М 308651

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н. Э. БАУМАНА

УДК 621.436

СТЕФАНОВСКИЙ БОРИС СЕРГЕЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

(СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.04.02 — ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

МОСКВА 1977

Работа выполнена в Ярославском политехническом институте

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор *Д. Н. ВЫРУБОВ*;
доктор технических наук, профессор *Р. М. ПЕТРИЧЕНКО*;
доктор технических наук, профессор *М. Г. МАХАНЬКО*.

Ведущее предприятие — Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт (НАМИ).

Защита диссертации состоится «10» ноября 1977 г. на заседании специализированного Совета (шифр Д33.10) «Тепловые и гидравлические машины» при Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н. Э[illegible] по адресу: г. Москва, Лефортовская наб., № 1, факульт[illegible]роение».

Отз[illegible] печатью, просьба высылать [illegible] Чаплыгина ул., дом 5.

С [illegible] МВТУ им. Н. Э[illegible]

Автореф[illegible]

М308651

Ученый
специал
докт. те[illegible]ЯЗНОВ

I

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Увеличение мощности двигателей сопровождается возрастанием уровня их тепловой напряженности. Этим обусловливается особая важность работ, направленных на устранение перегрева деталей, который в последнее время стал одной из основных причин, препятствующих повышению экономичности и работоспособности двигателей.

Как известно, тепловые повреждения в первую очередь обусловливаются особенностями теплового нагружения и охлаждения теплонапряженных деталей. Не зная граничных условий нагрева и охлаждения, невозможно воспользоваться ни одной из созданных в последние годы методик анализа теплонапряженного состояния. Однако, широко известные зависимости для определения этих граничных условий весьма противоречивы и не позволяют устанавливать эти условия со сколько-нибудь удовлетворительной точностью.

№ 308651

Ввиду этого проблема прогнозирования граничных условий теплообмена теплонапряженных деталей является в настоящее время узловой в двигателестроении, а исследования в этой области имеют как научную, так и практическую ценность.

Цель исследования. Основными целями исследований были: выяснение факторов, от которых зависят локальные особенности теплового нагружения и охлаждения теплонапряженных деталей, уточнение на этой основе принципов их рационального конструирования и разработка методов, позволяющих на самых на-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1308651
Стефановский Б.С. Исследов

чальных стади к созданию двигателей с достаточной точностью оценивать усл вия работы теплонапряженных деталей и отбирать для этих условий наиболее приемлемые конструктивные варианты.

Научная новизна диссертации определяется тем, что в ней подвергнут критическому пересмотру весь комплекс вопросов, связанных с проблемой тепловой напряженности поршневых двигателей, вскрыт ряд, неизвестных ранее, особенностей процесса переноса тепла от газов к стенкам цилиндров, доказано, что для повышения результативности исследований теплонапряженности необходим пересмотр ряда традиционных методологических принципов, и разработана новая методологическая основа для таких исследований.

Исследования в области теплонапряженности предложено базировать на новом принципе - принципе локальности. Для выяснения локальных особенностей процессов теплопереноса в поршневых машинах предложено использовать новый метод - широкое сочетание исследований на натуральных объектах и упрощенных моделях, имитирующих отдельные стороны рассматриваемых процессов. Для характеристики локальных особенностей теплового нагружения введен новый параметр - интегральный, обобщающий показатель локальной интенсивности теплопереноса от газов к стенкам цилиндров. Наконец, для определения локальных тепловых нагрузок разработан новый метод, заключающийся в перераспределении их средних, в пределах соответствующих поверхностей значений, пригодный не только для дви-

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ МВТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

гателей, но и для любых объектов, для которых может быть разграничено влияние конструктивных и режимных параметров, и позволяющий использовать для решения практических задач результаты предшествующих исследований, выполненных без учета принципа локальности.

Практическая ценность диссертационной работы определяется тем, что в ней:

а) получены количественные зависимости, впервые позволяющие прогнозировать локальные граничные условия теплового нагружения и охлаждения и на этой основе рассчитывать поля температур теплонапряженных деталей одного из наиболее распространенных типов дизелей, и разработан метод коррекции этих зависимостей машиностроительными заводами для двигателей других типов;

б) на основе данных о действительных условиях работы теплонапряженных деталей сформулированы рекомендации по выбору режима и методам интенсификации охлаждения, обоснованию схем движения теплоносителя и зон, нуждающихся в усиленном охлаждении, методам управления полями температур, конструированию деталей и определению рациональных областей их применения, с учетом особенностей теплового нагружения и охлаждения, назначению ряда основных параметров рабочего процесса, влияющих на тепловое состояние двигателей.

Апробация работы. Результаты исследований, положенных в основу диссертации, докладывались на Всесоюзных конференциях по д.в.с. в Москве (в 1968 и 1973 г.г.) и в Ленинграде (в 1976 г.), на Всесоюзном семинаре по д.в.с. при МВТУ им.

Баумана (в 1971, 1973 и 1976 г.г.) и аналогичных семинарах при кафедрах д.в.с. Ленинградского политехнического института (в 1974 г.) и Волгоградского политехнического института (в 1970 и 1975 г.г.), на второй и третьей Всесоюзных межвузовских конференциях по тепло- и массопереносу в Омске (в 1971 и 1972 г.г.), научно-технических конференциях МАДИ (в 1969-1975 г.г.), СибАДИ (в 1973-1976 г.г.) и Ярославского политехнического института (ежегодно, начиная с 1960 г.).

Публикации. По результатам исследований, включенных в диссертацию, опубликовано 33 статьи общим объемом около 20 авторских листов. Кроме того методологические вопросы теплотехнических испытаний д.в.с., которые были разработаны в ходе исследований, составили значительную часть (около 25%) монографии "Испытания д.в.с." (объемом 23 авт.л.). По теме диссертации зарегистрировано также 26 отчетов кафедры ДВС ЯПИ.

Объем работы. Диссертация состоит из предисловия, пяти глав, заключения и приложений; имеет 242 страницы машинописного текста, 99 иллюстраций и 22 таблицы; в списке литературных источников 192 названия.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работоспособность деталей цилиндро-поршневой группы зависит от их температур. Эти температуры могут быть найдены посредством методов теории теплопроводности, причем последние разработаны настолько, что точность расчетов зависит только от точности задания граничных условий подвода

и отвода тепла.

Это стало очевидным уже около полувека назад, и определению указанных условий посвящено очень много исследований. Широко известны труды в этой области В.Нуссельта, Н.Р.Брилинга, Г.Эйхельберга, В.Пфлаума, Л.М.Белинкого, А.А.Чиркова, Б.Я.Гинцбурга, В.Эннеда, Г.Вошни, Г.Шиткеи, Р.М.Петриченко, А.К.Костине и ряда других исследователей, а также методологические работы ЦНИДИ, НАМИ и некоторых других организаций. Однако, результаты расчетов по формулам разных авторов расходятся в десятки раз. Поскольку при проектировании двигателей факторы, влияющие на тепловое состояние деталей цилиндро-поршневой группы, можно выявить только с помощью расчетов, возникла острая необходимость в резком повышении точности прогнозирования граничных условий теплообмена. Без этого на стадии проектирования невозможно оценить эффективность мероприятий, применявшихся для нормализации теплового состояния двигателей; по существу, это не позволяет конструкторам использовать предшествующий опыт двигателестроения, ибо применяемые без достаточного обоснования мероприятия, положительно зарекомендовавшие себя на одних двигателях, для других нередко не только не дают положительного эффекта, но даже приносят вред.

Проведенный в диссертации сравнительный анализ методов, использовавшихся различными исследователями, показал, что ни одним из них не подвергались сколько-нибудь серьезной критике методологические принципы своих предшественников. В итоге, для исследования и расчета процесса теплоотдачи от

газов к стенкам цилиндров всегда применялись методы и параметры, используемые в стационарной теплотехнике. В связи с этим было высказано предположение, что методы и параметры, приемлемые и удобные для стационарных процессов переноса тепла, могут быть непригодными для резко нестационарного теплопереноса в двигателях, что низкая результативность предшествующих исследований этого процесса обусловлена именно этим обстоятельством и что существенный прогресс в прогнозировании граничных условий для теплонапряженных деталей и в конструировании последних может быть достигнут лишь на новой, более рациональной методологической основе для исследований и расчетов.

