
На правах рукописи

УДК: 621.436

Онищенко Дмитрий Олегович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ
ДЕТАЛЕЙ ДИЗЕЛЯ В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ С
ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ**

(05.04.02-тепловые двигатели)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2003

42

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

Научный руководитель:

- доктор технических наук,

профессор Кавтарадзе Р.З.

Онищенко Д.О.
Исследование теплового
состояния деталей дизеля в
трехмерной постановке с
применением эксперимент..
2003 0-00

1600087

д-р технических наук,

профессор Петриченко М.Р.

кандидат технических наук

профессор Шатров М.Г.

14.06.05 Шатров М.Г.
18.05.06 Петриченко М.Р.

- НИП «Агродизель»

2003 г. в "14.00" час. на заседании

Дисс

09 "Тепловые и гидравлические

ком университете

зская наб., д.2/18,

1600087

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока

теке МГТУ им.

еренные печатью,

кая ул., д.5, МГТУ

Р.З.

Актуальность проблемы: Развитие современного двигателестроения идет по пути постоянного увеличения удельной мощности и снижения удельного расхода топлива, что неизбежно приводит к увеличению термической напряженности основных деталей ДВС. Как известно, теплонпряженное состояние деталей двигателя является одним из важнейших критериев надежности, поэтому исследования в этой области всегда вызывали большой интерес. Особую актуальность эти работы приобрели с появлением новых жестких норм на токсичность и постоянным снижением удельного расхода топлива, что достигается у двигателей с непосредственным впрыскиванием, увеличением давления впрыска и увеличением степени сжатия, что неизбежно приводит к росту теплонпряженного состояния таких деталей, как поршень, головка блока и гильза.

Новые требования, предъявляемые к двигателям, такие как надежность, экономичность, экологичность, ставят перед проектировщиками задачу поиска и применения новых, более точных и эффективных методов, оценки и расчета теплонпряженного состояния основных деталей ДВС.

Исходя из этого, в диссертационной работе уделяется особое внимание разработке метода расчета поршней и гильз дизелей семейства КамАЗ с применением экспериментальных граничных условий и с учетом различных факторов, встречающихся во время эксплуатации ДВС, таких, как нагароотложение, лакообразование и налип, обуславливающих несимметричность граничных условий.

Цель работы:

- разработка метода расчетно-экспериментального анализа теплонпряженного состояния деталей (поршня и гильзы) быстроходного дизеля в трехмерной постановке с применением реальных (экспериментально полученных) термических граничных условий;

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- разработка метода расчетно-теоретического анализа состояния поршня и гильзы быстроходных дизелей семейства КамАЗ в трех мерной постановке;
- обработка и анализ результатов экспериментального исследования нестационарных тепловых нагрузок на основных деталях быстроходного дизеля КамАЗ в широком диапазоне нагрузочных и скоростных режимов и определения реальных граничных условий на основе экспериментальных данных;
- проведение специальных опытов в целях сбора информации по отложениям на поршне и на гильзе, сбор данных по теплофизическим свойствам нагара и накипи, определение их роли в процессе теплообмена;
- сравнительный анализ разработанного метода анализа теплонапряженного состояния основных деталей двигателя и традиционных методов, применяемых в настоящее время в теории поршневых двигателей.

Научная новизна: разработан метод расчетно-экспериментального анализа теплонапряженного состояния основных деталей двигателя, отличающийся от традиционных тем, что:

- задачи теплонапряженного состояния поршня в трехмерной постановке решаются для всей детали в целом, а не для ее части, как это делалось до настоящего времени;
- установлено влияние конструктивных особенностей (наличие бобышек), а также физических условий (неоднородности трения на различных поверхностях поршня) на теплонапряженное состояние поршня;
- получены полуэмпирические формулы для оценки локальных и осредненных по поверхности стационарных температур на характерных поверхностях поршня в зависимости от температуры охлаждающей жидкости.

На основе анализа экспериментальных данных

- установлены причины отклонения от осесимметричного (традиционно используемого до настоящего времени) распределения термических граничных

условий. Установлены границы применения осесимметричной постановки задачи теплонапряженного состояния деталей дизеля;

- выявлено влияние слоев нагара (на поршне) и накипи (на гильзе) на теплонапряженное состояние. Установлено, что теплоизолирующие воздействия этих отложений, несмотря на их небольшую толщину, могут существенно изменить распределение температур и напряжения в поршне.

