

На правах рукописи

УДК 621.436

Фёдоров Вадим Анатольевич

**РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА  
РАСЧЁТА ЛОКАЛЬНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ  
НАГРУЗОК В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**

05.04.02 — Тепловые двигатели

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва — 2004

Работа выполнена в МГТУ им. Н. Э. Баумана на кафедре «Поршневые двигатели».

- Научный руководитель: — доктор технических наук  
профессор Кавтарадзе Р. З.
- Научный консультант: — кандидат технических наук  
доцент Гайворонский А. И.
- Официальные оппоненты: — доктор технических наук  
профессор Фомин В. М.  
— кандидат технических наук  
с. н. с. Попов В. П.
- Ведущая организация: — НПП «Агродизель»

Защита диссертации состоится 7 октября 2004 г. в 16.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.141.09 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н. Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.09.

Автореферат разослан «3» сентября 2004 г.

Учёный секретарь диссертационного  
совета, к. т. н., доцент



Тумашев Р. З.

2006-4  
9370

2158312

## Общая характеристика работы

**Актуальность проблемы.** Проектирование поршневых двигателей с прогрессивными технико-экономическими характеристиками, диктуемыми ужесточающимися требованиями к токсичности отработавших газов, топливной экономичности, сроку безотказной работы, связано с форсированием ДВС по среднему эффективному давлению и скоростному режиму, что приводит к росту основных параметров рабочего цикла и, как следствие, к интенсификации процессов теплопереноса во внутрицилиндровом пространстве. В свою очередь, интенсификация теплопереноса влечёт за собой значительное повышение температур и температурных градиентов в деталях, образующих камеру сгорания двигателя.

Таким образом, процесс теплообмена между рабочим телом в цилиндре двигателя и поверхностями камеры сгорания, обуславливающий уровень тепловой напряжённости деталей цилиндра-поршневой группы, является превалярующим фактором, определяющим надёжность, долговечность, условия охлаждения узлов двигателя и степень его возможного форсирования.

Решающую роль в разработке практических рекомендаций по конструкционному исполнению основных деталей, ограничивающих объём камеры сгорания, играет достоверность определения граничных условий теплообмена между рабочим телом и тепловоспринимающими поверхностями.

Поэтому анализ и углубление существующих и развитие новых расчётных методов определения локальных нестационарных тепловых нагрузок в камерах сгорания перспективных двигателей в ходе их проектирования, модернизации и доводки является актуальной проблемой современного двигателестроения.

**Цель работы:** Разработка расчётно-экспериментального метода определения локальных периодических граничных условий теплообмена между рабочим телом и поверхностями камеры сгорания поршневого двигателя.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **основные задачи:**

- разработка метода, алгоритма и программы расчёта процесса теплового деления в камере сгорания дизеля на основе экспериментальной индикаторной диаграммы с использованием экспериментально проверенных зависимостей для газовой постоянной, удельных внутренней энергии, энтальпии и теплоёмкости рабочего тела в зависимости от его параметров состояния и состава;
- разработка метода, алгоритма и программы расчёта динамического и теплового пограничных слоёв и локальных тепловых нагрузок на поверхности огневого днища крышки цилиндра быстроходного дизеля с полуразделённой камерой сгорания;

РОС НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
БАЗОВАЯ НАУКА  
С. ПЕТЕРБУРГ  
2006 РА

- разработка математической модели периодического теплообмена в цилиндре поршневого двигателя;
- создание экспериментальной установки для моделирования периодических тепловых нагрузок в поршневых двигателях, позволяющей проверить основные теоретические положения, использованные при разработке математической модели периодического теплообмена в камере сгорания;
- разработка алгоритма и программы расчёта, осуществляющей решение обратной задачи теплопроводности для неоднородной двухслойной пластины и позволяющей обрабатывать экспериментальные данные, полученные с помощью датчика теплового потока, работающего на принципе вспомогательной пластины;
- проверка достоверности разработанных алгоритмов и программ по экспериментальным данным, полученным непосредственно на дизеле 8ЧН 12/12 (КамАЗ 740.50) в условиях стендовых испытаний.

#### ***Научная новизна:***

- модифицирован метод расчёта динамического и теплового пограничных слоёв и локальных нестационарных тепловых нагрузок на поверхности камеры сгорания быстроходного дизеля в условиях радиационно-конвективного теплообмена; в частности, учтён реальный закон тепловыделения в цилиндре двигателя;
- предложен метод определения и уточнены значения эмпирических коэффициентов в  $\alpha$ -формуле, полученной в МГТУ им. Н.Э. Баумана с учётом взаимосвязи процессов тепловыделения и теплообмена в камере сгорания двигателя;
- разработан и экспериментально проверен метод прогнозирования фазового сдвига между плотностью теплового потока на поверхности стенки камеры сгорания и разностью температур рабочего тела и стенки в процессах периодического теплообмена в цилиндрах поршневых двигателей;
- получено выражение, распространяющее область применения закона теплоотдачи Ньютона на промежутки времени в цикле, когда тепловой поток в цилиндре меняет своё направление, а коэффициент теплоотдачи терпит разрыв.