Для разработки такой основы пришлось подвергнуть последовательному критическому анализу все основные аспекты проблемы тепловой напряженности. Соответственно с этим диссертационная работа сложилась из пяти глав. В первой из них рассмотрена зависимость уровней механической и тепловой напряженности от особенностей рабочего процесса двигателей, что позволило выявить наиболее перспективные объекты для исследовательско-доводочных работ. Во второй доказано, что использовавшиеся до сего времени методы прогнозирования тепловых нагрузок нуждаются в коренном усовершенствовании, ибо не учитывают существенных особенностей процесса теплоотдачи от газов к стенкам цилиндров. В третьей на основании большого объема исследований этого процесса уточнены его закономерности, сформулированы и проверены новые принципы прогнозирования тепловых нагрузок. Четвертая посвящена уточне-

нию зависимостей для прогнозирования интенсивностей охлаждения. В пятой рассмотрены конструкции и пути улучшения теплового состояния и определяются рациональные области применения различных типов теплонапряженных деталей с учетом действительных условий их работы.

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ ЛОКАЛЬНОГО ПОДХОДА К ПРОБЛЕМЕ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ

Необходимость нового подхода к проблеме теплонапряженности обосновывается в постановочной части диссертации. В этой части доказывается, что основой такого подхода должен быть принцип локальности, который соответствует как характеру тепловых повреждений теплонапряженных деталей, так и особенностям процессов теплоотдачи от газов к стенкам цилиндров и от охлаждаемых поверхностей - к охлаждающей среде.

Постановочная часть диссертации состоит из двух глав. Первая из них посвящена выяснению вопроса о том, какие из автономных транспортных теплосиловых установок имеют наилучшие перспективы на будущее.

Необходимость рассмотрения этого вопроса обусловлена тем, что в первую очередь, очевидно, заслуживают внимания процессы переноса тепла в наиболее перспективных двигателях. В то же время сложившийся типаж двигателей, в связи с исчерпанием запасов традиционных топлив и экологическими ограничениями, подвергается пересмотру, причем к числу перспективных часто относятся и такие типы двигателей, которые имеют очень существенные отличия в процессах теплопереноса по

сравнению с наиболее распространенными двигателями сегодняшнего дня.

Для решения этого вопроса в первой главе диссертации рассмотрены все этапы процесса преобразования тепловой энергии в механическую, применительно к автономным теплосиловым установкам, и последовательно обоснованы вид рабочего тела, способ подвода тепла, рабочий цикл, типаж основных агрегатов. Показано, что двигатель, обладающий высокими мощностными показателями, должен иметь "внутренний" (непосредственно в рабочее тело) подвод тепла и при повышенных давлениях цикла должен быть турбопоршневым, причем поршневые машины должны располагаться в верхней части цикла и совершать основную долю полезной работы. Тем самым установлено, что схемы ряда, широко используемых ныне, поршневых и комбинированных двигателей близки к оптимальным.

Сопоставление показателей силовых установок с резко различными вариантами рабочего процесса (вплоть до вынесения процесса горения из цилиндра, так называемая схема Юнгера) привело к выводу о том, что уровни механической и тепловой напряженности в первую очередь определяются уровнем форсировки по мощности. Это позволило заключить, что, во-первых, проблемы механической и тепловой напряженности будут еще очень длительное время сохранять свою актуальность независимо от возможных изменений в типаже двигателей, сортности топлива и т.д. Во-вторых, при решении этих проблем основное внимание должно быть сосредоточено на усовершенст-

вовании двигателей, уже освоенных промышленностью, а потому необходимо уточнять особенности теплового нагружения и охлаждения именно этих двигателей. Уточнения необходимы потому, что расчеты по формулам, полученным в результате уже проведенных исследований, приводят к недопустимо большим расхождениям.

Вторая глава диссертации посвящена выявлению причин этих расхождений. Вскрыты две такие причины.

Одна из них заключается в том, что доля тепла, передаваемого стенкам цилиндров радиацией, не постоянна, как это принималось предшествующими исследователями, а зависит от типа и режима работы двигателей.

В карбюраторных и газовых двигателях эта доля примерно на порядок ниже, чем в дизелях, ибо при сгорании гомогенной смеси образуется слабо светящееся пламя. В дизелях эта доля зависит от нагрузки и быстроходности. С увеличением быстроходности сокращается общая продолжительность теплообмена, но возрастает интенсивность конвективной теплоотдачи. Поэтому рост быстроходности должен сопровождаться и, действительно, сопровождается убыванием доли тепла, передаваемого излучением (рис.I,а). В то же время по мере снижения нагрузки в дизелях всех типов количество тепла, передаваемого излучением, уменьшается примерно так же, как продолжительность свечения пламени (рис.I,б).

Полученные данные позволили выделить класс двигателей, для которых радиация имеет существенное значение и куда относятся дизели с числом оборотов в минуту менее 1500. Для

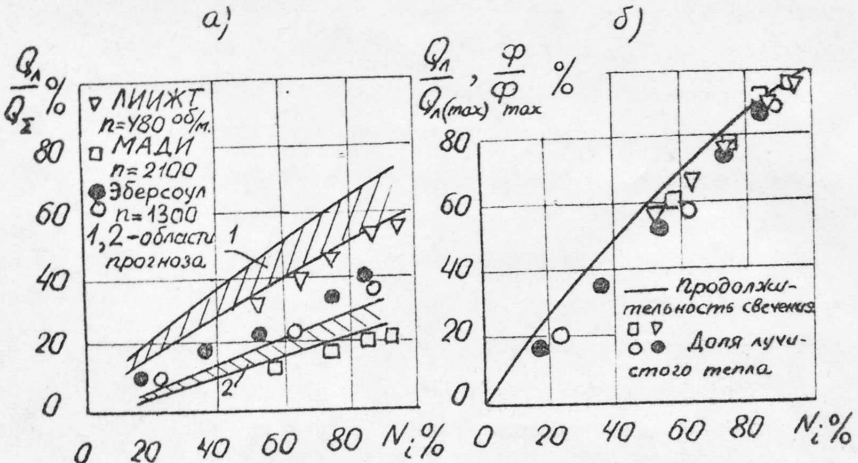


Рис. 1. Зависимости доли тепла, передаваемого радиацией в дизелях, от быстроходности и нагрузки (а) и связь интенсивности теплоизлучения и продолжительности свечения пламени (б)

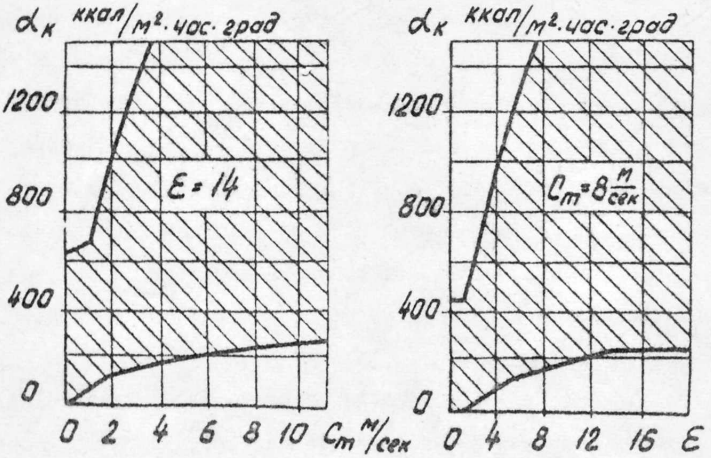


Рис. 2. Поля разброса коэффициентов конвективной теплоотдачи для процесса сжатия ($n_1 = 1,35$) при расчете по опубликованным эмпирическим формулам

более быстроходных дизелей доля тепла, передаваемого радиацией, даже на режиме номинальной мощности не превышает 15-20%, поэтому для таких дизелей и карбюраторных двигателей тепловая напряженность обусловлена преимущественно конвективной теплоотдачей от газов к стенкам цилиндров.

