

М467036

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Пятаев Сергей Минович

УДК 621.43

ГИДРОДИНАМИКА И ЛОКАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ПОЛОСТЯХ СИСТЕМ
ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВТУЛОК ЦИЛИНДРОВ ФОРСИРОВАННЫХ ДИЗЕЛЕЙ

(05.04.02 - тепловые двигатели)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена
Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени
высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Круглов М.Г.

Официальные оппоненты- д.т.н., профессор Стефановский Б.С

- к.т.н., доцент Чукаев А.Г.

Ведущее предприятие - НАМИ

Защита диссертации состоится "14" декабря 1987 г.
в 14.00 часов на заседании специализированного совета
К.053.15.05 "Тепловые машины и теоретические основы тепло-
техники" МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва,
Лефортовская наб. д. 15, факультета "Электромашинно-
строение".

С диссе
МВТУ им. Н.Э.
Автореферат

Ученны
специализир
кандидат те

Объем I п.л
Типография

г.

11467036

Актуальность проблемы. В решениях XXVII съезда и Пленумов ЦК КПСС поставлена задача осуществить реконструкцию народного хозяйства на основе научно-технического прогресса. При этом решающая роль отводится машиностроению. Двигателестроители уже к концу двенадцатой пятилетки должны резко повысить технико-экономический уровень и качество машин. При этом приходится решать ряд проблем связанных с теплонапряженностью деталей двигателей, в частности, проблему рационального охлаждения втулок цилиндров. Правильная организация процесса охлаждения втулки цилиндра улучшает тепловое состояние дизеля, экономичность его работы, показатели надежности, снижает трение и износ деталей цилиндро-поршневой группы. Поэтому создание расчетных методов оценки влияния конструктивных параметров системы охлаждения на тепловое состояние втулок цилиндров является актуальным.

Цель работы. Создание методики расчета и анализ сопряженного теплообмена в полостях охлаждения втулок цилиндров ДВС перспективных конструкций.

Методы исследования. Движение жидкости в полостях охлаждения втулок цилиндров изучалось экспериментально методами визуализации с помощью прямого моделирования. Для математического моделирования движения жидкости использовался метод конечных элементов совместно с методом Галеркина. Интенсивность теплоотдачи от втулки цилиндра в охлаждающую среду изучалась на отсеке Д-49 (ЧН 26/26) с использованием датчиков теплового потока. Обобщение результатов эксперимента осуществлялось с использованием принципа локального моделирования. Расчет теплового состояния втулок цилиндров производится методом конечных элементов путем сведения трехмерной задачи теплопроводности к двумерной за счет использования фиктивных источников теплоты. При этом учитывается пространственное распределение локальных параметров теплообмена втулки с окружающей средой.

Научная новизна.

I. Изучены закономерности движения жидкости и теплоотдачи в режиме вынужденной конвекции в полостях охлаждения втулок цилиндров ДВС.

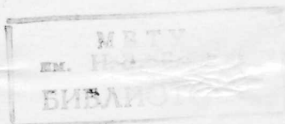
I

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1467036

Пятаев С.М. Гидродинамика и



2. Создана методика сопряженного расчета локальных параметров теплоотдачи от втулок цилиндров совместно с квазитрехмерным расчетом их теплового состояния.

Практическая ценность.

1. Разработаны программные комплексы моделирования двух- и трехмерных потенциальных течений, а также ламинарного течения жидкости на базе полных уравнений Навье-Стокса в переменных вихрь-функция тока с использованием метода конечных элементов.

2. Разработан программный комплекс расчета локальной теплоотдачи совместно с расчетом теплового состояния втулки цилиндра.

3. Сформулированы практические рекомендации по конструированию полостей охлаждения втулок цилиндров двигателей внутреннего сгорания.

Апробация работы. Диссертационная работа заслушивалась на заседаниях кафедры "Комбинированные двигатели внутреннего сгорания" МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1984, 1985, 1986 г.г. По основным результатам работы сделаны доклады на 5 Всесоюзной школе - семинаре "Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" в мае 1985 г. и на 17 и 18 "Ежегодных научно-технических конференциях по итогам НИР за учебный год кафедры и проблемной лаборатории Комбинированные двигатели внутреннего сгорания" МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1985 и 1986 годах, на отраслевой конференции "Автоматизация процессов проектирования и испытаний изделий отрасли" в ноябре 1986 г.

