплофизическими свойствами, резко отличающимися от теплофизических свойств материала основной детали. Экспериментальная проверка температурных полей, полученных с применением разработанного программного комплекса для поршня быстроходного дизеля КамАЗ-7405, подтверждает достоверность расчетных данных (отклонение расчетных температур от экспериментальных в характерных точках поршня не превышает 5%).
6. По результатам расчетно-экспериментальных исследований установлена линейная зависимость температуры на поверхностях слоев нагара и керамики от толщины теплоизолирующего слоя и предложены эмпирические выражения для определения этой температуры. Практическая значимость этих результатов обусловлена тем, что в настоящее время нет надежных данных по непосредственному измерению температуры на поверхностях теплоизолирующих покрытий.
7. Установлено, что в условиях КС исследованных быстроходных дизелей керамическое покрытие из двуокиси циркония толщиной 2мм оказывает практически такое же теплоизолирующее воздействие, что и слой нагара толщиной 125мкм. Предложена эмпирическая зависимость для определения эквивалентных (с точки зрения теплоизоляции) толщин для различных искусственных теплоизолирующих покрытий в зависимости от коэффициента проникновения теплоты материала.

Полученные в диссертационной работе материалы рекомендуются для практического пользования при подборе теплоизоляционных материалов и при проектировании камер сгорания с теплоизолирующими покрытиями.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:


1. Ван Ичунь, Кавтарадзе Р.З., Лобанов И.Е. Экспериментальное исследование влияние нагара и газодинамических условий на нестационарный теплообмен в камере сгорания дизеля. // Тез. Докл. Двигатель–97. –М., 1997. –С. 28.
2. Лобанов И.Е., Ван Ичунь. Влияние слоя нагара на поверхности камеры сгорания на нестационарные параметры рабочего тела. // Теплопроводность, теплоизоляция. Вторая российская национальная конференция по теплообмену. –М., 1998. –С. 150–153.
3. Effect of the in-cylinder carbon deposit and inlet swirl intensity on the local transient heat transfer. / R. Kavtaradze, N. Lapushkin, V. Arapov, Yichun Wang. //Chinese Internal Combustion Engine Engineering. –1998. –№4. –P. 41–44.
4. Моделирование локальных температур рабочего тела в объеме КС дизеля с непосредственным впрыскиванием топлива. / Р.З. Кавтарадзе, В.В. Арапов, А.А. Скрипник, Ичунь Ван. // Решение экологических проблем в автотранспортном комплексе. 3-я Международная научно-техническая конференция. –М., 1999. –С. 157.
5. Эксперимента-льная установка для моделирования нестационарных тепловых потоков в камеры сгорания ДВС. / Р.З. Кавтарадзе, В.В. Арапов, Ичунь Ван, А.А. Скрипник. // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. XII школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. –М., 1999. –С. 153–154.
6. Влияние интенсивности вихря впускного воздуха на локальные температуры рабочего тела в цилиндре двигателя. / Р.З. Кавтарадзе, В.В. Арапов, А.А. Скрипник, Ичунь Ван. // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. XII школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. –М., 1999. –С. 155–158.

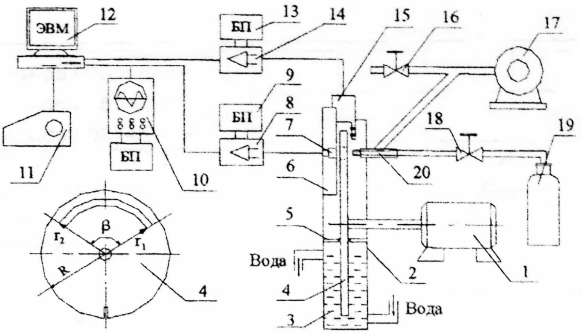



Рис.1. Схема экспериментальной установки для моделирования нестационарного локального теплообмена в КС ДВС

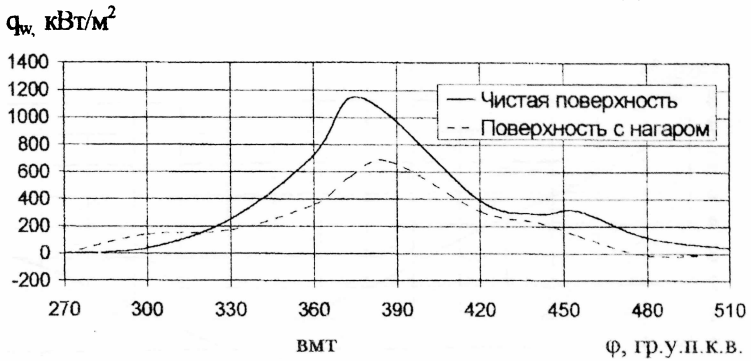



Рис.2. Нестационарные тепловые потоки на межклапанной перемычке двигателя Д-144 при режиме прокрутки, n=1900мин$^{-1}$