Однако, и формулы для расчета конвективной теплоотдачи от газов к стенкам цилиндров даже при расчетах наиболее простых этапов рабочего процесса не дают удовлетворительных результатов (рис.2). В двигателестроении укоренилось мнение, что этот разброс вызван неравноценностью структуры формул, и потому постоянно изыскивались аргументы в пользу одних формул перед другими.

В диссертации эта точка зрения опровергнута. Показано, что все эти формулы являются модификациями одного критериального уравнения, поэтому их противоречивость является не качественной, а количественной. Количественные же расхождения между формулами разных авторов вызваны несоответствием между упрощенной методикой экспериментов и сложностью реального процесса конвективной теплоотдачи от газов к стенкам цилиндров.

Локальность тепловых повреждений указывает на неидентичность интенсивностей теплоотдачи для разных участков поверхностей цилиндров. Но этим обстоятельством пренебрегали, поэтому при общепринятом теплобалансовом методе испытаний, когда коэффициенты теплоотдачи осреднялись в пределах всего цилиндра, действительные закономерности теплоотдачи, связанные с индивидуальным влиянием многих факторов (особенности

впуска, движения поршня, вытеснения воздуха в камеру сгорания, впрыска, распыливания и горения топлива и т.д.), в разных двигателях искажались по-разному, что и привело к количественной противоречивости эмпирических формул.

Различия в локальных интенсивностях конвективной теплоотдачи удалось подтвердить экспериментально. Для экспериментов использовались упрощенные динамические модели, в которых имитировалось влияние двух основных факторов, действующих в цилиндрах всех поршневых машин - перемещения газа поршнем и изменения параметров газа. Схемы устройства моделей показаны на рис.3.

Модели представляли собой одноцилиндровые установки с Д = 4I и 6I мм. Газ в объеме цилиндров турбулизировался только за счет перемещения поршней. Для исключения тепловыделения от трения верхние части поршней имели относительно гильз цилиндров зазоры около 0,5 мм, а компрессионные кольца располагались в нижней части поршней, и тепло от их трения поглощалось отдельной водяной рубашкой.

Чтобы можно было независимо изменять параметры и скорости газа, установки имели очень низкую (примерно I/20) степень сжатия, так что при перемещении поршня давление и температура газа практически не изменялись. Это позволяло поддерживать фиксированные значения температур газа с помощью электронагревателя и давлений за счет подпитки объема цилиндра через редуктор. Тепло, отдававшееся стенкам цилиндров, воспринималось водяными рубашками гильз и поршней. Замеряя температуры газа и стенок с помощью термопар, можно

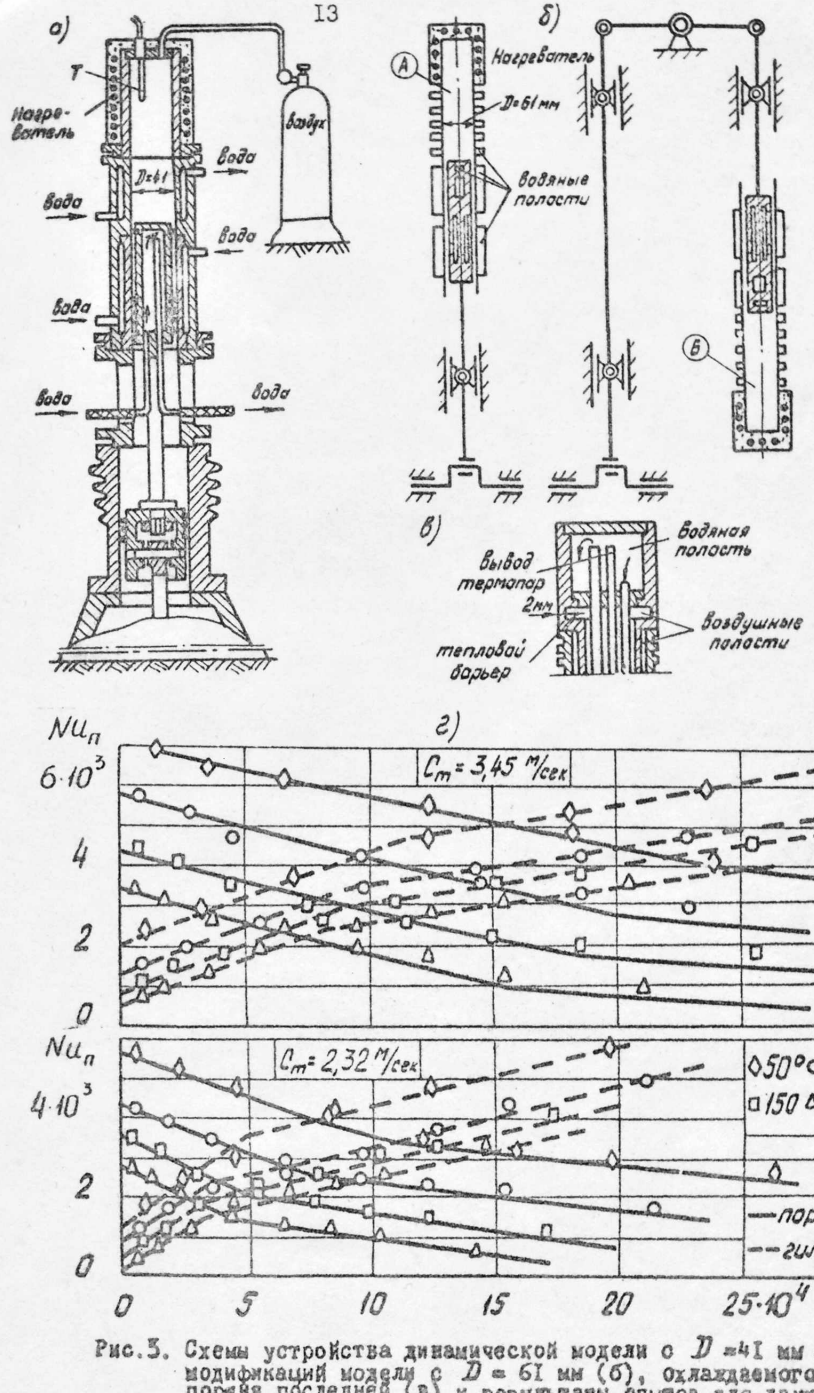


Рис.3. Схемы устройства динамической модели с D =41 мм (а), модификаций модели с D = 61 мм (б), охлаждаемого поршня последней (в) и результаты опытов для двух скоростных режимов (г)

было определять коэффициенты конвективной теплоотдачи от газа к стенкам цилиндров.

Примеры экспериментальных зависимостей по теплоотдаче к днищу поршня и нижней секции гильзы цилиндра для двух режимов по средней скорости поршня, полученные на установке с Д = 6I мм, приведены на рис.3,г. Эти зависимости показывают, что даже в таких простых условиях процесс конвективного теплопереноса от газов к стенкам цилиндров гораздо сложнее, чем это обычно предполагалось; интенсивности теплоотдачи к гильзе и поршню существенно различны по абсолютной величине и по-разному зависят от параметров газа, при некоторых "критических" режимах характер экспериментальных зависимостей изменяется и т.д.

Естественно, что в реальных двигателях процессы теплоотдачи должны быть еще более сложными. А поскольку столь существенные их особенности не учитывались предшествующими исследователями, то и полученные ими материалы о теплоотдаче от газов к стенкам цилиндров не могут быть непосредственно использованы для прогнозирования теплового состояния двигателей.

Для решения этой задачи необходима замена старых методов исследования новыми, соответствующими действительной степени сложности процесса переноса тепла в двигателях.

