

М237897
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

Николай Антонович ИВАЩЕНКО

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ
ФОРСИРОВАННЫХ ДИЗЕЛЕЙ

(05.04.02 — Тепловые двигатели)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



1237897

Иващенко Н.А. Исследования

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор Вырубов Д. Н.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
профессор Иванченко Н. Н. (ЦНИДИ),
кандидат технических наук Насыров Р. А. (ЦНИИ МПС).

Ведущее предприятие, указанное решением Совета.

Автореферат разослан « » 1974 г.

Защита диссертации состоится « » 1974 г.
на заседании Совета факультета «Энергомашиностроение»
МВТУ им. Н. Э. Баумана.

С диссертацией ознакомлены члены Совета факультета МВТУ.

Ваши отзывы и предложения по диссертации просим направлять по адресу: Москва, Бауманская ул., д. 5, в кабинет секретаря Совета факультета.

Ученый секретарь
к. т. н., Э. А.

M237897

Форсирование двигателей внутреннего сгорания по среднему эффективному давлению и оборотам приводит к росту тепловых и механических нагрузок на их детали, что вынуждает проводить исследования, направленные на изучение этих нагрузок и их последствий для отыскания эффективных путей ограничения роста тепловых и механических нагрузок, а также разработки мероприятий, обеспечивающих требуемые показатели надежности, долговечности и экономичности. В условиях научно-технической революции предъявляются повышенные требования к срокам создания новых машин, что стимулирует разработку и применение новых методов проектирования, исследования и доводки дизелей.

Эти обстоятельства приводят к возрастанию роли методов предварительного анализа работоспособности деталей, узлов и агрегатов проектируемых дизелей при ожидаемых условиях их эксплуатации.

Диссертация посвящена разработке комплексного метода расчетного определения и проведению исследования тепловой напряженности форсированных дизелей, включающего определение уровня тепловой нагрузки, полей температур, деформаций и напряжений наиболее напряженных деталей цилиндра - поршневой группы.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения.

В главе I рассмотрены основные проблемы, возникающие при форсировании дизелей по среднему эффективному давлению, дан анализ работ, посвященных изучению влияния параметров рабочего процесса, конструктивных, регулировочных и эксплуатационных факторов на тепловое и напряженное состояние деталей.

Обобщение работ, выполненных в ЦНИДИ, ЦНИИ МПС, МВТУ, ЛПИ, КТЗ и других организациях по изучению дефектов, механизма и характера разрушения поршней, клапанов, втулок и крышек цилиндров показывает, что на надежность и долговечность этих деталей существенное влияние оказывает уровень температур и температурных напряжений, характер режима работы, тип напряженного состояния деталей, явления ползучести и релаксации, конструктивные и технологические факторы, комплекс теплофизических и физикомеханических свойств материалов.

Анализ факторов, оказывающих влияние на тепловую напряженность деталей дизеля, показал, что оценить ее на стадии проектирования можно только в результате комплексного анализа особенностей предполагаемой организации рабочего процесса и определяемых ими уровней тепловой и силовой нагрузок, температурного, деформированного и напряженного состояний деталей, состояния охлаждающих агентов, состояния напряжений и особенностей конструкции. Такой анализ может быть выполнен различными методами: по условным критериям теплонапряженности, аналитическими методами и методом математического моделирования.

Анализ особенностей этих методов показывает, что на стадии

19237897

проектирования дизелей наиболее эффективным является метод дискретного (численного) математического моделирования, позволяющий на системе взаимосвязанных моделей решать различные задачи, возникающие при проработке вариантов конструкции и способов организации рабочего процесса. В отличие от аналитических методов, которые применимы для весьма ограниченного круга задач с внутренней и внешней линейностью при простых граничных условиях, численное моделирование позволяет решать более сложные задачи с произвольными граничными условиями.

В двигателестроении накоплен опыт исследования на изолированных математических моделях рабочего процесса, теплопроводности и напряженного состояния. Такой метод исследования сказался на структуре разработанных моделей, которые плохо приспособлены для взаимодействия друг с другом, что затрудняет проведение комплексных многовариантных исследований.