Достоверность и обоснованность научных положений определяется:

- применением фундаментальных законов и трехмерных уравнений теории тепломассообмена с экспериментально определенными ГУ, применением хорошо апробированного численного метода конечных элементов, а также аналитических методов реализации математических моделей;

- использованием при обосновании и оценке адекватности результатов расчетно-теоретических исследований достоверных опытных данных, полученных для быстроходных дизелей КамАЗ при непосредственном участии автора;

- Экспериментальным подтверждением достаточной точности основных положений и гипотез, принятых при расчетно-теоретических исследованиях теплонапряженного состояния поршней и гильз быстроходных дизелей.

Практическая значимость работы состоит в том, что :

- разработан метод анализа теплонапряженного состояния основных деталей двигателя, позволяющий с достаточной на практике точностью решать задачи проектирования перспективных, а также доводки и модернизации существующих дизелей;

- предложенный алгоритм, метод анализа и программы в совокупности представляют собой апробированный инструмент для исследования влияния реальных факторов на теплонапряженное состояние деталей двигателя, позволяющий существенно сократить сроки и материальные затраты, необходимые для создания новых и доводки существующих дизелей.

Апробация работы.

Диссертационная работа заслушана и одобрена на заседании кафедры «Поршневые двигатели» (Э2) МГТУ им. Н.Э.Баумана 4 июля 2002 года.

Основные разделы диссертационной работы были представлены: на юбилейной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры судовых ДВС С.-Петербургского государственного морского технического университета, 20 сентября 2000г., на Третьей Российской национальной конференции по теплообмену 21-25 октября 2002г., Москва, МЭИ, а также на заседаниях кафедры «Поршневые двигатели» (Э-2) МГТУ им Н.Э. Баумана в 2000 и 2001 г.г.

Публикации.

Основные положения диссертации опубликованы в 4 печатных работах, а также в отчетах кафедры Э2 в МГТУ им. Н.Э.Баумана по НИР за 1999-2002гг.

Объем диссертации: Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 137 страниц основного текста, 52 рисунка, 9 страниц со списком использованной литературы, включающей 89 наименований.

Содержание диссертации:

Во введении обоснована актуальность проблемы создания эффективных расчетно-экспериментальных методов исследования теплового состояния основных деталей ДВС, определения влияния естественных теплоизоляторов и создания расчетных методов по определению термических граничных условий. Дана краткая характеристика диссертационной работы.

В первой главе производится аналитический обзор теоретических и экспериментальных работ по исследованию температурного состояния деталей КС современных дизелей, а также по методикам определения термических ГУ со стороны КС. Подчеркивается значимость этих работ, а также рассматриваются особенности теплообмена в рабочем процессе. Дается краткий обзор известных работ в данной области, выполненный как отечественными, так и зарубежными

исследователями: С.А. Батуриным, Н.А. Иващенко, Р.З. Кавтарадзе, А.К. Костиным, Е.А. Максимовым, В.А. Прядко, Г.Б. Розенблитом, М.Р. и Р.М. Петриченко, Б.С. Стефановским, М.В. Страдомским, Н.Д. Чайновым, М. Г. Шамповым, К. Huber, P.S. Myers, O. Nakayama, K. Nishiwaki, K. Stieper, O.A. Uyahara, G. Woschni, T. Ymauchi, K. Zeilinger и др.

На основе проведенного анализа опубликованных работ по заданной тематике, а также потребности современного двигателестроения определили задачи данной диссертационной работы, изложенные выше.

Вторая глава посвящена расчету теплового состояния основных деталей (поршень, гильза) камеры сгорания быстроходных дизелей семейства КамАЗ. В частности были проведены расчеты поршней с использованием существующего традиционного метода вычисления граничных условий, согласно которому задаются осредненные значения результирующей температуры газа и осесимметричное распределение коэффициента теплоотдачи, последний, как правило, определяется на основе обратной осесимметричной задачи теплопроводности. Результат расчета представлен на рис.1. Также обоснована необходимость расчета целого поршня, а не его части, даже в случае задания осесимметричных граничных условий.

Для оценки реальных граничных условий, были использованы экспериментальные данные полученные на кафедре Э-2 в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эти граничные условия были использованы при расчете того же поршня (Рис.2).