#### ***Достоверность и обоснованность*** научных положений обусловлены:

- применением общих систем уравнений и фундаментальных законов гидро- и термодинамики, теории тепломассообмена, современных аналитических и численных методов реализации математических моделей;

- применением при обосновании и оценке адекватности математических моделей и построенных на их основе алгоритмов достоверных опытных данных, полученных в МГТУ им. Н.Э. Баумана с использованием современных средств и методов измерений на специальной экспериментальной установке и на полноразмерном двигателе;
- экспериментальным подтверждением приемлемой точности основных положений, лежащих в основе математических моделей, хорошим качественным и количественным согласованием расчётных и экспериментальных результатов.

*Практическая значимость* работы состоит в том, что:

- создан пакет прикладных программ, позволяющий прогнозировать нестационарные локальные тепловые нагрузки в камерах сгорания перспективных двигателей на стадии проектирования, а также оценить уровень интенсификации теплообмена при модернизации и доводке существующих дизелей;
- создана моделирующая экспериментальная установка, позволяющая проверить адекватность математической модели периодического теплообмена в цилиндре поршневого двигателя;
- разработана программа для обработки опытных данных, позволяющая определить значения нестационарной плотности теплового потока по измеренным значениям нестационарных температур, полученных с помощью датчика теплового потока, действующего на принципе вспомогательной пластины.

#### *Апробация работы*

Диссертационная работа заслушана и одобрена на заседании кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана 22 июня 2004 г.

По основным разделам диссертационной работы были сделаны доклады на:

- Юбилейной научно-технической конференции, посвящённой 70-летию кафедры судовых ДВС и дизельных установок, Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 20 сентября 2000 г.;
- Научно-технической конференции «Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса», Москва, МАДИ (ГТУ), 4–5 февраля 2003 г.;
- XIV Школе-семинаре молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, Рыбинск, РГАТА, 26–30 мая 2003 г.;
- Международной научно-технической конференции «Гидравлика (наука и дисциплина)», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 11–12 марта 2004 г.;

- Заседаниях кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2000–2004 г. г.

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы представлены в 6 печатных работах.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Она содержит 151 страницу основного текста, 65 рисунков, 1 таблицу, 10 страниц со списком литературы из 105 наименований.

## Содержание диссертации

**Во введении** обоснована актуальность проблемы создания эффективных расчётно-экспериментальных методов исследования локального периодического теплообмена в камерах сгорания поршневых двигателей. Приведена общая характеристика работы.

**В первой главе** приведён аналитический обзор публикаций, посвящённых теоретическому и экспериментальному изучению процесса локального нестационарного теплообмена в камерах сгорания поршневых двигателей. Подчёркиваются значение и особенности теплообмена в рабочем процессе двигателей. Отмечен вклад в развитие вопросов локального теплообмена в камерах сгорания, сделанный отечественными и зарубежными исследователями: Батуриным С.А., Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З., Костиним А.К., Овсянниковым М.К., Петриченко Р.М., Петриченко М.Р., Розенблитом Г.Б., Рудневым Б.И., Синицыным В.А., Стефановским Б.С., Страдомским М.В., Чайновым Н.Д., Шеховцовым А.Ф., Alkidas A.C., Annand W.J., Assanis D.N., Heywood J.B., Kornhauser A.A., Lee K.P., Lyford-Pike L.J., Overbye V.D., Pfriem H., Wendland D.W., Woschni G. и их сотрудниками.

На основе выполненного анализа опубликованных работ по заданной тематике и потребностей современного двигателестроения были определены цель и основные задачи данной диссертационной работы, изложенные выше.

**Вторая глава** посвящена разработке метода расчёта локальных нестационарных тепловых нагрузок на поверхности камеры сгорания (КС) быстрого дизеля с учётом реального закона тепловыделения.

Закон тепловыделения в цилиндре дизеля был определён с использованием лежащей в основе однозонной модели рабочего процесса системы уравнений сохранения массы и энергии, а также уравнения состояния на основе экспериментальной индикаторной диаграммы. При этом учитывалась зависимость газовой постоянной, удельных внутренней энергии, энтальпии и

теплоёмкости рабочего тела от параметров его состояния и состава смеси газов. С учётом того, что процесс активного тепловыделения протекает при закрытых органах впуска и выпуска, учитывалось изменение массы заряда в КС только за счёт подачи топлива форсункой. Скорость теплоотвода от рабочего тела рассчитывалась с использованием осреднённого по тепловоспринимающей поверхности коэффициента теплоотдачи, определённого по формуле Г. Вошни.

Был проанализирован характер тепловыделения в цилиндре дизеля КамАЗ 740.50 (8ЧН 12/12) на различных скоростных и нагрузочных режимах работы.