Исходя из необходимости дальнейшего развития методов расчетного определения уровней тепловой напряженности поставлена задача разработки метода комплексного исследования тепловой напряженности на системе взаимосвязанных математических моделей. Анализ возможностей методов, которые могут быть использованы при разработке алгоритмов, описывающих движение тепла, напряженное и деформированные состояния в системах деталей, находящихся в тепловом и силовом взаимодействиях, позволяет заключить, что метод конечных элементов (МКЭ) обладает несомненными преимуществами перед другими методами вследствие универсальности и перспектив развития. Кроме того, общность математических процедур при решении задач различных классов позволяет унифицировать математические модели и программное обеспечение. Что же касается основного недостатка метода — большого объема исходной информации, — то он окупается полнотой получаемых результатов и может быть частично устранен программным обеспечением операций подготовки исходной информации и развитием внешних устройств ЭВМ.

Во II главе работы содержится методика расчета двумерных стационарных и нестационарных температурных полей в деталях двигателей, форма и тепловая нагрузка которых могут в первом приближении считаться осесимметричными или плоскими.

Для нахождения распределения температур в твердом теле с заданным законом теплообмена на его поверхности используется метод конечных элементов, являющийся разновидностью вариационных методов решения.

Вариационные методы основаны на замене краевой задачи эквивалентной **вариационной задачей**. Для нахождения стационарного распределения температур в твердом теле необходимо найти последовательность функ-

И. И. З. 1/1382
БИБЛИО КА

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

ций, приводящую к минимуму функционала:

$$\Phi = \iiint_V \left(\frac{1}{2} \lambda (g \nabla^2 T)^2 - f T \right) dv + \int_F q T df + \frac{1}{2} \int_F \alpha T^2 df$$

где λ - коэффициент теплопроводности, T - температура, f - интенсивность распределенных источников тепла, действующих в объеме тела V . Последние два интеграла вычисляются по поверхности тела F , на который теплообмен описывается соотношением общего вида:

$$\sum_{p=1}^3 \lambda \frac{\partial T}{\partial x_p} + q + \alpha T = 0$$

где α - коэффициент теплоотдачи, $q = -(q_0 + \alpha T_2)$, q_0 - поток тепла на поверхности тела, T_2 - температура внешней среды.

Для построения минимизирующей последовательности функций область, в которой ищется распределение температур, представляется системой элементов, имеющих конечные размеры; выбирается вид координатной функции, описывающей однозначно распределение температуры в элементе; координатная функция выражается через значения температуры узлов элемента. Значения температуры в узлах принимаются за основную систему неизвестных. Процедура минимизации функционала по отношению к основной системе неизвестных приводит к системе линейных алгебраических уравнений:

$$[A] \begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix} = \{R\}$$

где n - число узлов дискретно-элементного представления, $[A]$ - матрица теплопроводности системы элементов.

Методом конечных элементов можно эффективно решать нестационарные задачи теплопроводности с использованием модифицированного функционала и дискретно-элементного представления области системой конечных элементов.

Процедура минимизации модифицированного функционала приводит к системе дифференциальных уравнений в частных производных:

$$[A] \begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix}_\tau + [G] \begin{Bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} \\ \vdots \\ \frac{\partial T_n}{\partial \tau} \end{Bmatrix}_\tau = \{R\}_\tau$$

где $[G]$ - матрица теплоемкости системы элементов.

Полученная система уравнений при задании начальных и граничных условий может быть решена подходящим численным методом, что при большем числе узлов дискретно-элементного представления области сопряжено с известными трудностями. Для инженерных расчетов приемлем более простой способ, основанный на простейшей разностной аппроксимации $\frac{\partial T}{\partial \tau}$

в интервале времени $\Delta\tau$. Тогда на каждом временном слое можно записать:

$$[\tilde{A}] \begin{Bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{Bmatrix}_\tau = \{\tilde{R}\}_\tau$$

Используя это матричное уравнение, можно, начиная с начального распределения температуры, получить приближенное решение краевой задачи.