Сравнительный анализ этих расчетов показал, что для корректного расчета поршня, необходим качественно новый метод вычисления граничных условий, который будет учитывать различные факторы, нарушающие их симметричность, несимметричное расположение форсунки, количество отверстий распылителя, закрутка потока, наличие впускного и выпускного клапана и др.

Анализ, проведенный в первой главе, показал, что в процессе работы двигателя, на поршне и на головке со стороны рабочих газов неизбежно возникает нагар, влияние на температурное поле поршня которого, было рассмотрено автором в данной работе. На поверхности поршня был смоделирован слой нагара толщиной 800 мкм и заданы его тепло-физические свойства. Выполнялись расчеты поршня как с экспериментальными граничными условиями, так и с вычисленными (Рис.3). Была дана оценка корректности замены физически смоделированного слоя теплоизолятора пересчетом граничных условий, используя термическое сопротивление. Помимо нагара в процессе работы двигателя со стороны картера ^{на поршне} возникают и так называемые лакообразования, которые также являются хорошими теплоизоляторами, которыми, как показывают расчеты, проведенные автором (Рис.4), нельзя пренебрегать. Для получения более полной картины о влиянии естественных теплоизоляторов на температурное поле поршня, был проведен расчет различных вариантов состояния поршня: «чистый» поршень, поршень со слоем нагара, поршень со слоем лака, поршень со слоем нагара и лака. Для более четкого сравнения все эти расчеты были проведены как с экспериментальными граничными условиями, так и с расчетными, выполненными по традиционному методу. Численные эксперименты по определению температурных полей поршня показали, что естественные теплоизоляторы оказывают существенное влияние не только на тепловое состояние поршня, но и на симметричность температурного поля поршня и как следствие на перераспределение тепловых потоков.

Гильза быстроходного дизеля, в отличие от головки и поршня, имеет, как правило, четкую осесимметричную форму, поэтому исследователи при расчете применяют двухмерную модель, тем самым ограничиваясь осесимметричным решением. Однако термометроирование гильзы, проведенное на кафедре «Поршневых двигателей» МГТУ им. Н.Э. Баумана, показывают, что несимметричность граничных условий относительно оси достигает 10-12 %

(рис.6). В этой связи был проведен расчет температурных полей гильзы с применением экспериментальных граничных условий. Также как и в случае с поршнем в процессе работы на гильзе со стороны охлаждающей жидкости возникает накипь, которая также является хорошим теплоизолятором. Результат расчета гильзы со слоем накипи представлен на рис.5.

Третья глава посвящена тепловым нагрузкам на теплоизолирующей поверхности поршня. В частности по результатам эксперимента проведен анализ данных, который показывает наличие не только несимметричности граничных условий, но и нестационарности последних (рис.7), что является основной причиной сокращения срока службы поршня и снижения его надёжности.

Также в этой главе разработан и предложен метод вычисления граничных условий для поршня быстроходного дизеля со стороны камеры сгорания с применением программных продуктов, разработанных в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Поршневых двигателей». Данная методика позволяет учитывать нецентральное расположение форсунки, количество и размер отверстий распылителя, закрутку потока и др. факторы, влияющие на несимметричность теплового состояния поршня. Термические граничные условия в виде локальных температур рабочего тела (рис.8) и локальных коэффициентов теплоотдачи (рис.9) дают значения тепловых нагрузок на отдельных участках поршня. После проверки адекватности этих значений путем сравнения с экспериментальными величинами тепловых потоков, они были использованы для оценки теплового состояния поршня и гильзы в трехмерной постановке.

В четвертой главе было проведено экспериментальное исследование влияния различных факторов на тепловое состояние быстроходного дизеля.

Температура поршня в случае использования опытной головки, впускной канал которой обеспечивает увеличение интенсивности вихря впускного воздуха на 20% по сравнению с серийной, уменьшается. В частности на кромке и в центре

камеры сгорания различие достигает 10-15°C. При этом качество процессов смесеобразования и сгорания улучшается, что подтверждается уменьшением расхода топлива в случае использования опытной головки.

Сравнение температур основных деталей при работе с серийной и опытной (с уменьшенным гидравлическим сопротивлением) головками показывает, что уменьшение сопротивления выпускного канала на 15-20 % приводит к уменьшению температуры головки цилиндра вблизи выпускного канала на 10-15%, правда, в других местах на поверхности головки наблюдалось небольшое увеличение температуры. Можно предположить, что снижение гидравлического сопротивления выпускного канала интенсифицирует теплоотдачу от поверхности к свежему воздуху в области выпускного канала, вследствие чего локальные температуры поверхности в этой области понижаются.