Внедрение результатов. Программный комплекс совместно с расчетом гидродинамики и местного теплообмена в полостях систем жидкостного охлаждения ДВС использован в НАМИ.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 3 научных трудах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов и приложений. Она содержит страниц основного текста, 40 рисунков, 1 таблицу, список использованных источников из 156 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность темы, поставлены

цель работы, задачи исследования, описаны методика исследования, научная новизна и практическая ценность.

В первой главе дана краткая характеристика условий теплообмена в полостях охлаждения втулок цилиндров (ПОВЦ) двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Описаны основные конструкции ПОВЦ ДВС, характер движения жидкости в них, условия формирования теплового пограничного слоя на охлаждаемой поверхности, режимы теплообмена в ПОВЦ, тенденции развития систем охлаждения. Рассмотрены экспериментальные методы изучения движения жидкости в ПОВЦ. Проанализированы работы В.Г.Кузнецова, В.С.Афанасьева, В.П.Смирнова, Б.С.Стефановского, Н.С.Жилко, С.П.Баранова, П.С.Тарасенко, В.В.Кораблева и др. Описаны методы расчета движения жидкости в ПОВЦ, важную роль в развитии которых сыграли работы В.Г.Кузнецова, Р.М.Петриченко, Н.И.Молодцева, М.Р.Петриченко, Л.В.Грехова и др. Рассмотрены методы расчета конвективного теплообмена и теплообмена при кипении в ПОВЦ. Этому вопросу посвящены работы Зоннекеена, В.М.Бузника, Г.Б. Розенблита, А.К.Гаврилова, П.И.Доманя, А.Л.Новенникова, А.К.Костина, Д.Б.Кузнецова, В.Г.Кузнецова, Р.М.Петриченко, В.В.Кораблева, Л.В.Грехова, Б.С.Стефановского, А.Ф.Шеховцова, Н.С.Жилко, В.Н.Зяблова и др.

Анализ выполненных исследований показывает, что остаются невыясненными некоторые особенности движения жидкости в ПОВЦ ДВС. Например, нет единства мнений относительно режима течения жидкости в пограничном слое на теплоотдающей поверхности. Имеется настоятельная необходимость создания адекватных экономических методов расчета гидродинамики в ПОВЦ с использованием ЭВМ. За исключением работы Л.В.Грехова, опубликованные зависимости расчета параметров конвективного теплообмена не учитывают динамики формирования теплового пограничного слоя. При изучении местного теплообмена в ПОВЦ не рассматривался вопрос об интенсивности теплоотдачи на входном участке.

Исходя из современного состояния вопроса и руководствуясь практическими потребностями двигателестроения поставлены следующие задачи исследования:

I. Экспериментально изучить особенности движения

жидкости в полостях охлаждения втулок цилиндров ДВС, выявить характерные картины течения.

2. Выбрать полость охлаждения втулки цилиндра перспективной конструкции.

3. Обосновать выбор математических моделей движения жидкости в ПОВЦ ДВС. Разработать на основе наиболее перспективной модели алгоритм и комплекс программ численного расчета поля скоростей.

4. Экспериментально изучить закономерности теплоотдачи в ПОВЦ выбранной конструкции.

5. Создать методику расчета теплоотдачи в ПОВЦ с использованием ЭВМ для САПР ДВС.

Во второй главе изложены результаты движения жидкости в ПОВЦ ДВС, влияния конструктивных особенностей полостей на гидродинамические эффекты при движении жидкости. Для этого была создана экспериментальная установка, позволяющая подключать различные типы съемных моделей полостей. В качестве них использованы модель полости охлаждения втулки цилиндра ИЧ 8,5/11 в масштабе 1:1, половина симметричной развертки на плоскость ПОВЦ Д-49 с различными вариантами подвода жидкости и, собственно, модель ПОВЦ дизеля Д-49 в масштабах 1:2. Изучение картины течения проводилось методом прямого моделирования на режимах автомоделности течения. Для визуализации движения использовались методы гибких нитей и трассирующих присадок.