Исходя из того, что интенсивности теплоотдачи не только к разным поверхностям цилиндров, но и к различным местам этих поверхностей неидентичны, в качестве основного принципа исследований процессов теплообмена в поршневых машинах в дис-

сертации выдвинут принцип локальности. Локальный подход, очевидно, должен распространяться не только на условия теплового нагружения, но и на условия охлаждения, а сложность этих процессов требует сочетания исследований на натуральных объектах и упрощенных моделях, позволяющих вскрывать основные особенности изучаемых процессов. Данные принципы последовательно проводились на всех последующих этапах работы.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК

Вопросы, связанные с исследованием и прогнозированием локальных тепловых нагрузок, обсуждаются в третьей главе диссертации. Здесь прежде всего показано, что хотя в подавляющем большинстве исследователи задавали граничные условия со стороны газов с помощью коэффициентов теплоотдачи, использование этого параметра нерационально.

Температуры теплонапряженных деталей зависят не от условных параметров, какими являются коэффициенты теплоотдачи, определение и использование локальных значений которых к тому же затрудняется практически полным отсутствием сведений о локальных температурах газов, а от тепловых потоков, протекающих через указанные детали в систему охлаждения. При этом, вследствие значительной тепловой инерции металла, практическое значение имеют не мгновенные, а результирующие за цикл, по существу стационарные, тепловые потоки.

Исходя из этого, в диссертации рекомендовано при исследованиях тепловой напряженности поршневых двигателей изучать

и прогнозировать не мгновенные акты теплопереноса, а их интегральные результаты в виде полей локальных тепловых потоков.

Такой подход позволил резко упростить и сделать общедоступной методику измерения локальных тепловых нагрузок, сведя ее к измерению стационарных перепадов температур термопарами. В диссертации рассмотрены особенности таких измерений, проанализированы факторы, влияющие на их точность, оценены погрешности, обусловленные заделкой термопар.

Ввиду того, что в двигателестроении локальные тепловые потоки для задания граничных условий со стороны газов еще не использовались, возникла необходимость в разработке новой методики прогнозирования тепловых нагрузок. В ходе исследований, подробно излагаемых в третьей главе диссертации, удалось разработать оригинальный метод прогнозирования и подтвердить его результативность. Особенности предлагаемого метода и его преимущества по сравнению с методами, разрабатываемыми другими исследователями, видны из следующего.

Мгновенные локальные коэффициенты теплоотдачи от газов к стенкам цилиндров могут быть определены только в виде очень сложной функции времени τ, мгновенных разностей температур между газами и стенками цилиндров $\Delta t_{мгн}$ и скоростей газа w и т.п., параметров, характеризующих режим работы двигателя (давление наддува $p_к$, коэффициент избытка воздуха α, средняя скорость поршня C_m и др.), координат поверхностей (например, радиуса r), особенностей конструкции двигателя (тип и относительный диаметр камеры

сгорания a/D, соотношение тангенциальной и радиальной скоростей газа w_τ/w_R и т.д.)

$$\alpha_\Sigma = F\left(\tau, \Delta t_{мгн}, w, \dots \rho_к, \alpha, C_m, \dots r; \frac{a}{D}, \frac{w_\tau}{w_R}, \dots\right). \quad (I)$$

Сложность зависимостей для мгновенных локальных коэффициентов теплоотдачи затрудняет их экспериментальное определение и обобщение опытных данных, а теоретическим решениям препятствует недостаточная изученность процесса теплопереноса от газов к стенкам цилиндров. Даже если эта трудность будет преодолена, то, видимо, стали бы возможными только частные решения, т.е. для конкретных моделей двигателей, причем только численные для каждого момента времени. Последние еще пришлось бы пересчитывать в результирующие, поскольку именно от них зависят температуры деталей.

Переход к прогнозированию локальных квазистационарных тепловых потоков $\bar{q}$ существенно упрощает задачу, так как, во-первых, избавляет от необходимости осреднения результатов, во-вторых, позволяет исключить из рассмотрения фактор времени и мгновенные разности температур между газом и стенками цилиндров и заменить мгновенные значения других параметров средними. Но использование тепловых потоков дает и третье, гораздо более существенное преимущество.

Измерения локальных тепловых потоков, примеры результатов которых приведены для головок и гильз цилиндров быстроходных четырехтактных дизелей с Д = I30 и S = I40 мм на рис.4, свидетельствуя о значительной неравномерности полей

МВТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

N 180851

тепловых потоков и подтверждая необходимость локального подхода к проблеме теплонапряженности, одновременно показывают, что форма полей тепловых потоков отличается высокой устойчивостью и при изменении в широких пределах частоты вращения, нагрузки и введении наддува, практически почти не изменяется, хотя эти же факторы сильно влияют на абсолютные величины тепловых нагрузок. Форма же этих полей в основном определяется конструктивными особенностями двигателей, и в первую очередь должна зависеть от особенностей организации процесса горения, так как именно при сгорании стенки цилиндров воспринимают основное количество тепла (рис.5).

Зависимость абсолютной величины тепловых потоков в основном от режима работы, а формы их полей - от конструктивных особенностей двигателя имеет громадное практическое значение, ибо позволяет разделить влияние этих факторов, прогнозируя по отдельности абсолютные величины и характер распределения (форму полей) тепловых нагрузок.

Характеристика абсолютной величины — Характеристика формы поля

$$\bar{q} = \overbrace{f_1(P_к, \alpha, C_m, \dots)}^{\text{Характеристика абсолютной величины}} \cdot \overbrace{f_2\left(r, \frac{d}{D}, \frac{W_I}{W_R}, \dots\right)}^{\text{Характеристика формы поля}}. \qquad (2)$$

Это сразу же дополнительно упрощает задачу, поскольку в качестве характеристики абсолютной величины тепловой нагрузки могут быть использованы средние по соответствующим поверхностям тепловые потоки $\bar{q}_z$, величины которых, как изве-