Таким образом было установлено, что интенсификация процессов смесеобразования и сгорания путем увеличения интенсивности вихревого движения заряда в рассмотренном случае не приводит к увеличению локальных тепловых нагрузок на поршне, что объясняется явлением внутренней адиабатизации вихря, подробно изложенного в работах М.Р. Петриченко и Р.З. Кавтарадзе.

Повышение числа оборотов не приводит к увеличению температуры головки цилиндра за пределами допустимых значений, что является результатом существующего интенсивного охлаждения головки.

С целью прогнозирования теплового состояния двигателя в случае использования турбонаддува были рассчитаны температурные поля поршня. В результате было установлено, что использование турбонаддува, увеличивающего мощность двигателя на 20 % и выше, приводит к повышению локальных тепловых нагрузок до такой степени, что температура в районе верхнего компрессионного кольца может принять значение выше допустимого. Это, в

свою очередь, приводит к повышенным лако- и нагарообразованию и даже к ухудшению термомеханических свойств материала поршня.

Было проведено экспериментальное исследование поршня двигателя КамАЗ 7405 и его модификаций (таблица 1). В результате проведенных экспериментов различных модификаций двигателя, работающих на различных режимах, были установлены следующие эмпирические формулы:

1. Средняя температура ($^{\circ}\text{C}$) поршня со стороны камеры сгорания

$$T = 1,52 T_{\text{охл}} + 178 \quad (1)$$

2. Средняя температура поршня со стороны гильзы

$$T = 1,36 T_{\text{охл}} + 166 \quad (2)$$

3. Средняя температура поршня над канавкой первого компрессионного кольца

$$T = 1,28 T_{\text{охл}} + 152 \quad (3)$$

4. Средняя температура поршня под канавкой первого компрессионного кольца

$$T = 1,2 T_{\text{охл}} + 110 \quad (4)$$

Заметим, что формула (3) и (4) справедливы в случае наличия в кольцевой канавке нирезистовой вставки. В результате эксперимента были получены температуры в характерных точках гильзы на различных режимах работы (рис.6.) В процессе измерения было установлено, что повышение температуры $T_{\text{охл}}$ на 15°C приводит к повышению температуры гильзы во всех точках замера на $14-18^{\circ}\text{C}$.

Было проведено исследование влияния слоя накали на тепловое состояние гильзы и получена расчетно-экспериментальная зависимость влияния толщины слоя нагара на количество теплоты переданного от рабочего тела в охлаждающую жидкость.

Основные выводы к диссертационной работе.

1. Разработан метод анализа теплонапряженного состояния основных деталей двигателя, использующий численный метод конечных элементов и позволяющий решать задачи теплонапряженности в 3-х мерной постановке для

цельных конструкций поршня и гильзы с учетом наличия на их поверхности нагара и накипи, которые оказывают существенное влияние на распределение температур и напряжения в деталях из-за ярко выраженных теплоизолирующих свойств.

2. В результате обработки экспериментальных данных по нестационарным тепловым нагрузкам, полученным на двигателях семейства КамАЗ, были получены термические граничные условия второго рода. Установлены факторы, влияющие на отклонения от симметричного распределения граничных условий для поршня.

3. Получены полуэмпирические формулы для оценки локальных и средних по поверхности стационарных температур в характерных областях на поверхности поршня (над и под канавкой первого компрессорного кольца, со стороны камеры сгорания и со стороны гильзы) в зависимости от температуры охлаждающей жидкости. Полученные формулы могут быть использованы для прогнозирования характерных температур для поршней двигателей типа КамАЗ, изготовленных из материала АЛ-4.

4. Задача определения теплового состояния поршня была решена в трёхмерной постановке с реальными граничными условиями, полученными экспериментально, непосредственно на двигателе. Сопоставление этих результатов с результатами, полученными решением той же задачи в традиционной осесимметричной постановке показывает, что несимметричность граничных условий, установленных по непосредственным измерениям, приводит к несимметричному распределению температуры в поршне. Отклонение от симметричности распределения температур объясняется как конструктивными особенностями поршня (наличие бобышек), так и физическими условиями (различные условия трения в поперечных и продольных плоскостях относительно оси пальца, имеющих место при движении поршня).