Расчёт радиационно-конвективного теплообмена выполнен на основе теории турбулентного пограничного слоя. Математическая модель сложного теплообмена в КС дизеля описывается системой, включающей уравнения неразрывности, количества движения, энергии, а также уравнения переноса лучистой энергии в поперечном направлении пограничного слоя:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (H_3 u) + \frac{\partial}{\partial y} (H_1 H_3 v) &= 0; \\ \rho \left( \frac{u}{H_1} \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{uv}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial y} \right) &= -\frac{1}{H_1} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{H_1^2 H_3} \frac{\partial}{\partial y} (H_1^2 H_3 \tau_r); \\ \rho \frac{u^2}{H_1} \frac{\partial H_1}{\partial y} &= \frac{\partial p}{\partial y}; \\ H_3 u \frac{\partial T}{\partial x} + H_1 H_3 v \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial}{\partial y} [H_1 H_3 (q_k + q_r + \tau_r u)]; \\ \frac{\partial E_+}{\partial y} &= \beta \kappa (\sigma_0 T^4 - E_+); \\ -\frac{\partial E_-}{\partial y} &= \beta \kappa (\sigma_0 T^4 - E_-), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $x$  и  $y$  — продольная и поперечная координаты;  $u$  и  $v$  — компоненты усреднённой турбулентной скорости, совпадающие по направлению с осями  $x$  и  $y$  соответственно;  $q_k$  и  $q_r$  — плотности конвективного и лучистого тепловых потоков;  $E_+$  и  $E_-$  — плотности потока излучения вдоль оси  $y$  и в противоположном направлении;  $\beta$  и  $\kappa$  — коэффициенты диффузности излучения и ослабления луча;  $H_1$  и  $H_3$  — коэффициенты Ламе (в случае течения газа на поверхности огневого днища крышки цилиндра  $H_1 = 1$ ;  $H_3 = x$ );  $\tau_r$  — касательное напряжение трения;  $\sigma_0$  — постоянная Стефана-Больцмана. Система уравнений (1) соответствует осесимметричной постановке задачи.

Граничные условия при этом имеют вид:

$$\begin{aligned}
y=0, \quad u=v=0, \quad \tau_T = \tau_w, \quad T = T_w, \quad E_+ = E_+(0), \quad E_- = E_-(0); \\
y = \delta_m, \quad u = u_m, \quad \tau_T = 0; \\
y = \delta_T, \quad T = T_\infty; \\
y = \delta, \quad u = 0, \quad \tau_T = 0.
\end{aligned} \tag{2}$$

Здесь  $\tau_w$  и  $T_w$  — напряжение трения в пристеночной области и температура поверхности камеры сгорания;  $T_\infty$  — температура на внешней границе пограничного слоя;  $\delta_m$ ,  $\delta_T$ ,  $\delta$  — толщины динамического, теплового пограничных слоёв и струйной области течения;  $u_m$  — скорость на внешней границе пристеночного пограничного слоя.

Пограничный слой, формирующийся на поверхностях КС рассматривался состоящим из двух областей: пристеночной и струйной, что позволило учесть различный характер изменения скорости и касательных напряжений в этих зонах. В частности, было принято, что в пристеночной области профиль скорости подчиняется универсальному логарифмическому закону, а в струйной области — закону Шлихтинга-Абрамовича. Напряжения трения для пристеночной и струйной областей определялись соответственно по формулам Блазиуса и Прандтля-Никурадзе. При этом использовалось свойство консервативности законов турбулентного пограничного слоя, установленное С.С. Кутателадзе и А.И. Леонтьевым.

Для решения поставленной задачи сложного теплообмена в цилиндре дизеля был использован метод, основанный на применении интегральных соотношений. Преимущество такого подхода заключается в устойчивости интегральных соотношений к некоторым неточностям выбора распределений скорости и температуры в пограничном слое, позаимствованных в силу отсутствия подобных зависимостей для условий камеры сгорания двигателей из фундаментальной теплофизики.

Интегральное соотношение гидродинамического пограничного слоя с учётом принятых выражений для распределения скорости и касательных напряжений трения в случае распространения турбулентной пристеночной струи на поверхности огневого днища крышки цилиндра даёт обыкновенное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\delta^{**}}{dx} = \left(1 - \frac{1}{2a}\right) \frac{1}{x} \delta^{**} + A \left(\frac{2a^2 + 3a + 1}{a}\right)^{-b} \nu^b u_0^{-b} \left(\frac{d_0}{2}\right)^{-\frac{b}{2}} x^{b/2} (\delta^{**})^{-b}. \tag{3}$$

Здесь  $\delta^{**}$  — толщина потери импульса;  $a$  — показатель в степенном законе изменения скорости;  $A$  и  $b$  — постоянная и показатель степени в формуле Блазиуса;  $d_0$  — диаметр горловины камеры в поршне;  $\nu$  — кинематическая вязкость рабочего тела. В качестве условия нетривиальности решения была задана локальная радиальная скорость  $u_0$  у кромки камеры в поршне. Чис-



ленным решением уравнения (3) было определено изменение толщины потери импульса на поверхности огневого днища (рис. 1).

Аналогичным образом из интегрального соотношения теплового пограничного слоя с учётом профиля температур, выраженного степенным законом, получаем:

$$\frac{d\delta_{\tau}^{**}}{dx} + \left[ \frac{C_w}{T_{\infty} - T_w} + \frac{1}{2x} + C_1 \frac{T_{\infty}^4 - T_w^4}{(T_{\infty} - T_w) x^{-0.5}} \right] \delta_{\tau}^{**} = C_2 x^{b/2} (\delta_{\tau}^{**})^{-b}, \quad (4)$$