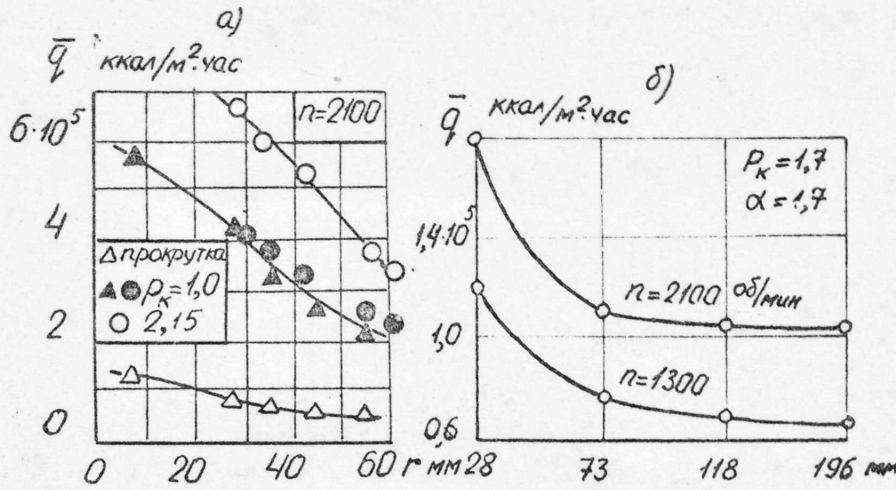


Рис. 4. Поля тепловых потоков для головки /а/ и гильзы /б/ цилиндра

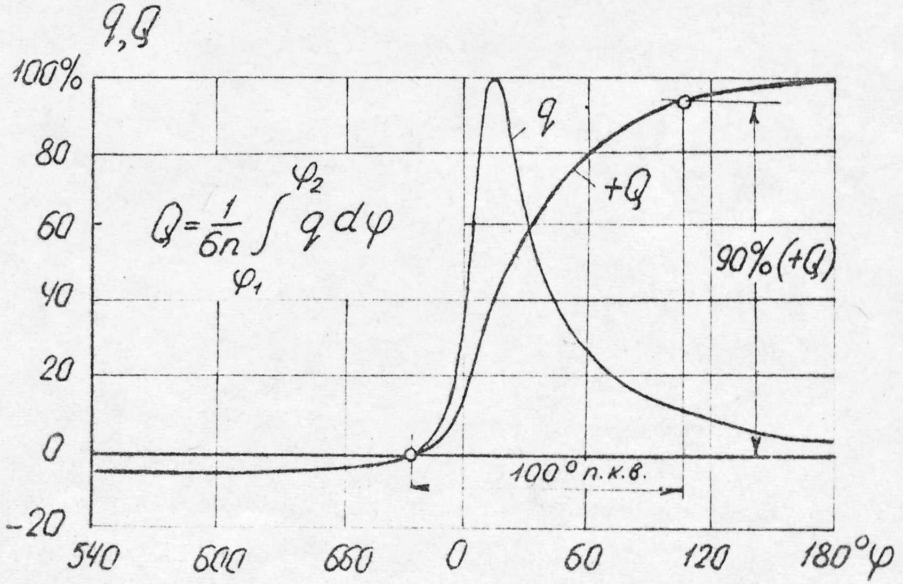


Рис. 5. Типичные зависимости для мгновенного теплового потока и тепла, воспринятого стенкой цилиндра

стно, закономерно связаны с параметрами, характеризующими режим работы двигателя и могут быть выражены через легко определяемые суммарные количества тепла Q_Σ, воспринимаемые соответствующими деталями:

$$f_1(p_к, \alpha, C_m, \dots) = \frac{1}{F}\int_0^F \bar{q}\,dF = \bar{q}_\Sigma = \frac{Q_\Sigma}{F}. \qquad (3)$$

Выражение (2), с учетом (3), приводится к виду

$$\bar{q} = \bar{q}_\Sigma \cdot f_2\left(r, \frac{d}{D}, \frac{w_T}{w_R}, \dots\right). \qquad (4)$$

Определение с достаточной точностью средних тепловых потоков $\bar{q}_\Sigma$ не вызывает затруднений, и потому предлагаемый метод сводит проблему прогнозирования локальных тепловых нагрузок к перераспределению их средних по соответствующим поверхностям значений.

Рассмотренный метод является весьма общим. Он применим не только к двигателям внутреннего сгорания, но и к любым другим объектам, имеющим неравномерные тепловые нагрузки, для которых может быть разграничено влияние режимных и конструктивных параметров (поршневые компрессоры, баллистические двигатели и системы, каналы теплообменных устройств и т.д.). Определять локальные величины путем перераспределения осредненных можно не только для тепловых, но и для ряда других параметров.

Разработанный метод, во-первых, резко упрощает расчетные зависимости. Во-вторых, вся проблема переносится в иную плоскость - именно, от определения количественных, абсолют-

ных характеристик во всех точках поверхности к определению качественных, сравнительных характеристик, т.е. к выяснению соотношений между локальными параметрами, найти которые гораздо легче, чем определять каждый из них независимо от того, делается ли это теоретически или экспериментально. Наконец, метод позволяет использовать результаты исследований, выполненных без учета принципа локальности, которые дают только средние величины тепловых нагрузок и непосредственно для определения локальных величин непригодны.

Для практического использования метода требовалось, применительно к двигателям внутреннего сгорания, количественно определить формы полей тепловых потоков. Чтобы подойти к решению этого вопроса, необходимо было выяснить факторы, влияющие на форму этих полей. В диссертации вскрыты основные из этих факторов, благодаря чему удалось предложить метод решения вышеуказанного вопроса, основанный на обобщении результатов измерений локальных тепловых потоков.

В третьей главе диссертации показано, что неравномерность тепловых нагрузок для поверхностей, постоянно соприкасающихся с газом, в первую очередь вызвана влиянием газодинамических факторов. Здесь наиболее существенное влияние оказывают ориентация тепловоспринимающих поверхностей относительно скоростей газа и локальные уровни турбулентности последнего, причем локальные тепловые нагрузки повышены в зонах, где высока локальная турбулентность и куда течениями газа из объема цилиндра наиболее активно доставляется тепло.

Турбулентность газа в цилиндрах всех двигателей повышена не только около стенок, но и около их осей (нижние части

рис.6, где W и W' - скорости газа и их пульсационные составляющие). В этих условиях характер теплового нагружения головок цилиндров и днищ поршней определяется особенностями движения газа в объемах цилиндров. В частности, при вытеснении воздуха из надпоршневого зазора в объемах камер сгорания формируются образования типа вихревых колец, но направления вращения газа в них зависят от соотношения между радиальной W_R и тангенциальной W_T скоростями воздуха и для случаев $W_T > W_R$ и $W_T < W_R$ оказываются противоположными (средние части рис.6,а и б). В итоге, в первом случае тепло наиболее интенсивно доставляется к центральной части головки цилиндра и периферии поршня, где и наблюдаются максимумы тепловых нагрузок (верхняя часть рис.6,а). Во втором случае у поршня более нагруженной в тепловом отношении оказывается центральная зона, а у головки - районы вблизи края камеры сгорания (верхняя часть рис.6,б). Слабая зависимость формы полей локальных тепловых потоков от режимных параметров объясняется устойчивостью структуры вихревых колец и формы полей интенсивностей турбулентности. Аналогичным образом можно объяснить и особенности теплового нагружения головок цилиндров и днищ поршней для двигателей других типов. А поскольку поверхности, постоянно соприкасающиеся с газами, воспринимают основное количество тепла в период горения, для определения формы полей локальных тепловых потоков необходимо было бы знать особенности движения и турбулентности газов именно в этот период.

Но, оказывается, горение существенно не изменяет уров-

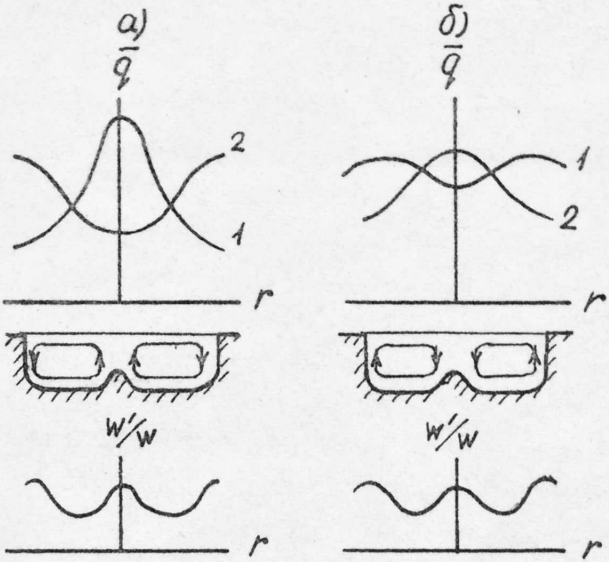


Рис. 6. Связь между характером движения газа, интенсивностью турбулентности и формой полей локальных тепловых потоков в головках цилиндров (1) и днищах поршней (2) для дизелей с $W_T > W_R$ (а) и $W_T < W_R$ (б)

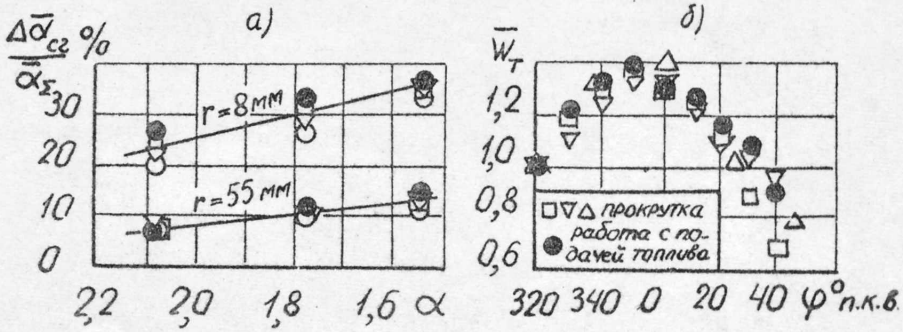


Рис. 7. Влияние горения на локальные интенсивности теплоотдачи к огневому днищу головки цилиндра /а/ и на характер изменения тангенциальных скоростей газа в цилиндре /б/