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Движение в полостях охлаждения со сложной геометрией существенно трехмерное и сопровождается возникновением зон крупных вихрей и высокой степенью турбулентности потока. Расчеты гидродинамики и теплообмена в предположении струйности течения могут привести к грубым ошибкам. Для математического моделирования таких течений необходимы нелинейные модели.

2. Кинетическая энергия струи нагнетаемой жидкости оказывает заметное, а иногда и определяющее влияние на картину течения. Это влияние можно резко уменьшить, если направить струю не в поток жидкости, а на теплоотдающую поверхность втулки цилиндра.

3. Кривизна полости так же оказывает существенное влияние на формирование спектра течения за счет подавления развития крупных вихревых зон.

4. Движение жидкости в полостях правильной геометрии, приближенной к цилиндрической, при ее подводе нормально теплоотдающей поверхности, хотя и носит вихревой характер, не сопровождается развитием крупных вихревых зон. Для таких полостей течение носит ярко выраженный струйный характер. Здесь достигается наибольшая равномерность омывания теплоотдающей поверхности, поэтому такие конструкции полостей охлаждения представляют большой практический интерес и их можно считать перспективными.

5. Характер течения в основном объеме полостей практически на всех режимах турбулентный.

6. Термин "застойные зоны" в полостях охлаждения, часто используемый в научно-технической литературе, недостаточно полно отражает характер течения жидкости. Под "застойными зонами" будем подразумевать области только основного потока со значительно меньшими скоростями течения по сравнению с другими областями. Области замкнутого циркуляционного движения будем называть "зонами больших вихрей". Введение двух терминов подчеркивает качественно различные закономерности движения жидкости, а следовательно и теплообмена при струйном и циркуляционном обтекании.

Третья глава диссертации посвящена математическому моделированию движения жидкости в ПОВЦ ДВС, которое включает следующие этапы:

1. решение задачи потокораспределения в системе охлаждения;

2. расчет взаимодействия струи в полости охлаждения со стенкой;

3. расчет поля скоростей в остальной части полости по выбранной гидродинамической модели;

4. корректирование поля скоростей учетом вытесняющего действия динамических пограничных слоев и формирования профиля скорости.

Решение задачи потокораспределения проводится по методике Н.А.Иващенко и М.И.Рамазанова. Расчет взаимодействия струи со стенкой - по зависимостям Б.Н.Юдаева и др. Наиболь-

шее внимание уделяется этапам 3 и 4, которые наименее разработаны. Для расчета поля скоростей рассмотрены 3 уровня моделирования: двумерные и трехмерные потенциальные течения, двумерные течения вязкой жидкости, описываемые уравнениями Навье-Стокса. Для решения этих уравнений использован метод конечных элементов (МКЭ) совместно с методом Галеркина. Одним из достоинств МКЭ является его универсальность, что позволяет на основе общих программных блоков решать широкий круг задач. Это особенно важно для развития САПР ДВС. Расчеты показали, что для полостей правильной геометрии (например, типа Д-49) моделирование уже в двумерном потенциальном приближении дает удовлетворительные результаты. А для полостей сложной геометрии (например, типа ИЧ 8,5/II) удовлетворительных результатов получить не удалось. Причем, расчеты в трехмерном приближении требуют больших объемов памяти ЭВМ, а расчеты по нелинейным уравнениям вязкой жидкости в двумерном приближении — не только чрезмерных затрат машинного времени, что неприменимо для многовариантных расчетов в САПР ДВС, но и приводят к худшим результатам для полостей правильной геометрии, так как в этом случае не учитывается демпфирующее действие кривизны полости на вихреобразование. Вихреобразование автоматически отключается в потенциальном приближении. Поэтому в качестве базовой модели движения жидкости в ПОВЦ ДВС в дальнейшем используется простая и экономичная модель двумерного потенциального течения.

Для уточнения величины скорости на оси трубки тока вводятся поправки на изменение калибра канала (согласно уравнению неразрывности) и на вытесняющее действие пограничных слоев. Исследования, проведенные в ИТТФ АН УССР, показывают, что для квазиламинарных и квазитурбулентных пограничных слоев вытесняющее действие можно без внесения существенных погрешностей учесть по известным зависимостям для пограничного слоя на плоской пластине. После смыкания пограничных слоев профиль скорости аппроксимирован степенным законом $1/7$.