где  $\delta_{\tau}^{**}$  — толщина потери энthalпии;  $Pr$  и  $Pr_i$  — диффузионное и турбулентное числа Прандтля;  $\varepsilon_w$  — степень черноты поверхности камеры сгорания;  $C_w$  — постоянная в выражении для изменения температуры поверхности огневого днища крышки цилиндра:  $T_w(x) = T_{w0} - C_w \cdot x$ ;

$$C_1 = \frac{2a^2 + 3a + 1}{a} \xi^{-a} \frac{\varepsilon_w \beta \kappa \sigma_0}{\rho c_p u_0 (d_0/2)^{0.5}};$$

$$C_2 = A \left( \frac{2a^2 + 3a + 1}{a} \right)^{-b} Pr^{-2/3} Pr_i^{-1} \xi^a \nu^b u_0^{-b} \left( \frac{d_0}{2} \right)^{-b/2} \dots$$

величины, не зависящие при данном угле поворота коленчатого вала  $\varphi$  от продольной координаты  $x$ . Здесь  $\xi$  — отношение толщин теплового и динамического пограничных слоёв.

Изменение толщины потери энthalпии на тепловоспринимающей поверхности крышки цилиндра в условиях сложного теплообмена (рис. 2) найдено путём численного решения дифференциального уравнения (4). Для определения плотности теплового потока  $q_w$  на поверхности стенки было использовано выражение, полученное на основе модифицированной аналогии Рейнольдса:

$$q_w = A \left( \frac{2a^2 + 3a + 1}{a} \right)^{-b} \rho c_p (T_{\infty} - T_w) u_m^{1-b} \nu^b Pr^{-2/3} Pr_i^{-1} \xi^a (\delta_{\tau}^{**})^b. \quad (5)$$

Локальные тепловые нагрузки на поверхности крышки цилиндра (рис. 3) были определены для различных режимов работы быстроходного дизеля КамАЗ.

*Третья глава* посвящена разработке математической модели процесса периодического теплообмена в цилиндрах поршневых двигателей, где тепловой поток от рабочего тела к стенкам имеет пульсирующий характер и меняет в течение цикла своё направление, вследствие чего в отдельные промежутки времени коэффициент теплоотдачи терпит разрыв, а закон теплоотдачи Ньютона становится непригодным.

Использование в практике расчётов периодического теплообмена в цилиндрах поршневых двигателей комплексных величин позволяет учитывать смещение во времени теплового потока на поверхности стенки и разности температур рабочего тела и поверхности (рис. 4).

Для этого периодические функции давления  $p$ , температуры рабочего тела за пограничным слоем  $T_\infty$ , тепловыделения  $x$  в цилиндре двигателя необходимо разложить в ряды Фурье, которые, как и любые тригонометрические ряды, могут быть представлены в комплексной форме. Решение уравнения Фурье-Кирхгофа, описывающего изменение температуры рабочего тела поперёк пограничного слоя на поверхности камеры сгорания, даёт комплексное выражение для пространственно-временного распределения температуры:

$$T(y, \tau) = T_\infty + (T_w - T_\infty) \operatorname{erfc} \frac{y}{2\sqrt{a\tau}} + \left\{ \tau - \left( \tau + \frac{y^2}{2a} \right) \operatorname{erfc} \frac{y}{2\sqrt{a\tau}} + y \sqrt{\frac{\tau}{\pi a}} e^{-\frac{y^2}{4a\tau}} \right\} \left[ \frac{1}{\rho c_p} \frac{dp}{d\tau} + \frac{H_u}{c_p} \frac{dx}{d\tau} \right]. \quad (6)$$

Здесь  $\tau$  — время;  $a$  — коэффициент температуропроводности рабочего тела;  $x$  — доля сгоревшего в цилиндре топлива;  $H_u$  — низшая теплота сгорания топлива;  $\operatorname{erfc}(z)$  — функция ошибок Гаусса.

Отсюда определены комплексные значения плотности теплового потока  $q_{wc}$  и коэффициента теплоотдачи  $\alpha_c$  на поверхности стенки камеры сгорания:

$$q_{wc}(\tau) = \frac{b}{\sqrt{\pi\tau}} (T_w - T_0) - 2b \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \left[ \frac{1}{c_p \rho} \frac{dp}{d\tau} + \frac{H_u}{c_p} \frac{dx}{d\tau} \right], \quad (7)$$

$$\alpha_c(\tau) = q_{wc} / (T_\infty - T_w) = |\alpha| \cdot e^{i\psi_a}, \quad (8)$$

где  $b$  — коэффициент проникновения теплоты для пограничного слоя;  $|\alpha|$  — модуль, а  $\psi_a(\tau) = \arctg [ \alpha_{\Im}(\tau) / \alpha_{\Re}(\tau) ]$  — аргумент комплексного коэффициента теплоотдачи, представляющий собой смещение во времени плотности теплового потока  $q_w$  на поверхности и разности температур  $\Delta T$  рабочего тела за пограничным слоем  $T_\infty$  и поверхности стенки  $T_w$ .