5. Со стороны рабочего тела асимметрию граничных условий обуславливают различные условия при впускных и выпускных клапанах, закрутка потока, направление струй топлива, количество Z сопловых отверстий форсунки и т.п. Однако в случае центрального расположения форсунки и интенсивной закрутке заряда, когда $Z \geq 4$, распределение термических граничных условий со стороны рабочего тела близко к осесимметричному. Экспериментальные исследования показали, что учёт наличия бобышек в трёхмерной модели по сравнению с осесимметричной приводит к понижению уровня температуры в районе второго и третьего поршневого кольца на 10-15 °С. Кроме того это приводит к снижению температуры и на тепловоспринимающих поверхностях поршня, а именно в области непосредственно КС в поршне над бобышками на 15°С. Теплоотводящая роль бобышек для области первого компрессионного кольца незначительна.

6. В целях уменьшения затрат при расчёте на ПК трёхмерный расчёт поршня традиционно сводят к расчёту его четвертинки. Однако реально даже в случае осесимметричности граничных условий такое допущение является необоснованным. В частности это приводит к тому что, тепловые потоки, направленные по нормали к плоскостям, делящие поршень на четвертинку, не являются нулевыми (как они обычно принимаются) именно из-за наличия бобышек. Поэтому трёхмерный расчёт теплового состояния следует проводить для полного поршня, а не для его части.

7. Выявлено влияние слоя нагара на тепловое состояние поршня. Установлено, что наличие этого слоя из-за теплоизолирующего воздействия приводит к уменьшению максимальной температуры поршня на 18 °С. Кроме того она способствует возникновению дополнительных, довольно существенных градиентов температуры, приводящих к изменению теплонапряжённого состояния поршня.

8. Проведен расчет гильзы с использованием экспериментальных данных в трёхмерной постановке с учетом несимметричности ГУ. Выявлено влияние слоя

накипи, как теплоизолятора, на тепловое состояние гильзы, в частности установлено, что разница температур в радиальном направлении достигает 10%.

9. Полученные результаты теплового состояния основных деталей двигателя находят экспериментальные подтверждения и могут быть рекомендованы для практического пользования при создании перспективных и доводке существующих быстроходных дизелей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О. Анализ двух и трехмерных моделей теплонапряженного состояния поршня быстроходного дизеля// ДВС двадцать первого века: Материалы всесоюзной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры судовых ДВС и дизельных установок.- С.-Петербург, 2000.-С ~~34~~ **39**.
2. Экспериментальное исследование теплового состояния поршня быстроходного дизеля / Кавтарадзе Р.З., Кавтарадзе З.Р., Онищенко Д.О., Голосов А.С. // Судостроение, судоремонт и техническая эксплуатация флота.- С.-Петербург, 2002.- Выпуск 4.- С.61-63.
3. Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О., Голосов А.С. Анализ трехмерного теплового состояния поршня двигателя с применением экспериментальных граничных условий // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену.- М., 2002.- С.135-138.
4. Голосов А.С., Кавтарадзе З.Р., Онищенко Д.О. Расчетно-экспериментальное исследование локальных температур и локальных концентраций оксидов азота в камере сгорания дизеля // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену.- М., 2002.- Т.8. - С. 114-117.