ния турбулентности в цилиндрах, о чем свидетельствует незначительное возрастание локальных коэффициентов теплоотдачи от газов к стенкам цилиндров при переходе от прокрутки к работе двигателя (рис.7,а). При горении существенно не изменяется и характер движения газа в цилиндрах (рис.7,б). Поэтому при горении в цилиндре сохраняется та же газодинамическая обстановка, которая имела место к концу процесса сжатия и которая определяется особенностями организации процессов смесеобразования и сгорания. Отсюда следует, что и форма полей локальных тепловых нагрузок в головках цилиндров и днищах поршней предопределяется особенностями организации процессов смесеобразования и сгорания. В двигателях, у которых эти особенности аналогичны, локальные тепловые нагрузки могут быть неодинаковыми по абсолютной величине, но их поля по своей форме должны быть подобными.

Неравномерность тепловых нагрузок гильз цилиндров в основном объясняется тем, что разные их участки контактируют с газами разное время, определяемое законами перемещения поршней. Поскольку эти законы для всех двигателей близки, то у однотипных двигателей поля тепловых потоков должны быть подобными и для гильз цилиндров.

Гипотеза о подобии формы полей локальных тепловых потоков в двигателях с аналогичной организацией процессов смесеобразования и сгорания подтверждается экспериментально в широком диапазоне изменения размерностей цилиндров и чисел оборотов (рис.8). На основании этой гипотезы данные о форме полей тепловых потоков, полученные экспериментально на одних

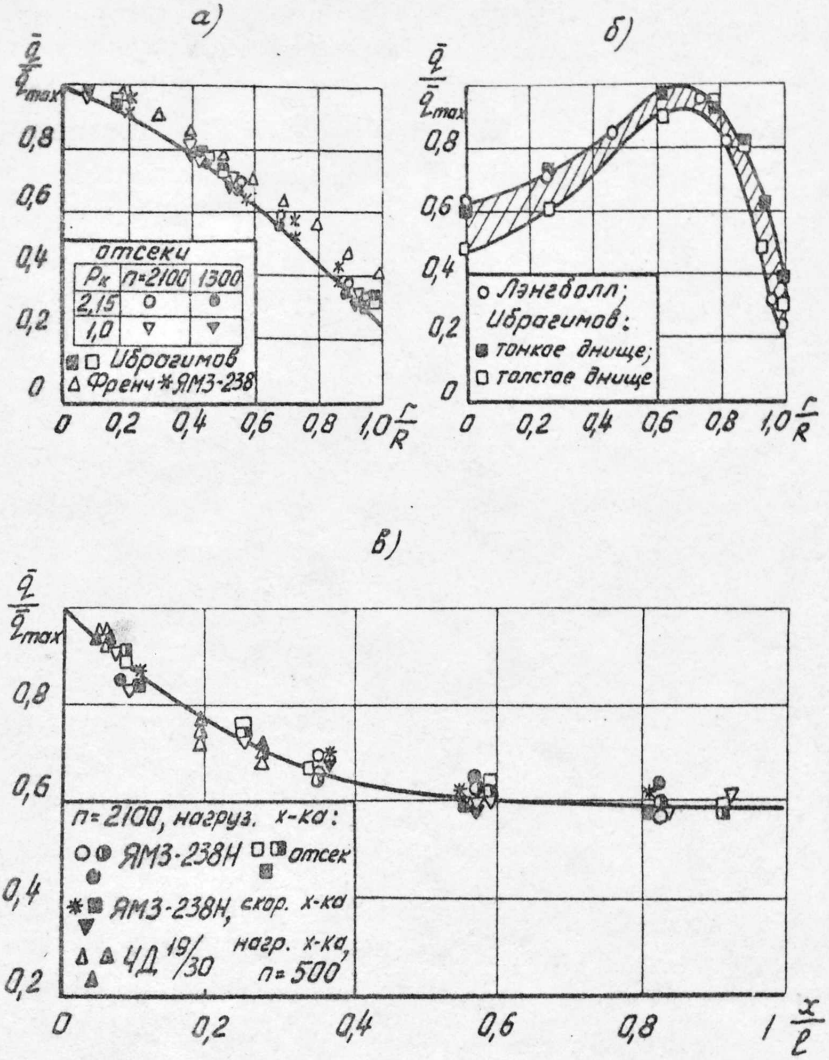


Рис. 8. Обобщенные поля тепловых потоков в головке (а), днище поршня (б) и гильзе (в)

двигателях, можно распространять на другие, если у последних процесс горения организован аналогично.

Имея данные о форме полей локальных тепловых потоков, легко получить зависимости для определения абсолютных величин этих потоков. Так, поля, приведенные на рис.8, можно аппроксимировать следующими формулами:

для головок цилиндров

$$\bar{q}_r = 1{,}79\,\bar{q}_{\Sigma r}\left[1-0{,}72\left(\frac{r}{R}\right)^{1{,}3}\right]; \qquad (5)$$

для боковых поверхностей цилиндров (гильз)

$$\bar{q}_ц = 1{,}53\,\bar{q}_{\Sigma ц}\left(1-0{,}46\sqrt[3]{\frac{x}{L}}\right); \qquad (6)$$

для днищ поршней

$$\bar{q}_п = \bar{q}_{\Sigma п}\left[ae^{1{,}7\frac{r}{R}} - e\left(\frac{r}{R}\right)^3\right]. \qquad (7)$$

В этих формулах x и L - соответственно, расстояние от верхнего обреза и полная длина гильзы цилиндра; при $\frac{r}{R} \le 0{,}7$ $a = 0{,}57$, $e = 2{,}17$, при $\frac{r}{R} > 0{,}7$ $a = 0{,}72$, $e = 3{,}42$. Очевидно, что подобные зависимости будут действительными в тех же пределах, что и обобщенные поля тепловых потоков, т.е. в пределах классов двигателей с однотипной организацией процесса смесеобразования. Если теперь для любого из этих двигателей определить абсолютные значения средних тепловых нагрузок, то будут определены и их локальные значения.

Изложенное показывает, насколько выяснение формы полей тепловых нагрузок облегчает их прогнозирование. В связи с этим как экспериментальные, так и теоретические исследования в области теплонапряженности в первую очередь должны быть ориентированы на определение формы полей тепловых потоков.

В диссертации показано, что для определения средних по тепловоспринимающим поверхностям тепловых нагрузок пригодны три метода.

I. Отбор эмпирических формул, предлагавшихся именно для расчета средней интенсивности теплоотдачи от газов к соответствующим поверхностям.

2. Расчет составляющих теплового баланса, отнесенного к индикаторной мощности двигателя.

3. Обобщение результатов теплобалансовых испытаний с использованием связей между тепловыми нагрузками и режимными параметрами.

В последнем случае расчетные выражения получаются наиболее простыми. С помощью анализа размерностей удалось обосновать структуру расчетной зависимости, а переработав экспериментальные данные А.К.Костина - конкретизировать ее в виде формулы

$$\bar{q}_{\Sigma} = K_T B \frac{(C_m p_k)^{0,57}}{\alpha} \quad \left[\text{ккал/м}^2\text{.час}\right], \quad (8)$$

где C_m - средняя скорость поршня в м/сек, p_k - давление перед впускными органами в ата, α - коэффициент из-

бытка воздуха. Для четырехтактных дизелей $K_т$ = I, для двухтактных $K_т$ = I,78. Для головок цилиндров и днищ поршней $B_{г,п}$ = I32.I0^3, для гильз $B_ц$ = 39.I0^3. Формула основывается на результатах испытаний на режимах, близких к номинальному, около 90 двигателей с диаметрами цилиндров от 85 до 900 мм и числами оборотов от I25 до 2I00 об/мин.