Для определения плотности теплового потока на поверхности камеры сгорания получено выражение с использованием найденных значений действительной  $\alpha_{\Re}$  и мнимой  $\alpha_{\Im}$  частей комплексного коэффициента теплоотдачи:

$$q_w(\tau) = \alpha_{\Re}(\tau) \cdot \left[ (T_{cp} - T_w) + \sum_{k=1}^{\infty} T_k \cos(k\omega\tau - \phi_k) \right] - \alpha_{\Im}(\tau) \cdot \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(k\omega\tau - \phi_k),$$

где  $T_{\text{ср}}$ ,  $T_k$  и  $\varphi_k$  — среднее значение, амплитуда и начальная фаза колебания  $k$ -ой гармоники разложения температуры газа  $T_{\infty}$  соответственно. Предложенное выражение для определения плотности теплового потока справедливо на протяжении всего рабочего цикла двигателя, включая моменты времени, когда происходит изменение направления теплового потока, а коэффициент теплоотдачи, определённый традиционным (ньютоновским) путём, терпит разрыв (рис. 5).

**Четвёртая глава** посвящена экспериментальному исследованию локального нестационарного теплообмена в цилиндрах поршневых двигателей

В лаборатории кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана при непосредственном участии автора была создана экспериментальная установка для проверки основных положений разработанной математической модели периодического теплообмена. Моделирующая установка (рис. 6) состоит из поршневой машины Стирлинга 1, электродвигателя переменного тока 2 (220 В, 100 Вт) и комплекса измерительной и регистрирующей аппаратуры. Электродвигатель соединён с поршневой машиной посредством ременной передачи 3 с возможностью изменения передаточного числа.

Со стороны горячей полости гильза цилиндра подогревается снаружи электрической спиралью 4, а со стороны холодной полости охлаждается воздухом. В торцевой части гильзы цилиндра горячей полости на расстоянии 20 мм от продольной оси установлен медно-константановый датчик 5 теплового потока ДТП-1-55, работающий на принципе вспомогательной пластины. Электрический сигнал от датчика проходит через усилитель 7 (коэффициент усиления 120) с блоком питания 6, поступает на входной разъём платы аналого-цифрового преобразователя LA2-M5PCI 8 и после дискретизации записывается для последующей обработки в последовательный файл на жёстком диске ПЭВМ 9.

Средняя температура рабочего тела контролируется с помощью выведенной в объём горячей полости стандартной термопары типа «К» 11, электрический сигнал которой подаётся на цифровой вольтметр 12, где автоматически переводится в единицы температуры (°C) и отображается на ЖК-дисплее

Давление во внутреннем контуре поршневой машины измеряется с помощью пьезоэлектрического кремниевого датчика 10 Motorola MPX5700D. Текущий угол поворота коленчатого вала регистрируется с помощью оптического маркировочного устройства, принцип действия которого основан на периодическом прерывании инфракрасного излучения, фиксируемом фотодатчиком.

Для восстановления плотности теплового потока на границе по показаниям датчика ДТП-1-55 была решена обратная задача нестационарной теп-

лопроводности для неоднородной двухслойной пластины, приводящая к интегральному уравнению Вольтерра первого рода, и составлен алгоритм обработки экспериментальных данных, представляющих собой нестационарные температуры на теплопринимающей и теплоотдающей поверхностях датчика.

Для проверки адекватности разработанного метода и алгоритма расчёта динамического и теплового пограничных слоёв и локальных нестационарных тепловых нагрузок на поверхности камеры сгорания автором были использованы достоверные результаты экспериментального исследования процесса теплообмена в цилиндре дизеля КамАЗ, полученные на кафедре «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Наряду с серийной использовалась экспериментальная головка цилиндра с улучшенной конструкцией впускного канала, обеспечивающей увеличение интенсивности вихревого движения заряда на впуске на 20 % по сравнению со стандартной конструкцией. Каждая головка цилиндра была оснащена пятью датчиками теплового потока, действующими на принципе вспомогательной пластины. В ходе проведённых исследований были определены локальные нестационарные значения теплового потока, соответствующие различным нагрузочным и скоростным режимам работы дизеля.

Сопоставление расчётных и экспериментальных данных показывает хорошее их совпадение (рис. 7 и 8).

### Основные выводы

1. Разработаны метод, алгоритм и программа расчёта процесса тепловыделения в камере сгорания дизеля на основе экспериментальной индикаторной диаграммы. Метод учитывает зависимость удельных внутренней энергии, энтальпии и теплоёмкости рабочего тела от параметров его состояния и состава. Разработанная программа позволяет исследовать характер тепловыделения на различных нагрузочных и скоростных режимах работы двигателя;
2. Разработаны метод, алгоритм и программа расчёта на основе теории турбулентного пограничного слоя локальных нестационарных тепловых нагрузок на поверхности камеры сгорания быстроходного дизеля. Расчётные результаты подтверждают ярко выраженную нестационарность и неравномерность распределения тепловых нагрузок по поверхности камеры сгорания;
3. Предложен метод расчёта коэффициентов в  $\alpha$ -формуле, полученной с учётом взаимосвязи процессов тепловыделения и теплообмена в камере сгорания двигателя. Получены уточнённые значения этих коэффициентов применительно к дизелю КамАЗ. Вычислены значения критерия взаимо-