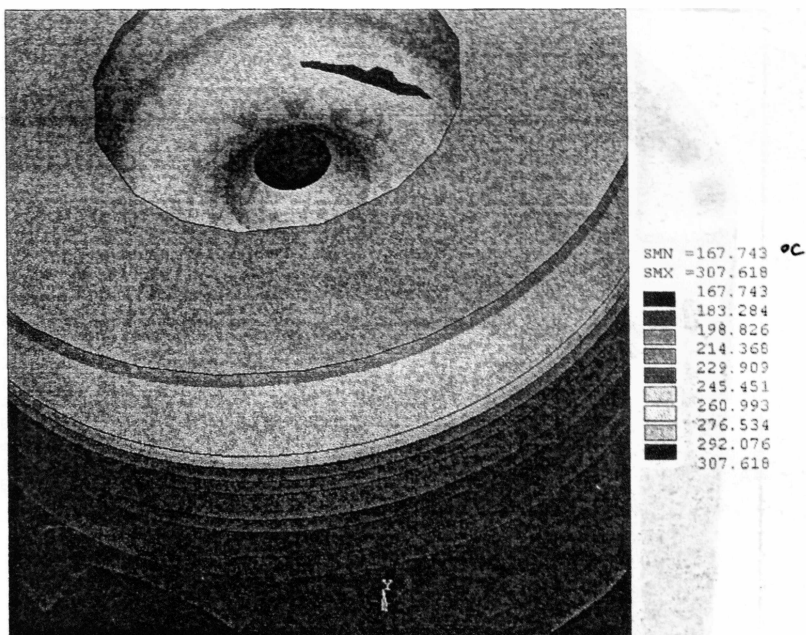


Рис.1 Распределение температур в поршне Двигателя КАМАЗ 740 при осесимметричном задании граничных условий