Рассмотренные методы позволяют учитывать произвольный характер изменения параметров теплообмена как во времени, так и по тепловоспринимающим поверхностям в виде граничных условий I, II, III родов и их комбинаций. Кроме того, дискретность задания свойств области естественным образом включает в рассмотрение и случаи контактного теплообмена на сопрягаемых поверхностях систем деталей. Случай идеального контакта не требует пояснений, так как он подразумевается в формулировке МКЭ. Учесть условия реального контакта можно заменив зону контакта слоем элементов, проводимость которого равна проводимости контактного перехода. Второй способ заключается в представлении зоны контакта двойным рядом узлов, связанных условием контактного теплообмена. Выбор метода зависит от характера решаемых задач.

Температурные поля деталей двигателей являются нестационарными и пространственными и для их определения необходимо решать пространственные задачи нестационарной теплопроводности с внутренней и внешней нелинейностью. Однако при такой постановке задачи возникают затруднения практического характера даже при использовании мощных ЭВМ.

Для такой геометрически сложной детали, как крышка цилиндров, со сложными процессами теплообмена на ее поверхностях, для получения достоверных результатов требуется большое количество элементов и вытекающее отсюда большое количество исходной информации (логических, геометрических и теплофизических характеристик элементов, параметров теплообмена). Поэтому до разработки устройств и средств, обеспечивающих автоматическую или полуавтоматическую подготовку и контроль исходных данных, не следует ожидать широкого применения в инженерной практике МКЭ к решению сложных пространственных задач теплопроводности и целесообразны поиски упрощенных методов определения пространственного распределения температур. В данной работе предложен упрощенный метод определения пространственного температурного поля в днище крышек цилиндров, которые в первом приближении можно представить в виде плиты переменной толщины с отверстиями под форсунку, клапаны. В этом случае появляется возможность при использовании специальных элементов призматического типа с теплообменом на основаниях и гранях и концепция фиктивных источников тепла, распределенных по объему элемента, учесть пространственный характер движений тепла в

днище крышки, используя двумерное дискретно-элементное представление днища и программы для расчета двумерных температурных полей. В этом случае выбирается профиль температуры по толщине элемента, интенсивность фиктивного объемного источника тепла выражается через параметры теплообмена на основаниях элемента и температуры срединной плоскости элемента:

$$f_e = f_c(t, \lambda, \alpha_i, T_{2i}, q_{0i}) + f_v(t, \lambda, \alpha_i)$$

где t - толщина элемента, λ - коэффициент теплопроводности материала, α_i , T_{2i} , q_{0i} - коэффициент теплоотдачи, температура среды и тепловой поток на i -ом основании элемента ($i = 1, 2$). Полученное выражение интенсивности фиктивного источника тепла подставляется в выражение эквивалентного функционала и отыскивается его минимум. Эквивалентный функционал в этом случае несколько видоизменяется:

$$\Phi = \iiint_G \left(\frac{1}{2} \lambda (\text{grad } T)^2 - f_c T - f_v T^2 \right) dG + \int_L q L dL + \frac{1}{2} \int_L \alpha T^2 dL$$

где G - область интегрирования, L - ее граница.

После нахождения стационарного распределения температуры в базовой (срединной) плоскости днища, удовлетворяющего минимуму эквивалентного функционала, рассчитываются температуры в других плоскостях днища, используя принятый профиль температуры по толщине элемента.

Рассмотренная методика приближенного определения пространственного распределения температур в днище крышки позволяет выполнить моделирование поля температур всей крышки, представив ее в виде системы тел простой формы (плиты, стержни, тела вращения), с соответствующими условиями теплового взаимодействия в сочленениях.