- действия тепловыделения и теплоотдачи в камере сгорания для различных режимов работы двигателя;
4. Получено выражение, позволяющее определять с использованием комплексных значений коэффициента теплоотдачи плотность теплового потока на поверхности камеры сгорания с учётом фазового сдвига, характерного для процессов периодического теплообмена в цилиндрах поршневых машин. Данное выражение справедливо на протяжении всего рабочего цикла двигателя (включая промежутки времени, когда тепловой поток в цилиндре меняет своё направление и использование закона теплоотдачи Ньютона теряет физический смысл);
  5. При снижении частоты рабочего процесса наблюдается уменьшение смещения во времени теплового потока относительно разности температур вплоть до  $0^\circ$  поворота коленчатого вала. Увеличение частоты имеет обратный эффект и сопровождается возрастанием сдвига теплового потока  $q_w$  по отношению к разности температур  $\Delta T$ .
  6. Исследовано влияние рода рабочего тела в цилиндре поршневого двигателя на изменение сдвига фаз функций  $q_w$  и  $\Delta T$ . Показано, что при одинаковой частоте вращения коленчатого вала наибольшее значение фазового сдвига будет наблюдаться в случае использования в качестве рабочего тела воздуха, наименьшее — гелия;
  7. Создана экспериментальная установка для моделирования периодических тепловых нагрузок в цилиндре поршневого двигателя, позволяющая исследовать влияние частоты и других параметров рабочего процесса на эффект фазового сдвига между плотностью теплового потока и разностью температур рабочего тела и поверхности стенки цилиндра;
  8. Экспериментально подтверждено, что изменение теплового потока в стенку цилиндра опережает во времени соответствующее изменение разности температур среды и поверхности. Установлено увеличение фазового угла с  $12^\circ$  до  $18^\circ$  поворота коленчатого вала моделирующей установки при повышении частоты вращения с 200 до 400  $\text{мин}^{-1}$ ;
  9. Сопоставление расчётных и экспериментальных значений плотности теплового потока на поверхности крышки цилиндра дизеля 8ЧН 12/12 свидетельствует о том, что разработанные метод, алгоритм и программа расчёта локальных нестационарных тепловых нагрузок в камере сгорания, основанные на предложенной в МГТУ им. Н.Э. Баумана математической модели, адекватно отражают изменение нагрузочных и скоростных режимов работы двигателя, а также изменение интенсивности вихревого движения заряда на впуске в цилиндр.

Основные положения диссертации отражены в *следующих работах*:

1. Гайворонский А.И., Фёдоров В.А. Расчёт теплообмена во внутреннем контуре двигателя с внешним подводом теплоты с использованием комплексных значений коэффициента теплоотдачи // Двигатели двадцать первого века: Материалы российской юбилейной научно-технической конференции, посвящённой 70-летию кафедры судовых ДВС и дизельных установок. — СПб., 2000. — С. 30–31.
2. Гайворонский А.И., Фёдоров В.А. Использование функций комплексных переменных для описания фазовых сдвигов при теплообмене в полостях переменного объёма тепловых двигателей // Изв. вузов. Машиностроение. — 2001. — № 2–3. — С. 62–66.
3. Кавтарадзе Р.З., Гайворонский А.И., Фёдоров В.А. Расчёт процессов тепловыделения и локального теплообмена в камере сгорания быстроходного дизеля // Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: Материалы международной научно-технической конференции. — М., 2003. — С. 26–28.
4. Кавтарадзе Р.З., Гайворонский А.И., Фёдоров В.А. Радиационно-конвективный теплообмен в камере сгорания быстроходного дизеля // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых учёных и специалистов под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева. — М., 2003. — С. 74–77.
5. Кавтарадзе Р.З., Гайворонский А.И., Фёдоров В.А. Влияние переменности плотности на распределение температур при периодических процессах в замкнутых полостях // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Труды XIV Школы-семинара молодых учёных и специалистов под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева. — М., 2003. — С. 78–81.
6. Кавтарадзе Р.З., Гайворонский А.И., Фёдоров В.А. Применение струйной модели течения при расчёте динамического турбулентного пограничного слоя в камере сгорания быстроходного дизеля // Гидравлика (наука и дисциплина): Материалы международной научно-теоретической конференции. — СПб., 2004. — С. 108–110.

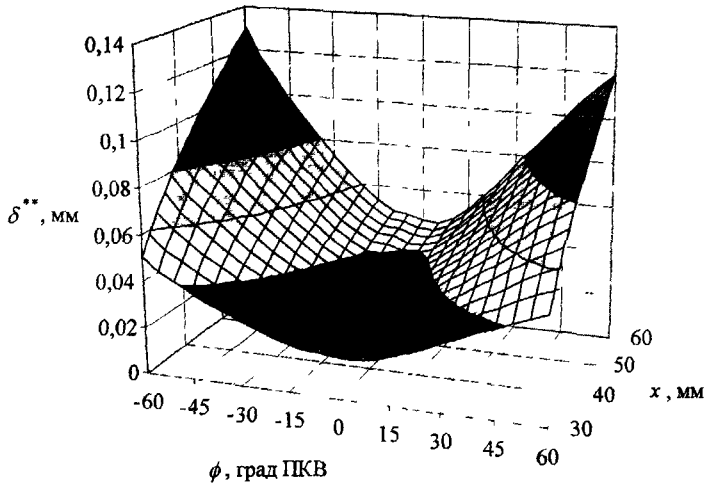


Рис. 1. Изменение толщины потери импульса на поверхности  
огневого днища крышки цилиндра дизеля 8ЧН 12/12  
( $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ;  $N_e = 161 \text{ кВт}$ )