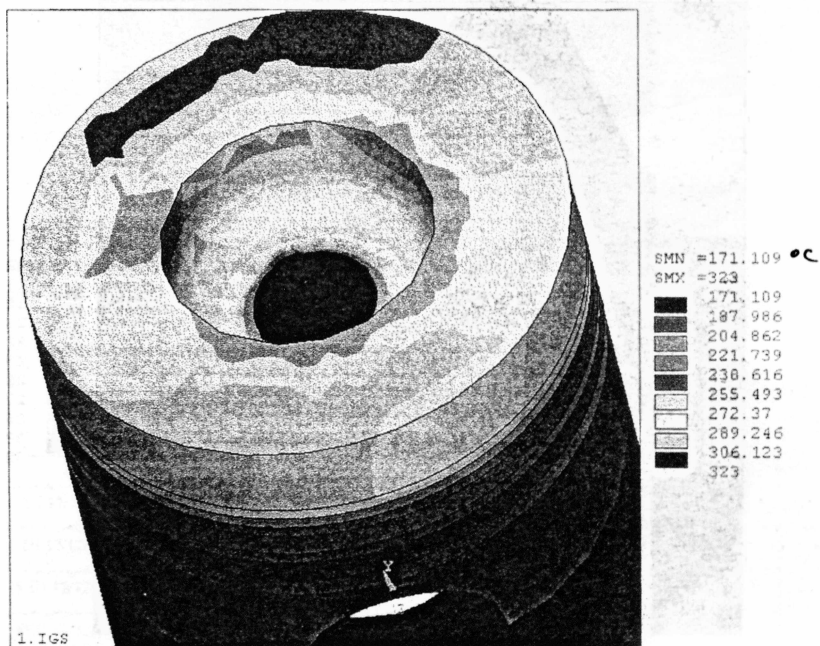


Рис. 2. Температурное поле. Экспериментальные ГУ

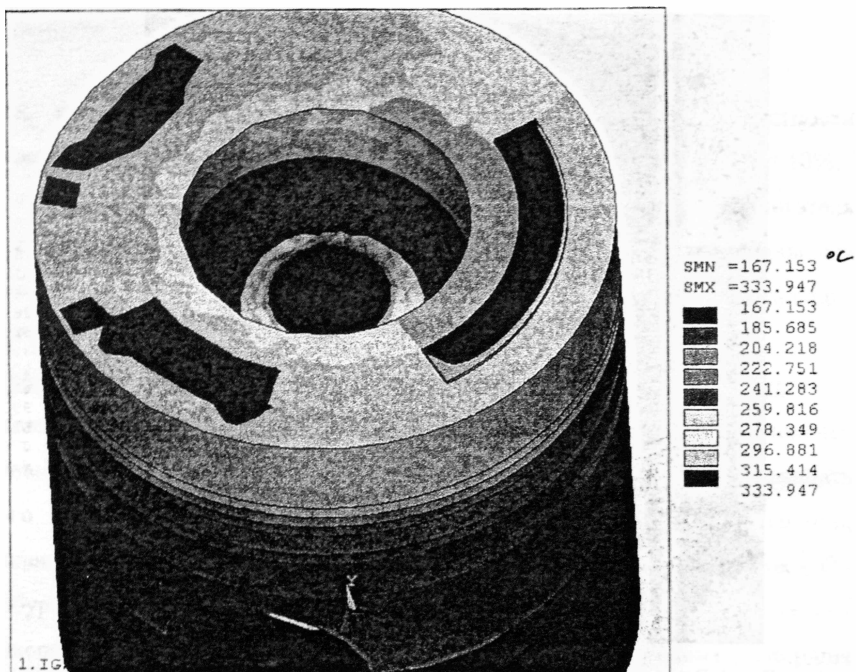


Рис.3 Температурное поле с учетом слоя нагара

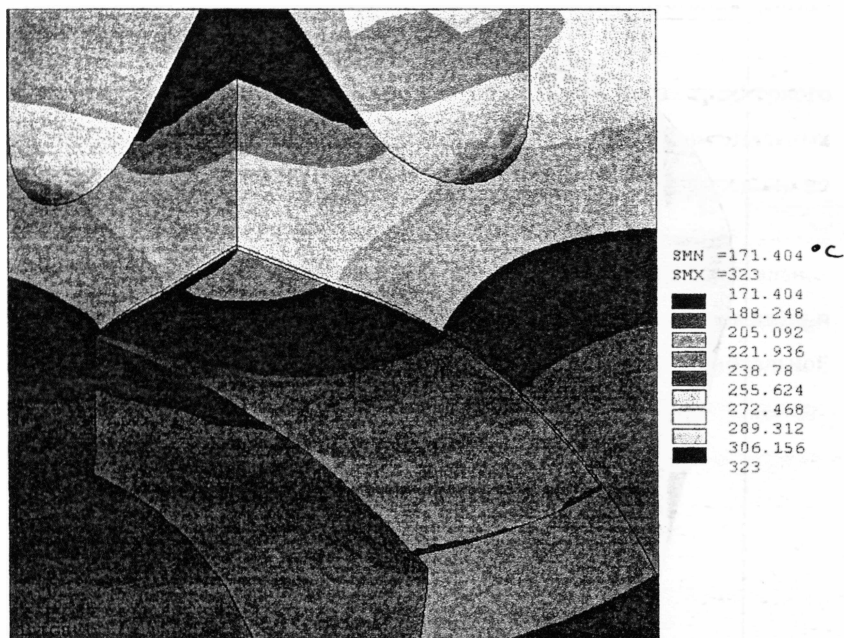


Рис.4 Температурное поле поршня с учетом слоя лака. Сечение поршня

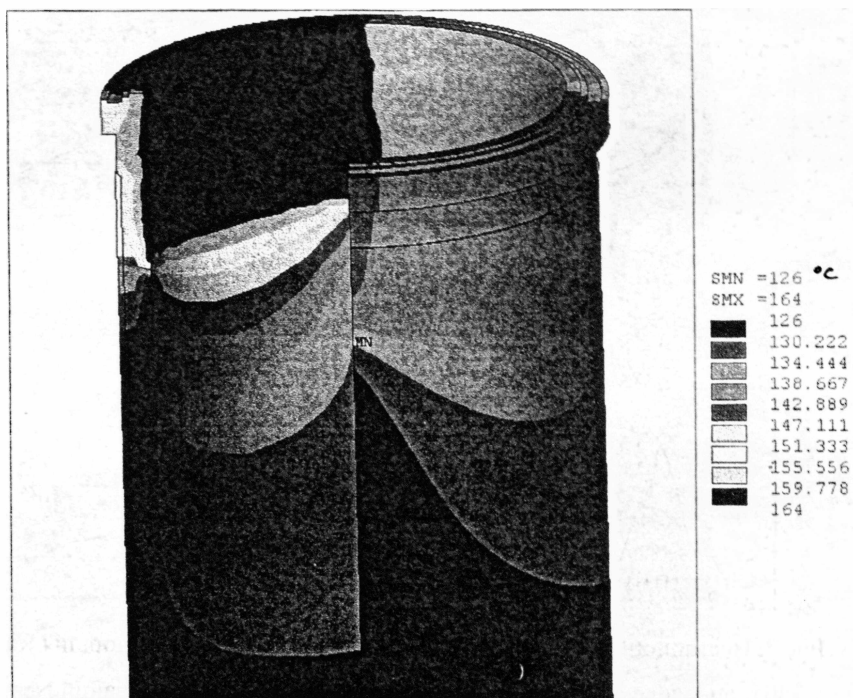


Рис.5. Распределение температур в гильзе двигателя КАМАЗ 740, с учетом слоя накали

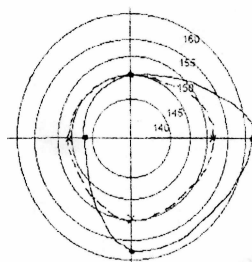


Рис. 6. Распределение температур по периметру гильзы в зоне, соответствующую нахождению терпаров в ВМТ