В четвертой главе рассматриваются результаты экспериментального исследования местной теплоотдачи в полости охлаждения втулки цилиндра отсека Д-49 (ОД-49) в режиме кон-

вективного теплообмена. Основные экспериментальные данные получены с использованием медь-константановых датчиков теплового потока, изготовленных и оттарированных в ИТТФ АН СССР и выполненных в виде устанавливаемых заподлицо с теплоотдающей поверхностью пробок диаметром 10 и толщиной 4 мм.

При измерении температур датчиками теплового потока зафиксированы пульсации температуры теплоотдающей поверхности величины не более 0,1–0,2 К. В связи с тем, что температура теплоотдающей поверхности была значительно ниже температуры насыщения, эти пульсации свидетельствуют о турбулентном режиме течения в пограничном слое. Причиной таких пульсаций может являться перемежаемость при зарождении турбулентности в окрестности стенки и проникновение вихревых комков холодного теплоносителя в пристеночную область.

Уровень локальной теплоотдачи оказался выше, чем в законе теплообмена для плоского пограничного слоя. Это объясняется совместным действием высокого уровня турбулентности ядра потока (по данным визуализации), закрутки потока при повороте трубок тока, естественной конвекции, вторичных течений, трехмерными эффектами в пограничном слое и кавитацией на теплоотдающей поверхности из-за сильной вибрации поверхности. Факт наличия кавитации заключается в образовании многочисленных каверн на поверхности втулки цилиндра ОД-49, что, согласно исследованиям В.Пфлаума и Л.Хасельмана, может приводить к резкой интенсификации теплообмена. Поверхность втулки цилиндра подвергается заводской токарной обработке. Теоретические оценки по рекомендациям Г.Шлихтинга показывают, что влиянием шероховатости на интенсивность теплообмена для рассматриваемой конструкции можно пренебречь. Тогда согласно теории локального моделирования с учетом исследований С.С. Кутателадзе и А.И.Леонтьева экспериментальные данные в области продольного омывания теплоотдающей поверхности можно представить в следующем виде

$$St = 0,0169 \cdot Re_r^{** - 0,25} \cdot Pr_f^{-0,75} \cdot (m_w/m_f)^{-0,11}, \quad (I)$$

где St – число Стентона,

Re_r^{**} – число Рейнольдса, в котором характерным размером является толщина потери энергии теплового пограничного слоя,

Pr_f – число Прандтля, m_w, m_f – величины динамической 7

вязкости при температурах стенки и ядра потока, соответственно.

Экспериментальные данные в области струйного охлаждения в окрестности критической точки падения струи на стенку при $h^* \leq 6,2$ можно аппроксимировать уравнением Б.Н.Юдаева и др.:

$$Nu_0 = 1,60 Pr_f^{1/3} Re_0^{1/2} (1 - r^*/3 h^{*0,2}) h^{*-0,11} (\mu_w/\mu_f)^{-0,14} \quad (2)$$

где Nu_0 - число Нуссельта, Re_0 - число Рейнольдса, $r^* = r/d_0$ - относительный текущий радиус от критической точки падения струи на стенку, $h^* = h/d_0$ - относительное расстояние от сопла до теплоотдающей поверхности. В качестве характерного размера использован диаметр сопла - d_0 . В формулах (1) и (2) неизотермичность учитывается согласно рекомендациям Б.С. Петухова для турбулентного и ламинарного пограничного слоя, соответственно.

В отличие от зависимостей, полученных ранее, закон теплообмена (1), учитывая специфику теплоотдачи в ДВС, консервативен к изменению граничных условий на стенке и градиенту давления на внешней границе пограничного слоя.

В пятьой главе изложены методика расчета теплоотдачи совместно с квазитрехмерным расчетом температурного поля в полостях охлаждения правильной геометрии втулки цилиндра ДВС и рекомендации по конструированию полостей охлаждения.