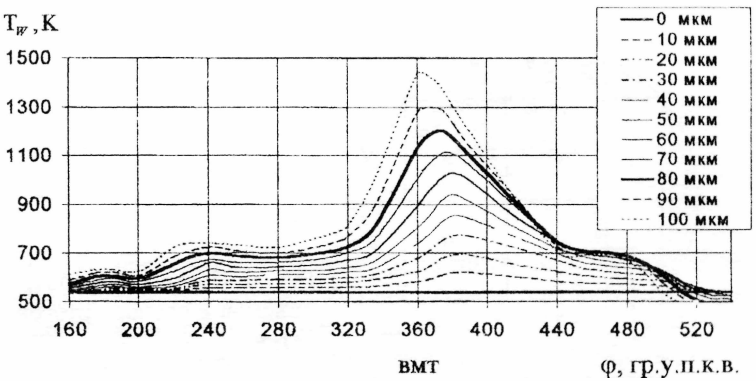



Рис.3. Температура поверхности слоя нагара

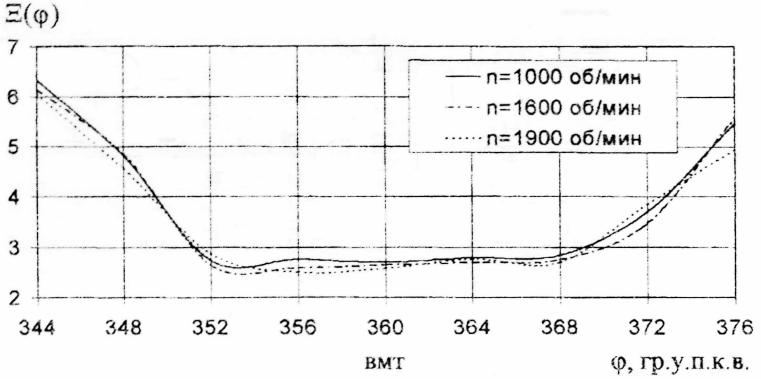



Рис.4. Изменение функции Ξ(φ) по углу поворота коленчатого вала

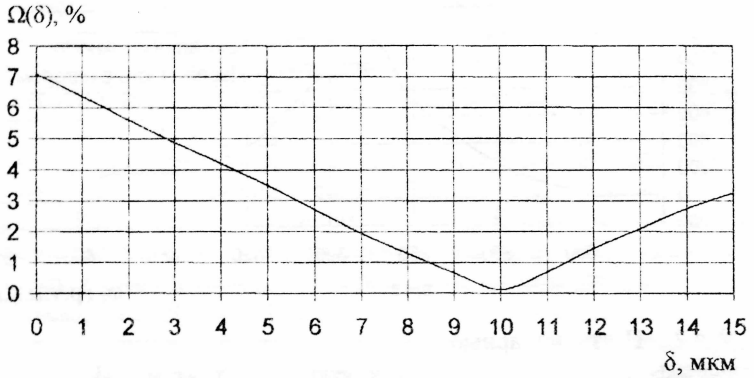



Рис. 5. Зависимость Ω(δ) от толщины слоя нагара

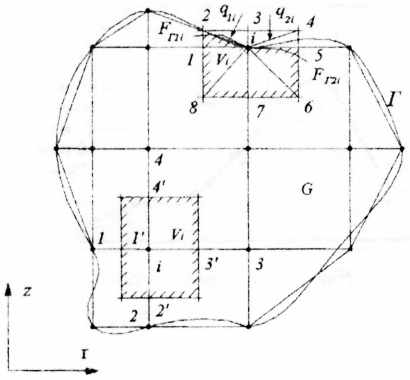
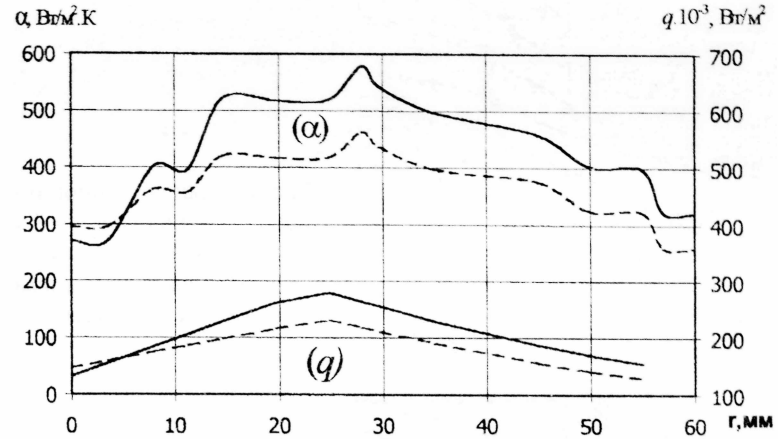