Анализ особенностей процедуры расчета двумерных температурных полей методом конечных элементов и выполненная оценка точности путем решения контрольных задач показали, что для технических расчетов достаточно линейная аппроксимация поля температур в элементе (за исключением профиля температуры по толщине элемента при расчете температурного поля днища крышки, где выгоднее применять параболический профиль). Для повышения точности моделирования температурных полей в местах резкого изменения формы тела и интенсивности теплообмена на ее поверхностях необходимо применять элементы меньших размеров. В этом случае повышается точность расчета как вследствие лучшей аппроксимации действительного поля температуры, так и вследствие лучшей аппроксимации границы тела и распределения параметров теплообмена на ней. Погрешность моделирования нестационарных температурных

полей при использовании простейших разностных аппроксимаций зависит от величины первых шагов по времени, которые для повышения точности целесообразно уменьшать.

В III главе приведена методика расчета полей перемещений и напряжений методом конечных элементов. В работе использована разновидность МКЭ в виде матричного метода перемещений, основанного на принципе минимума полной потенциальной энергии системы. Процедура минимизации полной потенциальной энергии системы по отношению поля перемещений узлов дискретно-элементного представления тела формально совпадает с процедурой минимизации функционала задач теплопроводности и приводит к системе линейных алгебраических уравнений, порядок которой равен произведению числа степеней свободы одного узла на число узлов системы:

$$[A] \begin{Bmatrix} \delta_1 \\ \vdots \\ \delta_n \end{Bmatrix} = \{R\} - \{F\}_g - \{F\}_{p,\tau} - \{F\}_{\varepsilon_0}$$

где $[A]$ - матрица жесткости системы элементов; $\{\delta\}$ - вектор перемещений узлов; $\{R\}$ - вектор внешних сосредоточенных усилий, приложенных в узлах; $\{F\}_{p,\tau}$, $\{F\}_g$ - векторы узловых усилий, статически эквивалентных распределенной внешней нагрузке и массовым силам, соответственно; $\{F\}_{\varepsilon_0}$ - вектор узловых усилий, статически эквивалентных напряжениям, вызванным начальными деформациями.

Решение этой системы уравнений с учетом граничных условий в перемещениях позволяет найти систему перемещений $\{\delta\}$, при которой полная потенциальная энергия упругого тела приближается к минимальному значению. После этого производится расчет деформаций и напряжений в каждом элементе. Расчет термоупругих напряжений осуществляется с использованием концепции начальных деформаций. Такой прием при определении температурных напряжений фактически означает замену влияния температурного поля действием фиктивных объемных и поверхностных сил. Для реализации в расчетной схеме условий взаимодействия сопряженных деталей в работе получены соотношения для наиболее характерных для деталей ДВС видов нагрузки.

Для проверки методики расчета выполнена серия решений контрольных задач, охватывающая осесимметричные и плоские задачи, различные варианты нагружения, детали с криволинейными внешними очертаниями и геометрическими концентраторами, задачи с разрывами компонентов напряжений на некоторых гиперплоскостях. Проверка показала, что при выполнении условий адекватности моделей реальным системам (достаточно близкая аппроксимация границ тела и граничных условий, близкая аппроксимация полей перемещений координатными функциями, выполнение условий неразрывности деформаций) методика позволяет с высокой

точностью определять поля перемещений и напряжений.

Для исследования напряженного состояния в зонах детали с концентраторами напряжений отработана методика последовательного решения задачи в два этапа. На первом этапе с использованием полного дискретно-элементного представления детали рассчитываются поля температур, перемещений и напряжений. На втором этапе зона детали с концентратором напряжений заменяется локальным дискретно-элементным представлением.

В узлах, лежащих на границе локальной зоны, задаются перемещения и температуры, полученные расчетом с использованием полного представления; этот прием позволяет лучше использовать возможности ЭВМ и программ на каждом этапе расчета, используя минимально возможные размеры элементов (максимально возможное их количество).