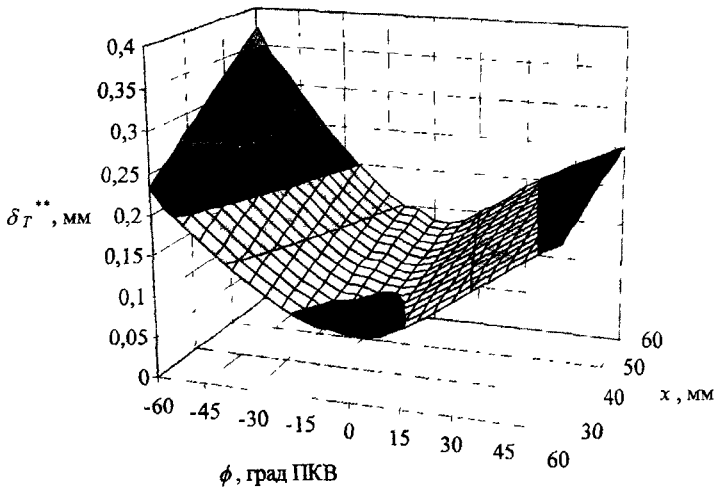


Рис. 2. Изменение толщины потери энтальпии на поверхности  
огневого днища крышки цилиндра дизеля 8ЧН 12/12  
( $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ;  $N_e = 161 \text{ кВт}$ )

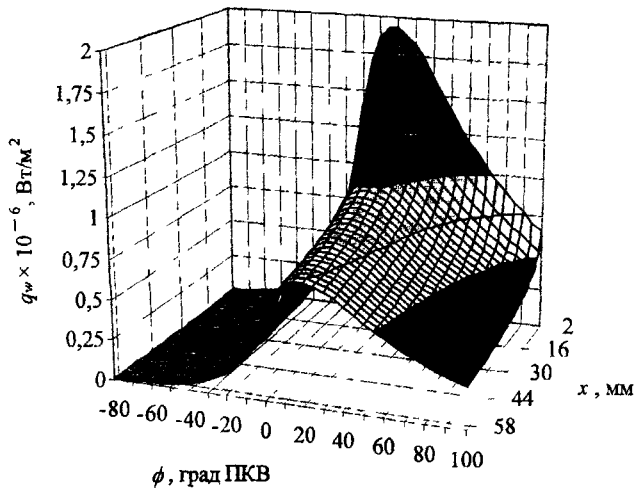


Рис. 3. Изменение плотности теплового потока при сложном теплообмене на поверхности огневого днища крышки цилиндра дизеля 8ЧН 12/12 ( $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ;  $N_e = 161 \text{ кВт}$ )

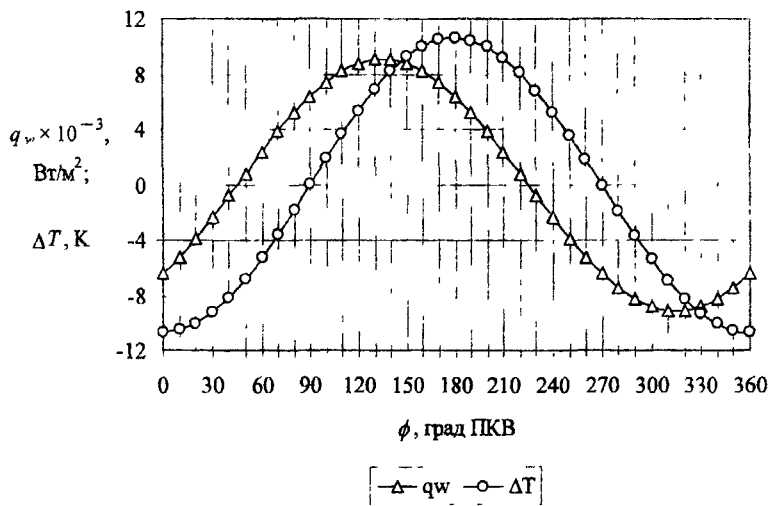


Рис. 4. Изменение плотности теплового потока в стенку и разности температур рабочего тела и поверхности (поршневое сжатие-расширение, степень сжатия  $\epsilon = 1,5$ )



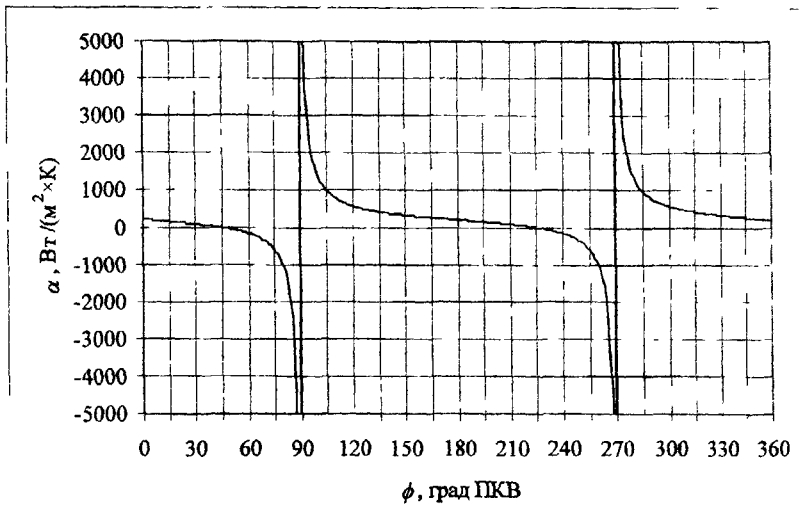


Рис. 5. Изменение коэффициента теплоотдачи, определённого традиционным (ньютоновским) путём