Рис. 6. Построение контрольных объемов в случае ортогональной сетки



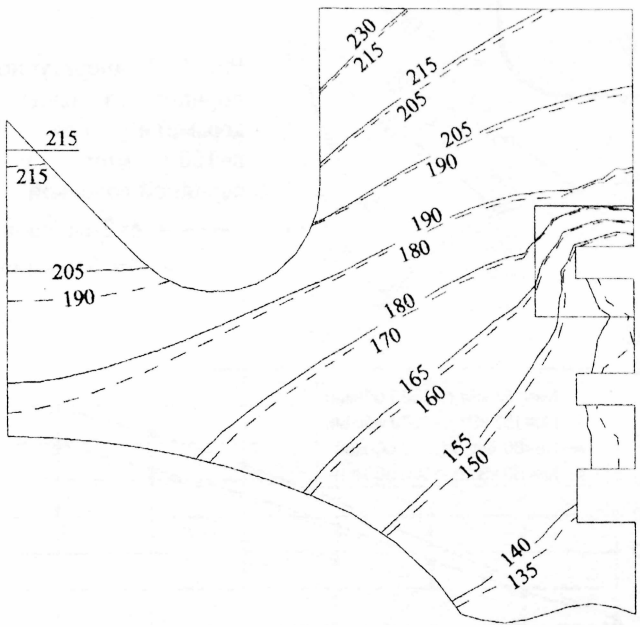




Рис. 7. Распределение усредненных по циклу тепловых потоков (*q*) и коэффициента теплоотдачи (α) на огневой поверхности поршня и температурное поле (°С) поршня дизеля КамАЗ-7405 при $N_e$=153 кВт, n=1600мин$^{-1}$: ——— серийная головка; - - - - - опытная головка

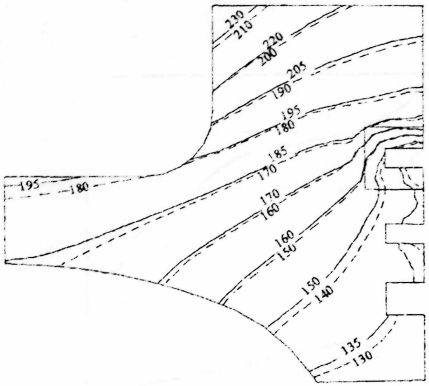



Рис. 8. Температурное поле (°С) поршня с плоскодонной КС при Ne=153кВт n=1600 мин$^{-1}$:
——— серийная головка;
- - - - - - опытная головка

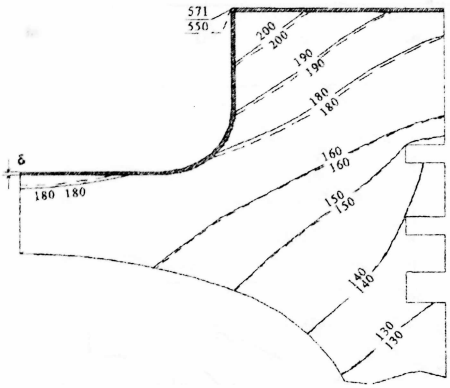



**Рис. 9. Температурное поле (°С) поршня со слоем нагара и керамики при Ne=153кВт, n=1600 мин$^{-1}$; у дизеля с серийной головкой:**
**——— δ=2мм слоя керамики;**
**- - - - - - δ=125мкм слоя нагара**

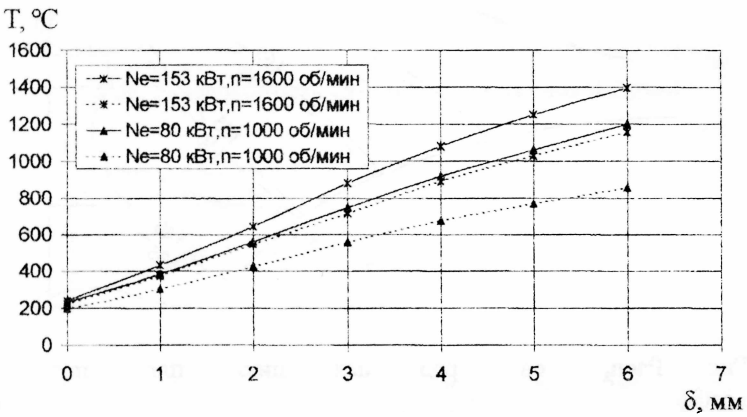



**Рис. 10. Изменения максимальной температуры поверхности слоя керамики в зависимости от толщины слоя:**
**——— серийная головка; - - - - - опытная головка**

Подписано к печати 22.12.99г. Заказ 217. Тираж 100 экз.

ООО "Фирма Блок" 107140, г. Москва, ул. Русаковская, д.1 т. 264-30-73
Изготовление брошюр, авторефератов и переплет диссертаций