В IV главе описывается методика комплексного исследования тепловой напряженности с использованием комплексной математической модели, в состав которой входят математические модели рабочего процесса комбинированного двигателя, теплообмена, теплопроводности, напряженного и деформированного состояния. Процесс исследования сводится к целенаправленному изменению варьируемого параметра (конструкция, параметр рабочего процесса), вычислению промежуточных и выходных характеристик моделей (показателей мощности, экономичности дизеля, параметров рабочего тела, тепловых потоков, полей температур, напряжений, перемещений). Из этих характеристик составляется система индикаторов, после сравнения которой с эталонами может быть принято решение об оптимальности варианта. При помощи такой комплексной модели можно решать два типа задач: выполнять оптимизацию условий работы деталей заданного конструктивного исполнения путем изменения параметров рабочего процесса и регулировок дизеля и производить оптимизацию конструкции деталей при заданном способе организации рабочего процесса.

Математическая модель рабочего процесса комбинированного двигателя предусматривает термо- и газодинамический анализ процессов в агрегатах турбопоршневого двигателя. Инерционные явления в газоздушном тракте дизеля не учитываются.

Входными параметрами модели являются число оборотов, цикловая подача топлива, степень сжатия, регулировочные и конструктивные параметры дизеля и турбокомпрессора, параметры окружающей среды. Выходными параметрами модели являются таблицы значений параметров газа в цилиндре, показатели работы и экономичности дизеля, максимальное давление сгорания и условные показатели теплонапряженности.

Кроме того, так как модели рабочего процесса и теплообмена взаимо-

связаны, то они объединены и в состав характеристик моделей рабочего процесса входят показатели интенсивности теплообмена в камере сгорания дизеля, системах охлаждения и газозоудшном тракте. Чрезвычайная сложность процессов теплообмена в камере сгорания и системах дизеля затрудняет экспериментальное и расчетное определение интенсивности локального теплообмена в ДВС. Поэтому несмотря на большее количество предложенных различными авторами зависимостей для оценки теплообмена в цилиндре дизеля, все они, независимо от структуры и вида, являются эмпирическими и могут применяться в основном для условий, идентичных с условиями эксперимента, на базе которого они получены. В остальных случаях производится корректировка коэффициентов пропорциональности в формулах по данным теплосбалансовых испытаний. В данной работе математическая модель предусматривает возможность использования нескольких формул для оценки интенсивности теплообмена. Выбор формулы определяется типом двигателя, для которого выполняется моделирование. При использовании формул, по которым вычисляется среднее по тепловоспринимающей поверхности значение коэффициента теплоотдачи, для перехода к локальным значениям используются распределения коэффициентов теплоотдачи по тепловоспринимающим поверхностям, полученные экспериментально для аналогичных машин.

При моделировании квазистационарных температурных полей, соответствующих установившемуся периодическому режиму, задаются условные стационарные граничные условия, определяемые на основе равенства тепловых потоков в действительном периодическом и условном стационарном процессах.

Применительно к моделированию полей температур в системах сопряженных деталей с подвижным или неподвижным, периодическим или постоянным контактом в работе предложен метод, позволяющий учесть особенности теплопередачи в контактной зоне. При этом зона контакта представляется слоем элементов, в объеме которых действуют фиктивные источники тепла. Действие этих источников эквивалентно выделению тепла от трения (внутреннего в гидродинамическом слое или внешнего при граничном трении), поглощению тепла масляной пленкой. В зависимости от характера процесса фиктивные источники тепла имеют положительную или отрицательную производительности. Концепция фиктивных источников тепла оказывается полезной не только при анализе тепловых процессов на трущихся поверхностях, но и при моделировании стационарных температурных полей систем сопряженных деталей с периодическим контактом (клапан-седло, кольцо-поршень и т.д.).

Для определения локальных значений параметров теплообмена разработан методика решения обратных внешних стационарных задач

теплопроводности с использованием МКЭ.

Для решения обратной задачи используется неполное дискретно-элементное представление детали в виде подсистемы элементов, образующих поверхностный слой. Подсистема элементов может быть замкнутой или разомкнутой (рассматривается какой-нибудь участок поверхности). В зависимости от выбора основной системы неизвестных, решением обратной задачи может быть найдено распределение тепловых потоков по поверхности тела или коэффициентов теплоотдачи. В последнем случае необходимо задать температуру среды, окружающей тело. При необходимости можно выделить ту или иную составляющую теплового потока (трение, излучение), дополнив задачу соответствующими экспериментальными или расчетными данными. Процедура определения параметров теплообмена на поверхности сводится к составлению и решению систем линейных алгебраических уравнений, выражающих условие **равновесия** узлов подсистемы поверхностного слоя с условием периодичности (замкнутая подсистема) или без него (разомкнутая подсистема). Параметры теплообмена, получаемые по разработанной методике, являются среднееффективными.