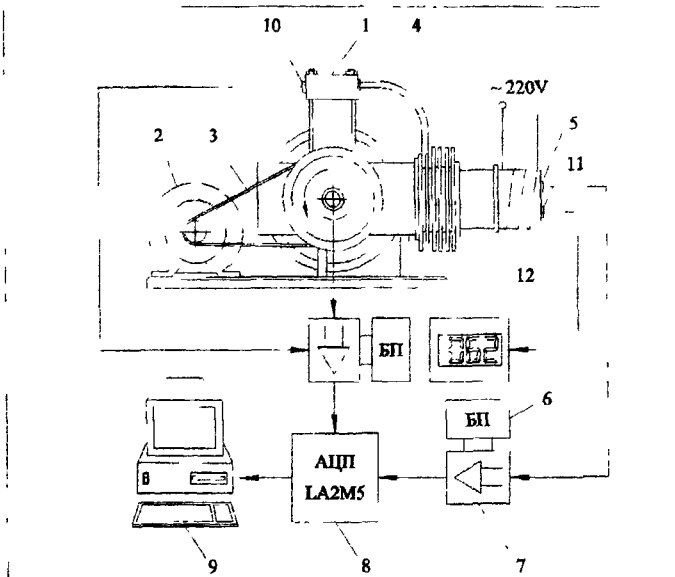


Рис. 6. Схема экспериментальной установки для моделирования периодических тепловых нагрузок на поверхности камеры сгорания поршневого двигателя

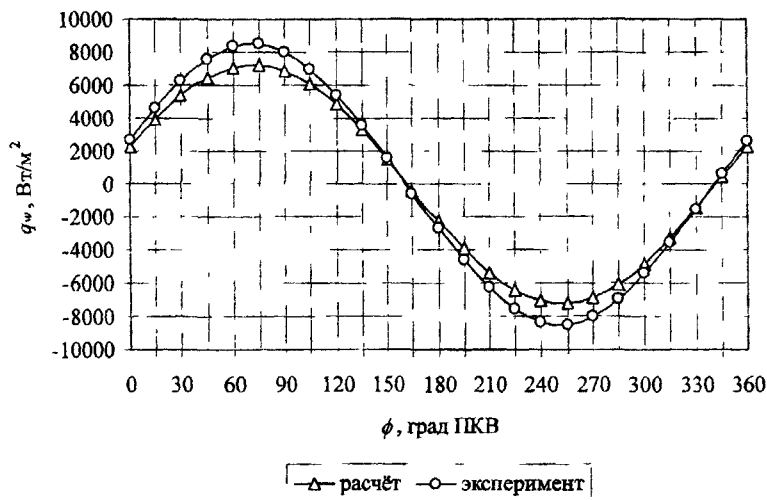


Рис. 7. Изменение плотности теплового потока в поверхность гильзы цилиндра горячей полости установки ( $n = 400 \text{ мин}^{-1}$ )

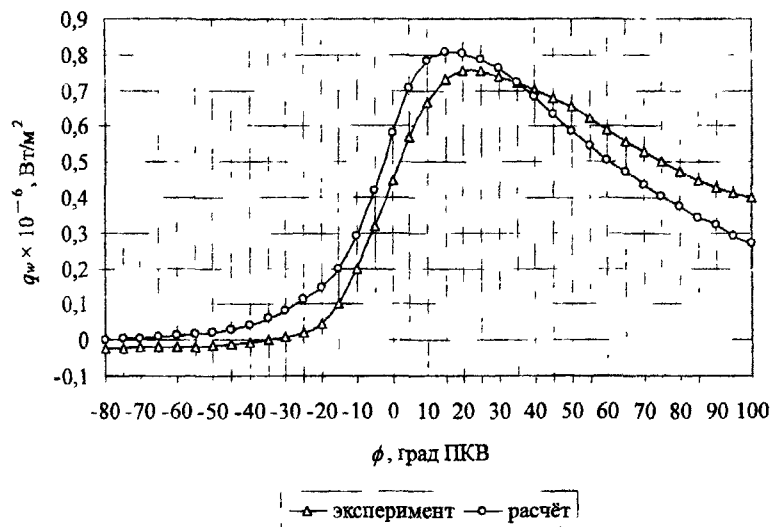


Рис. 8. Изменение плотности теплового потока в поверхность огневого днища крышки цилиндра дизеля 8ЧН 12/12 ( $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ ;  $N_e = 161 \text{ кВт}$ ; расстояние от оси цилиндра  $r = 45 \text{ мм}$ )

Подписано в печать 2.09.2004 г. Формат 60х90, 1/16.  
Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 315

---

Отпечатано в ООО "Фирма Блок"  
107140, г. Москва, ул. Русаковская, д.1. т. 264-30-73  
[www.blok01centre.narod.ru](http://www.blok01centre.narod.ru)

Изготовление брошюр, авторефератов, печать и переплет диссертаций

05.01-05.06

РНБ Русский фонд

2006-4

9370

17 СЕН 2004