Зависимости (5)-(8) иллюстрируют возможности предлагаемого метода и решают задачу прогнозирования локальных тепловых нагрузок для двигателей с интенсивным вращательным движением газов в цилиндрах при неразделенных камерах сгорания. Для двигателей с другой организацией рабочего процесса (с камерами ЦНИДИ, предкамерных, вихрекамерных и т.п.) необходимо получить аналогичные зависимости экспериментально или теоретически.

Погрешности прогнозирования слагаются из погрешностей формы поля и средних тепловых нагрузок. Каждая из них составляет I0-I5%, поэтому результирующие погрешности локальных тепловых нагрузок должны быть на уровне 20-30%. Если не учитывать неравномерности тепловых нагрузок, ограничиваясь расчетом только их средних значений - как это делалось большинством предшествующих исследователей - то для наиболее напряженных зон головок цилиндров и днищ поршней локальные нагрузки, которые в I,8-2 раза выше средних, были бы занижены примерно на I00%.

Предложенный метод решает задачу прогнозирования локальных тепловых нагрузок на самых ранних стадиях создания двигателя, когда определились лишь его тип, число оборотов и

размерность цилиндров (n, D, S/D), и намечены вид камеры сгорания и основные параметры рабочего процесса ($p_к$, α). Это позволяет уже на этих стадиях подойти к оценке работоспособности различных конструктивных вариантов теплонапряженных деталей и за счет этого ускорить и удешевить доводку двигателя.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ В СИСТЕМАХ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГИЛЬЗ И ГОЛОВОК ЦИЛИНДРОВ

Для решения вопроса о тепловом состоянии деталей, ограничивающих объемы цилиндров, необходимы не только локальные тепловые нагрузки, но и локальные интенсивности охлаждения. В четвертой главе диссертации проанализирован вопрос о том, в какой мере для этой цели могут быть использованы данные, полученные в результате предшествующих исследований теплоотдачи в системах охлаждения д.в.с. Показано, что удовлетворительные данные имеются только для поршней и клапанов. Приведены соответствующие формулы, отмечен положительный эффект, даваемый взбалтыванием теплоносителя, рассмотрены конструкции, позволяющие реализовать такой эффект, даны принципиальные основы оценки конструктивных параметров, обеспечивающих наибольший эффект от взбалтывания.

Для гильз цилиндров соответствующие данные оказались крайне противоречивыми, а для головок практически отсутствовали, поэтому были проведены исследования, обеспечивающие получение зависимостей для прогнозирования локальных интенсивностей охлаждения гильз и головок цилиндров.

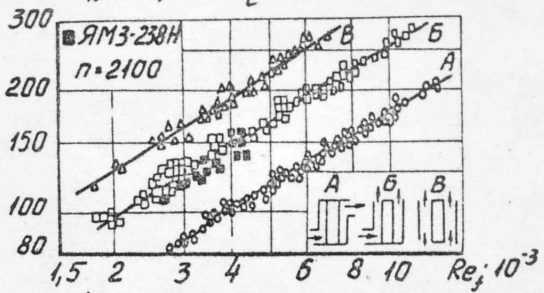
Для решения этой задачи использовался как теоретический анализ, так и результаты опытов, проводившихся на модели системы охлаждения гильз цилиндров и на специально оборудованном для этой цели одноцилиндровом отсеке, в котором можно было осуществлять как совместное, так и раздельное охлаждение гильзы и головки цилиндра при многих вариантах движения воды.

Для двух основных режимов охлаждения гильз цилиндров - вынужденной конвекции и поверхностного кипения - в диссертации проанализированы причины расхождений между результатами исследований разных авторов.

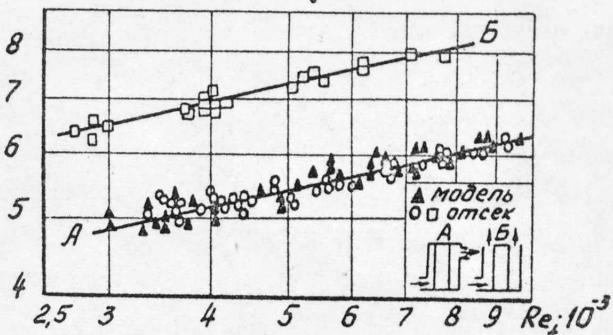
Показано, что расхождения в формулах, предлагавшихся для расчета охлаждения гильз цилиндров в режиме вынужденной конвекции, обусловлены в основном влиянием относительной ширины и длины каналов системы охлаждения и особенностей движения воды. После введения соответствующих параметров получены достаточно четкие экспериментальные зависимости (рис.9,а).

Для режима поверхностного кипения в диссертации установлено, что расхождения между данными разных авторов вызваны тем, что при исследованиях не учитывалась одна из составляющих процесса теплопереноса от стенки к охлаждающей среде - именно, транзит тепла за счет массопереноса через объемы пузырьков, осуществляющегося путем испарения воды в объемы пузырьков с одновременной ее конденсацией в верхней части, выходящей за пределы пограничного слоя, хотя для систем охлаждения д.в.с. эта составляющая в большинстве слу-

$$Nu_f \cdot Pr_f^{-0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{-0,25} \left(\frac{d_э}{d_1}\right)^{-0,85} \cdot \frac{1}{\varepsilon_l} \qquad а)$$



$$\frac{Nu_f}{Re_к^{0,5} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot K^{0,55} \left(\frac{\rho}{\rho_б}\right)^{0,15} \left(\frac{d_э}{l_o}\right)^{0,85} \left(\frac{\gamma''}{\gamma'}\right)^{0,6}} \qquad б)$$



$$\frac{Nu_f}{Re_к^{0,5} \cdot Pr_f^{0,43} K^{0,3} \left(\frac{\rho}{\rho_б}\right)^{0,15} \left(\frac{\gamma''}{\gamma'}\right)^{0,5}} \qquad в)$$

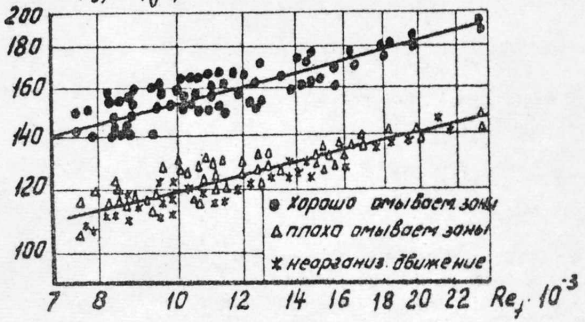


Рис. 9. Опытные данные по теплоотдаче к воде от гильзы цилиндра при вынужденной конвекции (а) и поверхностном кипении (б) и головки цилиндра (в)

чаев является доминирующей. После уточнения совокупности определяющих критериев и параметров и определения степени влияния каждого из них была получена удовлетворительная результирующая зависимость (рис.9,б).

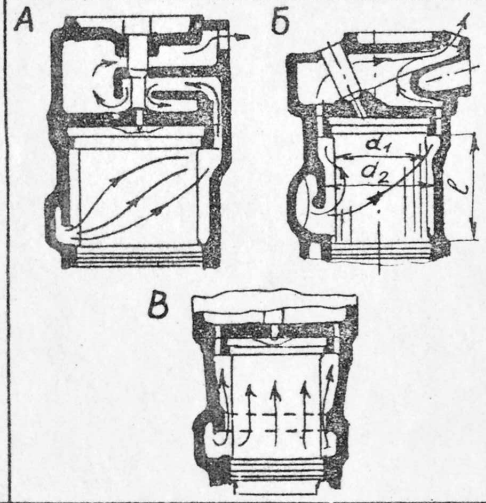
Наконец, реализовав в головке одноцилиндрового отсека три различные схемы течения воды, выяснили, что локальные интенсивности теплоотдачи от охлаждаемых поверхностей огневого днища зависят в основном от тех же параметров, что и для гильзы цилиндра, а также получили экспериментальную зависимость (рис.9,в).