Рассмотрены расширенная и сокращенные системы индикаторов-этапонов, которые необходимы для поиска локальных оптимумов при многовариантных исследованиях. Показано, что при оптимизации рабочего процесса при неизменной конструкции деталей допустимо пользоваться сокращенной системой индикаторов, включающей показатели рабочего процесса, мощности, экономичности, условные показатели тепловой и механической напряженностей. Каждому индикатору ставится в соответствие эталон - оптимальное значение индикатора либо оптимальный диапазон его изменения.

При оптимизации конструкций деталей целесообразно использовать расширенные системы индикаторов и эталонов, содержащие кроме элементов сокращенной системы характеристики, отражающие поведение конструкции при заданном уровне механической и тепловой нагрузки, экономические и технологические показатели. Индикаторы, отражающие поведение конструкции, можно условно разделить на температурные, деформационные, прочностные и показатели износа. Каждая деталь имеет характерный набор критических точек, в которых возможно несоответствие группы индикаторов эталонам. При проведении исследований обращается внимание прежде всего на эти критические точки.

Комплексная математическая модель для исследования тепловой напряженности дизелей реализована в виде системы программ для ЭВМ "Линск-22". В состав системы входят программы для моделирования рабочего процесса комбинированного двигателя, моделирования двумерных

стационарных и нестационарных температурных полей в осесимметричной и плоской постановках, моделирования объемного температурного поля в днище крышки цилиндра, если последнее можно представить в виде плиты; решения обратных внешних стационарных задач теплопроводности в двумерной постановке, моделирования двумерных полей перемещений, деформаций и напряжений (в осесимметричной и плоской постановках задачи), обработки индикаторных диаграмм. Программы разработаны с учетом их широкого взаимодействия при решении разнообразных задач. Для обеспечения взаимодействия разработаны обслуживающие программы. Роль оператора за пультом ЭВМ сводится к выбору последовательности работы программ, зависящей от характера решаемой задачи, и своевременному обеспечению входных каналов ЭВМ исходной информацией.

При помощи разработанной системы программ можно исследовать двумерные температурные поля в системах сопряженных деталей, представленных 1200 узловыми точками, при задании на тепловоспринимающих поверхностях граничных условий 1, 2 и 3 родов (и их комбинаций) с учетом контактного теплообмена и трения на сопряженных поверхностях. Программы для расчета полей перемещений и напряжений позволяют исследовать системы деталей, изготовленных из различных материалов, с использованием температурной зависимости их физико-механических характеристик, задаваемых в виде таблиц. Расчет выполняется при следующих видах нагрузки: температурное поле, распределенная внешняя нагрузка (нормальная и касательная к поверхности), объемные силы и внешние связи, реализуемые в виде нулевых и ненулевых граничных условий в перемещениях. Для учета особенностей силового взаимодействия сопряженных деталей предложен метод замены контактного слоя фиктивным слоем элементов, материал которых обладает трансверсальной изотропностью. Это позволило и при расчете системы сопряженных деталей использовать ее общее дискретно-элементное представление на этапах выявления полей температур, перемещений и напряжений. Программы позволяют выполнять расчет в упругой и упруго-пластической областях.

В У главе приведены результаты комплексного исследования влияния параметров рабочего процесса и конструкции деталей с использованием разработанной системы математических моделей. Исследовалось влияние давления наддува, коэффициента избытка воздуха, цикловой подачи топлива, степени сжатия, степени охлаждения воздуха в охладителе, температуры воздуха, поступающего в двигатель, при условии ограничения максимального давления сгорания P_z . Результаты исследования с использованием сокращенной системы индикаторов показали, что при ограничении P_z существует возможность

оптимизации рабочего процесса с учетом показателей экономичности, мощности и тепловой напряженности. При этом возможности воздействия на уровень тепловой напряженности при ограничении P_z значительно расширяются с увеличением степени охлаждения воздуха.