Таблица 1

Двигатель	№. кВт	п. мин ⁻¹	Форма КС
8Ч 12/12 (КамАЗ 740)	154	2600	
8Ч 12/12(КамАЗ 7402)	152	2200	
8ЧН 12/12(КамАЗ 7405)	176	2200	
8ЧН 12/12(КамАЗ 7405)	176	2200	

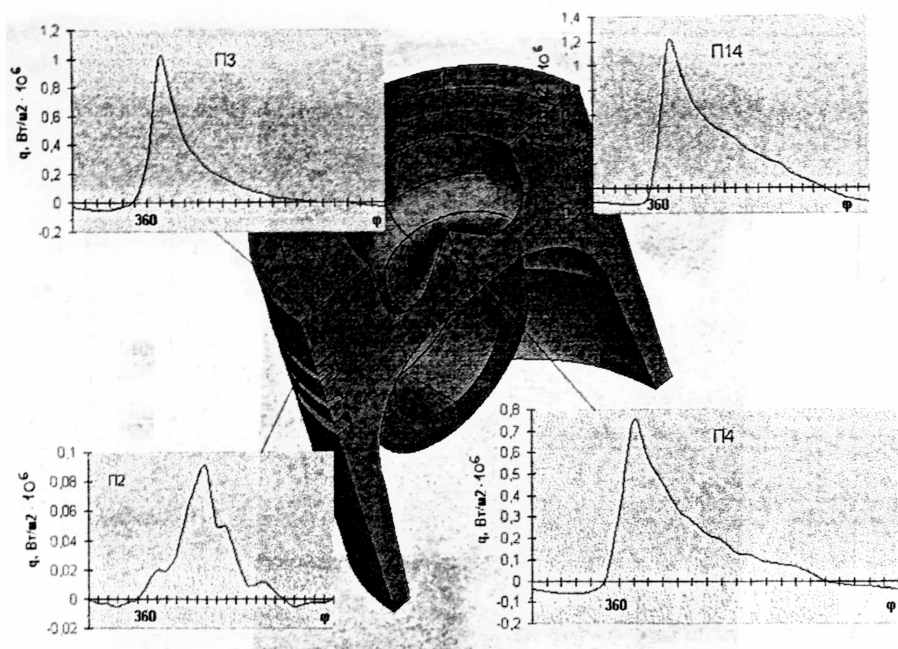


Рис.7. Нестационарные термические граничные условия для поршня КамАЗ-7405, определенные на основе экспериментальных исследований $Ne=205 \text{ л.с.}$

• $n=2200 \text{ min}^{-1}$. •-место расположения датчика теплового потока.

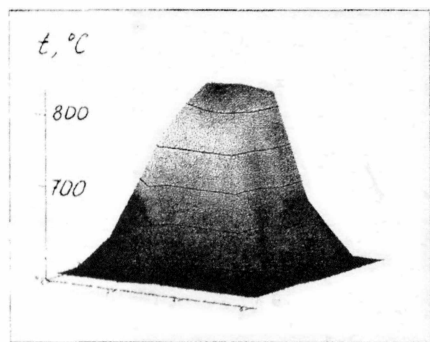


Рис.8. Распределение температуры газа над поверхностью поршня. КамАЗ-740.

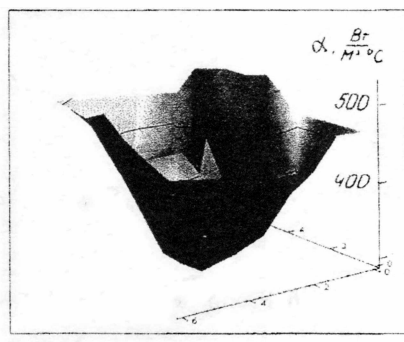


Рис.9. Распределение коэффициента теплоотдачи по поверхности поршня. КамАЗ-740.(Экспериментальное поле температур, и тепловых потоков)

Подписано в печать 03.01.2003 г. Формат 60х90, 1/16.
Объем 1,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 25

Отпечатано в ООО "Фирма Блок"

107140, г. Москва, ул. Русаковская, д.1. т. 264-30-73

www.blok01centre.narod.ru

Изготовление брошюр, авторефератов, переплет диссертаций.