Граничные условия теплообмена и температурное поле втулки в рамках используемой теории взаимосвязаны. Поэтому решение ищется итерационно. На первом этапе рассчитывается поле скоростей охлаждающей жидкости по изложенной методике. На втором этапе расчета производится приближенная оценка интенсивности теплообмена со стороны охлаждения вдоль каждой трубки тока по критериальному уравнению для турбулентного пограничного слоя на пластине и тепловая нагрузка на внутреннюю поверхность втулки цилиндра по методике Е.Е. Квасова. На третьем этапе расчета моделируется температурное состояние втулки цилиндра. Опыт расчетов показывает, что прямой трехмерный расчет температурного состояния втулки цилиндра теп-

ловозного дизеля требует слишком больших затрат машинного времени. Поэтому для уменьшения времени счета использовалась процедура сведения трехмерной задачи к двумерной, разработанная в МВТУ им. Н.Э.Баумана Н.А.Ивашенко и Н.Д.Чайновым применительно к расчету теплонапряженного состояния крышек цилиндров ДВС. Для этого базовая поверхность втулки цилиндра условно разворачивается на плоскость. При симметричной конструкции полости охлаждения расчет производится только для ее половины. Далее в получившейся плите переменной толщины базовая плоскость разбивается конечно-элементной сеткой, согласованной с конечно-элементной моделью полости охлаждения. Распределение температуры по толщине каждого элемента аппроксимируется полиномом второй степени. Тогда с помощью известной процедуры можно свести решение трехмерной задачи теплопроводности к двумерной в базовой плоскости с использованием фиктивных источников теплоты и с учетом пространственного распределения граничных условий теплообмена, а затем, согласно принятой аппроксимации, восстановить значения температур и плотностей теплового потока на теплопринимающей и теплоотдающей поверхностях. Полученное поле температур является первым приближением. Оно недостаточно отражает реальное распределение параметров охлаждения, так как не учитывает динамику формирования теплового пограничного слоя и особенностей теплообмена в полостях охлаждения ДВС, а также реальное распределение параметров теплового нагружения.

Поэтому на 4 этапе производится уточнение параметров теплообмена. Для этого интегрированием интегрального соотношения энергии для плоского теплового пограничного слоя получено выражение для расчета числа Рейнольдса вдоль трубки тока в виде:

$$Re_{\tau}^{**} = \frac{1}{\Delta T_i} \left(\frac{0,02H}{\nu} \rho_{\tau_i}^{0,75} \int_0^{x_i} \Delta T^{1,25} u_m (m_w/m_{\tau})^{-0,11} dx \right)^{0,8}, \quad (3)$$

где ΔT_i – местный температурный напор, ν – кинематическая вязкость, x_i – длина линии тока от критической точки падения струи на стенку до точки i , u_m – скорость на оси трубки тока. Тогда, решая (3) с помощью численного интегрирования на конечно-элементной сетке и подставляя результат

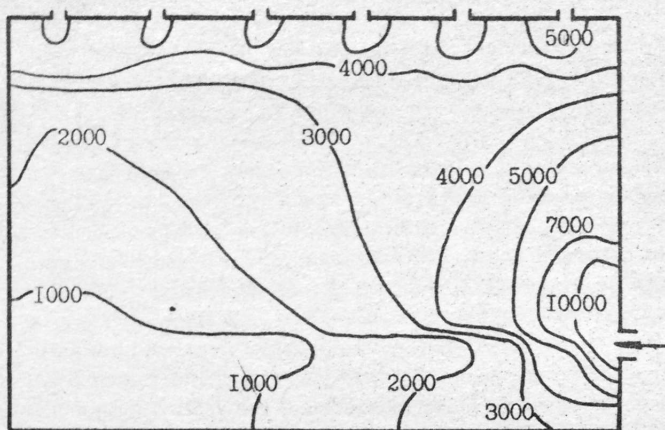


Рис. 1 Поле локальных коэффициентов теплоотдачи $[\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}]$ от втулки цилиндра ОД-49 в охлаждающую воду