Исследовано влияние различных конструктивных вариантов головок поршней дизелей ДКРН 74/160 и ЧН 26/26. Изучены поля температур, перемещений и напряжений в составном поршне, втулке и крышке цилиндров дизеля ЧН 26/26, рассмотрены особенности напряженного состояния клапана дизеля ЧН 26/26 с одним из вариантов наплавленного слоя на его фаску. Выявлено влияние структуры температурного поля на характер полей перемещений и напряжений в головках поршней (охлаждаемый и неохлаждаемый варианты). Исследования показали, что структура температурного поля является мощным рычагом воздействия на уровень напряжений и деформаций. Анализ теплового и напряженного состояния нескольких вариантов конструкции головок поршней позволил заключить, что изменения соотношений жесткостей отдельных элементов головок поршней могут привести к качественному изменению распределения напряжений в отдельных зонах детали, особенно в районе верхней поршневой канавки.

На основе разработанного метода последовательного расчета с использованием полного и локального представлений детали изучены особенности напряженного состояния зоны верхней поршневой канавки головки поршня дизеля ЧН 26/26.

Выполненные комплексные исследования влияния конструктивных особенностей деталей цилиндро-поршневой группы и структуры температурного поля на их напряженное и тепловое состояния позволяют наметить основные пути совершенствования конструкции деталей.

Глава VI посвящена описанию экспериментальной установки, метода исследования, анализу погрешностей измерений и результатов экспериментального исследования влияния параметров рабочего процесса на тепловое состояние поршня, втулки и крышки цилиндра дизеля при ограничении P_z . Экспериментальное исследование выполнялось в Проблемной лаборатории ДВС МВТУ им. Н.Э.Баумана на дизеле 2ЧН 26/26. Установка была оборудована необходимыми системами, контрольно-измерительной аппаратурой и укомплектована штатной топливоподающей аппаратурой. Наддув дизеля осуществлялся от компрессорной станции. Турбина имитировалась дроссельными устройствами. Комплекс контрольно-измерительной аппаратуры позволял регистрировать параметры, характеризующие режим работы дизеля, производить индицирование, осциллографирование параметров рабочего процесса и топливоподачи, термометрирование поршня, втулки и

крышки цилиндра. Обработка экспериментальных данных осуществлялась на ЭВМ. Результаты экспериментального исследования влияния коэффициента избытка воздуха, цикловой подачи топлива, давления наддува на температурные поля деталей при ограничении P_z удовлетворительно согласуются с результатами аналогичных расчетных исследований, выполненных на разработанной математической модели. Эксперименты подтвердили возможность локальной оптимизации рабочего процесса при использовании сокращенной системы индикаторов математической модели и выявили необходимость проверки принятого решения с привлечением расширенной системы, включающей локальные характеристики теплового и напряженного состояния деталей, так как в широком диапазоне изменения параметров рабочего процесса и регулировок дизеля возможны качественно различные тенденции изменения локальных характеристик теплонапряженности отдельных деталей. Сравнение зарегистрированных температурных полей с определенными при помощи комплексной математической модели показало обоснованность методов и приемов, положенных в ее основу. Наибольшее расхождение между рассчитанными и измеренными температурами (6%) зарегистрировано в верхнем поясе гильзы в районе переливных отверстий, где распределение температуры сильно отличается от осесимметричного.