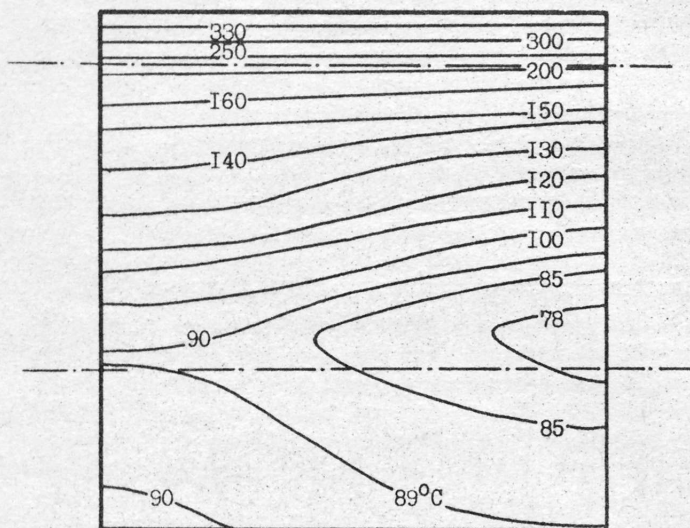


Рис. 2 Температурное поле внутренней поверхности левой половины втулки цилиндра при $Re = 1,81 \text{ МПа}$. — — — — — верхняя и нижняя границы полости охлаждения

в (I), уточняем величину коэффициента теплоотдачи в произвольной точке $\dot{i}$. После уточнения параметров теплового нагружения повторяем расчет температурного состояния втулки цилиндра. Опыт расчетов показывает, что для достижения точности 0,1 К достаточно 4 итерации.

На 5 этапе выделяются зоны кипения. Расчет теплоотдачи в этих зонах производится по формуле Д.Б.Кузнецова с корректировкой решения по аппроксимационной формуле С.С. Кутателадзе. На рис. 1, 2 и 3 представлены результаты расчета полей локальных коэффициентов теплоотдачи в охлаждающую жидкость, температур внутренней поверхности и тепловых потоков ОД-49 при $P_0 = 1,81$ МПа, температуре охлаждающей жидкости на входе 70°C и расходе теплоносителя $5,19 \text{ м}^3/\text{ч}$ на левой (со стороны патрубка подвода жидкости) симметричной по конструкции и тепловой нагруженности половине втулки цилиндра. Скачок интенсивности теплоотдачи на горизонтали, проходящей незначительно выше патрубка подвода жидкости, объясняется скачком скорости из-за резкого изменения проходного сечения полости. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Максимальная погрешность расчета наблюдается в зоне непосредственно над полостью охлаждения и составляет 10°C . Завышение значения температуры связано со схематизацией геометрии втулки при ее замене эквивалентной плитой переменной толщины и погрешностями расчета граничных условий.

Процесс проектирования на основе разработанного программного комплекса можно представить состоящим из отдельных циклов, многократно повторяемых на различных уровнях сложности и детализации. На первом этапе цикла определяются геометрические размеры полости охлаждения. На втором рассчитываются расход теплоносителя через полость, поле локальных скоростей и моделируется температурное и тепловое состояние втулок цилиндров. На третьем этапе проводится изучение соответствия расчетных параметров температурного состояния втулок цилиндров техническим условиям. Если соответствие не достигнуто, то цикл повторяется.

К настоящему времени на практике охлаждение втулок цилиндров проводится по принципу снижения максимальных тем-

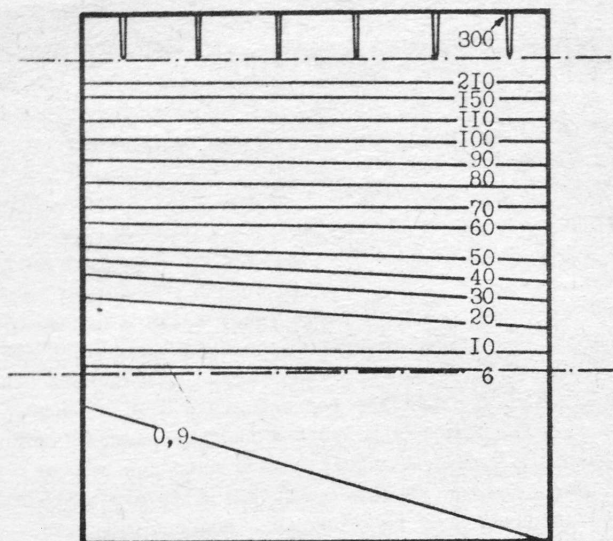


Рис. 3 Распределение плотности теплового потока $[кВт/м^2]$ на левой половине внешней поверхности втулки цилиндра ОД-49: — — — — — границы полости охлаждения. Над полостью охлаждения — плотность тепловых потоков на условной цилиндрической поверхности, ограниченной с внешней стороны переливными отверстиями.