В результате проведенной работы создана методика расчетного комплексного исследования тепловой напряженности деталей дизелей, образующих камеру сгорания. Разработана система математических моделей, позволяющая анализировать влияние конструктивных факторов и параметров рабочего процесса на тепловое и напряженное состояние поршней, клапанов, втулок и днищ крышек цилиндров. Разработанные модели прошли всестороннюю проверку путем решения контрольных задач и сравнения с экспериментальными данными. Изучено влияние основных факторов, влияющих на погрешность моделирования полей температур, перемещений и напряжений. Разработаны способы учета особенностей тепловых процессов в зоне контакта сопряженных поверхностей деталей. Разработан метод решения обратных внешних задач теплопроводности. Система математических моделей реализована в виде блока программ для ЭВМ "Минск-22". Разработанный блок программ используется на предприятиях при проектировании дизелей. Программы, входящие в состав блока, используются как автономно, так и состыковываются в определенной последовательности при решении комплексных задач, включающих моделирование рабочего процесса, оценку параметров граничных условий, расчет полей температур, перемещений и напряжений систем сопряженных деталей дизелей.

на стационарных и нестационарных режимах их работы.

По результатам методических разработок, экспериментальных и расчетных исследований можно сделать следующие основные выводы.

1. Разработанная комплексная математическая модель для исследования тепловой и механической напряженностей обладает достаточной для практических целей объективностью и может использоваться для оптимизации условий работы деталей и систем сопряженных деталей заданного конструктивного исполнения, а также для оптимизации конструкции деталей при заданных условиях теплового и силового взаимодействия.

2. Выполненные методические разработки по способам реализации в расчетной схеме особенностей силового и теплового взаимодействия сопрягаемых деталей позволили значительно расширить круг задач, решаемых при помощи разработанной системы моделей, и подойти к одновременному моделированию полей температур в системе деталей ЦПГ (поршень, втулка, крышка, клапан).

3. Разработанная система математических моделей вследствие универсальности может применяться для исследования теплового состояния деталей других тепловых машин.

4. Предложенная методика решения обратных задач теплопроводности с использованием метода конечных элементов дает возможность более обоснованно назначать граничные условия и расширяет возможности экспериментального изучения локальных условий теплообмена.

5. Система математических моделей может успешно применяться при анализе напряженного и деформированного состояния деталей, отдельные элементы которых изготовлены из материалов, отличающихся по своим физико-механическим свойствам (детали с наплавками, заливками, вставками), а также для анализа концентрации напряжений.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Мизернюк Г.Н., Иващенко Н.А., Определение стационарных температурных полей в деталях двигателей внутреннего сгорания методом конечных элементов, "Известия высших учебных заведений. Машиностроение", 1973, № 6.

2. Мизернюк Г.Н., Иващенко Н.А., Моделирование полей температур и напряжений на ЭЦВМ, "Двигатели внутреннего сгорания", НИИИНФОРМАТМАШ, 1973, № 8.

3. Вырубов Д.Н., Мизерник Г.Н., Иващенко Н.А., Моделирование полей температур, деформаций и напряжений в деталях двигателей внутреннего сгорания, Сб. "Пути повышения мощности, надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания" (Тезисы докладов и сообщений всесоюзной научно-технической конференции по ДВС), МВТУ, 1973.

4. Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А., Сазонов Ю.И., Исследования теплового состояния днищ крышек двигателей внутреннего сгорания, Сб. "Пути повышения мощности, надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания", (Тезисы докладов и сообщений всесоюзной научно-технической конференции по ДВС), МВТУ, 1973.

5. Мизерник Г.Н., Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А., Козлов В.С., Расчет характеристик комбинированного двигателя внутреннего сгорания, "Известия высших учебных заведений. Машиностроение", 1973, № 12.

6. Орлин А.С., Иващенко Н.А., Расчет полей деформаций и напряжений в деталях двигателей внутреннего сгорания, "Известия высших учебных заведений. Машиностроение", 1973, № 12.

7. Чайнов Н.Д., Иващенко Н.А., Методы расчетного определения температурных напряжений в крышках цилиндров двигателей внутреннего сгорания, "Известия высших учебных заведений. Машиностроение", 1974, № 1.

По материалам диссертации сделаны доклады на Всесоюзном научно-техническом семинаре по ДВС (МВТУ, 1971 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции по ДВС (МВТУ, 1973 г.).