ператур. Это приводит к чрезмерно заниженным температурам нижней части зеркала цилиндра, что обуславливает большие потери на трение поршня и поршневых колец о втулку, которые составляют в ДВС примерно 40 % всех механических потерь. При жидкостной смазке снижение потерь на трение можно достичь для конкретного масла путем уменьшения его вязкости за счет повышения температуры в сдвиговом слое. Однако чрезмерное уменьшение вязкости влечет за собой уменьшение толщины смазочного слоя, появление участков с полужидкостной смазкой, возрастание сил трения и повышение износа.

Тогда в качестве оптимального охлаждения будем принимать такую организацию теплообмена, при которой температура зеркала цилиндра практически постоянная по высоте хода поршневых колец и ограничивается сверху термостойкостью используемого масла и снизу завышенными потерями на трение и теплообмен. Отсюда с учетом типичной эпюры тепловой нагрузки необходимо обеспечить интенсивный теплообмен в верхней части полости и заниженный в нижней. Известно, что наибольшая интенсивность теплообмена наблюдается на начальном участке теплового пограничного слоя, поэтому подвод жидкости сверху, а отвод снизу улучшил бы тепловое состояние втулок цилиндров. При этом надо стремиться к равномерности подвода и отвода теплоносителя и решить проблему отвода пара и выделившегося воздуха из верхней части полости. Представляют большой практический интерес мероприятия по уменьшению размера полости охлаждения по высоте. При этом для избежания перегрева нижней части втулок цилиндров, если это необходимо, можно организовать масляное охлаждение. Повышение температуры в нижней части втулок цилиндров, если это необходимо, можно достигнуть и разделением полости охлаждения на несколько отделений с помощью установки горизонтальных перегородок, резко уменьшающих интенсивность циркуляции жидкости в нижних отделениях. Использование раздельного охлаждения втулок и крышек цилиндров хотя и усложняет конструкцию системы охлаждения, позволяет более эффективно воздействовать на поля температур обеих деталей. Следующим подходом, приближающим к оптимальному охлаждению, является управление интенсивностью теплообмена полем местных скоростей жидкости за счет изменения локального проходного сечения для потока. При этом для избежания отрыва потока изменение проходного сечения не должно быть резким. Увеличению теплоотдачи в верхней части втулок цилиндров у многих дизелей способствует возникновение поверхностного кипения. В докризисной области при кипении увеличение величины плотности теплового потока автоматически приводит к интенсификации теплообмена. Теплоотдача в режиме пузырькового кипения в меньшей степени определяется полем скоростей, чем при конвективном теплообмене. Поэтому теплообмен в этом случае организован равномернее, чем при конвек-

тивном теплообмене. Интенсификацию теплообмена можно осуществить и использованием обретенных поверхностей, созданием искусственной шероховатости, установкой проволоки, диафрагм, шайб, стержней, созданием закрутки потока. Известно, что при этом теплоотдача возрастает в значительно большей степени, чем энергетические затраты на прокачку теплоносителя. Использование струйного охлаждения позволяет поднять величины местных коэффициентов теплоотдачи в 3-5 раз. Большую популярность получает охлаждение верхней части втулки цилиндров с помощью системы каналов. Такие конструкции позволяют сочетать высокую интенсивность охлаждения верхней части втулки цилиндра с ее повышенной жесткостью. Важное влияние на интенсивность охлаждения оказывают физические свойства жидкости. Так, использование смазочного масла для охлаждения втулок цилиндров позволяет снизить эмиссию тепла и шума.

В приложении представлены схемы алгоритмов расчета гидродинамики охлаждающей жидкости в двух- и трехмерном потенциальном приближении, решения уравнений Навье-Стокса методом конечных элементов, а также расчета теплового состояния втулок цилиндров ДВС.

ВЫВОДЫ

1. Сравнительные расчеты по зависимостям, обобщающим экспериментальные данные по теплоотдаче в ДВС, приводят к чрезмерно большому разбросу величин коэффициентов теплоотдачи. Таким образом, обобщение экспериментальных данных в рамках теории подобия для осредненного теплообмена не позволяет распространить эти зависимости, отличные от исследованных. Экспериментальные данные по конвективному теплообмену необходимо обобщать в виде законов теплообмена, учитывающих динамику формирования теплового пограничного слоя и консервативных к изменению граничных условий на стенке и градиенту давления.

2. Результаты изучения гидродинамики в ПОВЦ ДВС показали, что на картину течения наибольшее влияние оказывает геометрия полости и организация подвода и стока жидкости. При подводе жидкости нормально теплоотдающей поверхности струя оказывает значительно меньшее влияние на дальнейшее

развитие потока, чем при тангенциальном подводе, так как ее кинетическая энергия при ударе о стенку переходит в потенциальную и далее опять в кинетическую уже более равномерного потока, растекающегося по стенке. Если подвод организован тангенциально в полость, то кинетическая энергия струи определяет картину течения в полости малой кривизны и большой ширины. При анализе произвольной картины течения в полости охлаждения целесообразно выделять область основного пристенного струйного потока, зоны крупных вихрей (области почти замкнутого циркуляционного течения) и застойные зоны (области, где скорости течения значительно меньше чем в основном потоке).

3. Разработаны программные комплексы расчета двух- и трехмерных течений жидкости методом конечных элементов в потенциальном приближении, а также расчета двумерных течений вязкой жидкости по уравнениям Навье-Стокса с использованием процедуры установления. На базе этих комплексов проведена серия расчетов по выявлению возможности моделирования движения жидкости в полостях охлаждения втулок цилиндров ДВС. Сравнение расчетных с экспериментальными данными показало, что моделирование в рамках теории потенциала позволяет удовлетворительно **описывать** реальное трехмерное движение жидкости в полостях охлаждения правильной геометрии, приближенной к цилиндрической при организации подвода теплоносителя нормально теплоотдающей поверхности. При этом достаточно даже двумерного потенциального приближения на развертке полости охлаждения. Поле **скоростей** необходимо корректировать учетом изменения калибра канала по длине линии тока, вытесняющего действия пограничных слоев и формирования профиля скорости. Хорошие аппроксимационные способности потенциального решения объясняются демфирующим действием кривизны полости на развитие крупных вихревых зон. При этом потенциальное решение приводит к неверным результатам при моделировании течений в полостях охлаждения сложной геометрии.

4. Использование полостей правильной геометрии позволяет не только эффективно рассчитать гидродинамику, но и сформировать более равномерный теплоотвод и снизить зат-

рат энергии на прокачку теплоносителя по сравнению с полостями с крупными вихревыми зонами.

5. Экспериментальные данные по пульсации температуры стенки и изменению местных параметров теплоотдачи по длине линии тока показали, что режим течения на основной площади теплоотдающей поверхности турбулентный.

6. Получен экспериментальный закон конвективного теплообмена в полостях охлаждения втулок цилиндров ДВС.

7. Сформулированы направления по совершенствованию полостей охлаждения втулок цилиндров ДВС. При этом поставлена цель выравнивания температуры зеркала цилиндра для уменьшения его коробления от тепловых напряжений и поддержание ее на необходимом уровне для повышения надежности работы цилиндро-поршневой группы и уменьшения трения поршня и колец о втулку цилиндра. Цель достигается различными путями формирования требуемого распределения параметров местного теплообмена и интенсификации теплообмена до требуемого уровня.

8. Создана методика расчета теплообмена в полостях охлаждения втулок цилиндров правильной геометрии совместно с расчетом теплового и температурного состояния втулок цилиндров, позволяющая произвести многовариантные расчеты на ЭВМ и подобрать полость, обеспечивающую охлаждение втулки.

Основные положения диссертации отражены в работах:

1. Иващенко Н.А., Пятаев С.М. Применение метода конечных элементов при исследовании гидродинамики полостей охлаждения двигателей внутреннего сгорания // Современные проблемы газодинамики и пути повышения эффективности энергетических установок: Тез. докл. 5 Всес. школы-семинара. - М.: 1985. - С. 90.

2. Круглов М.Г., Иващенко Н.А., Пятаев С.М. Влияние граничных условий для вихря на стенке на решение уравнений Навье-Стокса // Известия вузов. Машиностроение. - 1986. - № 6. - С. 94-97.

3. Круглов М.Г., Иващенко Н.А., Пятаев С.М. Движение жидкости в полостях охлаждения втулок цилиндров двигателей внутреннего сгорания/МВТУ им. Н.Э.Баумана. - М., 1986. - 44 с. - Деп. в НИИ Информэнерго 20.12.86, № 343-ЭМ.