На основании этих зависимостей получены критериальные уравнения (9)-(II), которые вместе с данными об областях их применения приведены в таблице I. Условные обозначения и способы вычисления критериев общепринятые. В уравнении (II), в качестве условной определяющей скорости, принято частное от деления объемного расхода воды на условную площадь, равную произведению диаметра цилиндра на высоту водяной полости, а за определяющий размер для критериев Нуссельта и Рейнольдса принят эквивалентный диаметр этого условного сечения. Введение условных параметров позволяет использовать это уравнение для головок разных типов (с разным числом клапанов, расположением патрубков и т.д.), что подтверждено экспериментально. Уравнение (II) действительно при $7.10^3 \leq Re_f \leq 25.10^3$, $1{,}5 \leq Pr_f \leq 20$, $1 \leq p \leq 2{,}5$ ата, $\bar{q} \leq 500.000$ ккал/м^2.час.

Удалось также установить критические значения теплового

Таблица 1

Зависимости для расчета интенсивности охлаждения гильз и головок цилиндров

Охлаждаем. деталь	Схема движения воды	Режим охлаждения	Расчетные формулы
Гильза		Вынужденн. конвекция	$Nu_f = C\left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0,25} 0,6\, Re_f^{0,43} \cdot Pr_f \cdot \left(\frac{d_2}{d_1}-1\right)^{0,85} \cdot \left(1+1,8\frac{d_1}{\ell}\right)$ (9) $1500 < Re_f < 15000$ $1,5 < Pr_f < 20$; $1,15 < \frac{d_2}{d_1} < 2$, $1,0 < \frac{\ell}{d_1} < 10$. Схема: А — C = 0,72; Б — C = 1,03; В — C = 1,34
		Поверхн. кипение	$Nu_f = C_K Re_f^{0,21} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot Pe_K^{0,5} \cdot K^{0,55} \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,15} \cdot \left(\frac{d_э}{\ell_0}\right)^{0,85} \cdot \left(\frac{\gamma''}{\gamma'}\right)^{0,6}$ (10) $2000 < Re_f < 10000$ $1,5 < Pr_f < 20$; $1 < p < 2$ ата $0,0,1 < d_э < 0,06$ м; $0,7 \cdot 10^{-3} < \frac{\gamma''}{\gamma'} < 1,4 \cdot 10^{-3}$; $3 < d_э/\ell_0 < 30$; $q < 150000$ $\frac{ккал}{м^2 \cdot ч}$. Схема: А — C_K = 0,89; Б — C_K = 1,21; В — C_K = 1,55
Головка	Все модификации с большими объемами водяных полостей	То же	$Nu_f = C_г \cdot Re_f^{0,23} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot Pe_K^{0,5} \cdot K^{0,3} \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0,15} \cdot \left(\frac{\gamma''}{\gamma'}\right)^{0,5}$ (11) Для зон, омываемых струями воды, $C_г$ = 18,6. Для застойных зон $C_г$ = 14,2. Пояснения в тексте.

потока, при которых наступает поверхностное кипение. Они определяются соотношением

$$Re_{K(кр)} = \left[\frac{C}{C_к}\left(1+1{,}8\,\frac{d_1}{\ell}\right)\right]^2 \cdot Re_f^{0{,}78} \cdot \frac{\left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0{,}5} \cdot \left(\frac{\ell_0}{d_1}\right)^{1{,}7}}{K^{1{,}1} \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0{,}3} \cdot \left(\frac{\gamma''}{\gamma'}\right)^{1{,}2}} \quad . \qquad (12)$$

Все критериальные зависимости дали удовлетворительное совпадение с результатами проверочных испытаний развернутых двигателей. Использование их решает вопрос об определении локальных интенсивностей охлаждения гильз и головок цилиндров.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

В пятой главе диссертации сведения об особенностях теплового нагружения и охлаждения были использованы для решения ряда основных вопросов, возникающих при конструировании теплонапряженных деталей.

В диссертации показано, что основной задачей при конструировании таких деталей является выравнивание полей температур и что это может быть достигнуто путем выбора режима охлаждения или рационального конструктивного оформления. Установлены признаки, позволяющие выяснять, чем вызвана неравномерность температур - недостатками в организации охлаждения или конструктивными факторами. Проанализировано влия-

ние, оказываемое режимом охлаждения на форму полей температур.

Возможности воздействия на форму полей температур при охлаждении в режиме вынужденной конвекции ограничены, т.к. интенсивность охлаждения растет медленнее скорости теплоносителя, и интенсификация охлаждения связана с резким увеличением служебных затрат мощности. В то же время сравнительно сильное влияние скорости теплоносителя обусловливает и сильное отрицательное влияние технологических отклонений в форме и размерах каналов системы охлаждения. В режиме поверхностного кипения влияние скоростей теплоносителя незначительное, а интенсивность охлаждения с повышением тепловой нагрузки и температуры теплоносителя автоматически возрастает, что смягчает влияние технологических отклонений и приводит к выравниванию полей температур; последнее может быть особенно эффективно достигнуто при локализованном охлаждении некоторых зон в режиме развитого кипения, для чего имеются конструктивные возможности.

В диссертации выяснено распределение тепла по поверхностям теплонапряженных деталей и установлено, что для головок цилиндров и днищ поршней основные количества тепла подводятся в кольцевых зонах между 40-50 и 80-85% радиуса, в которых и должен осуществляться основной теплоотвод.

Получены экспериментальные зависимости температур в различных зонах головок цилиндров от скоростей, расходов и направления потоков теплоносителя, свидетельствующие о слабом влиянии этих факторов. Проанализирован вопрос о соот-

ветствии форм огневых днищ особенностям их теплового нагружения и охлаждения и показан значительный эффект, который может дать профилирование огневых днищ по толщине. Приведены методика профилирования и экспериментальные данные, свидетельствующие о существенном снижении в профилированных днищах градиентов температур и термических напряжений.

Для днищ поршней и зон расположения поршневых колец рассмотрены методы обеспечения приемлемых рабочих температур в неохлаждаемых и охлаждаемых конструкциях. Приведены данные о влиянии, которое оказывают на температуру днищ неохлаждаемых поршней основные параметры рабочего процесса и некоторые конструктивные параметры (нагрузка, коэффициент избытка воздуха, форма и размеры камеры сгорания, угол опережения, размещение поршневых колец и др.). Для охлаждаемых поршней рассмотрено влияние зоны теплоотвода, способа подачи масла и формы масляных полостей и даны рекомендации по этим вопросам, конструктивному оформлению и возможной технологии изготовления.

Для гильз цилиндров, основная часть поверхности которых у большинства двигателей охлаждается в режиме вынужденной конвекции, получены данные о положительном влиянии равномерного омывания теплоносителем по форму полей и абсолютные величины температур рабочих поверхностей и систематизированы конструктивные решения, позволяющие нормализовать тепловое состояние гильз цилиндров.

Сформулирован ряд рекомендаций по выбору параметров рабочего процесса, влияющих на тепловое состояние двигателя

(тангенциальной скорости воздуха, диаметра камеры сгорания и т.д.). Установлено, что наддув слабо влияет на среднюю разность температур между газом и стенками цилиндров, и потому повышение тепловых нагрузок при наддуве обусловливается в основном ростом плотности газа. Полученные данные объясняют и позволяют количественно оценивать положительный эффект от увеличения коэффициента избытка воздуха и ограничения максимальных давлений сгорания.

В итоге комплекса исследований, рассмотренных выше, впервые получено достаточно данных для того, чтобы определять рациональные области применения тех или иных конструкций теплонапряженных деталей, причем решение этого вопроса стало возможным на самых ранних стадиях проектирования двигателей.

В качестве примера на рис.10 приведены зависимости, позволяющие обосновать выбор конструктивного варианта головки цилиндра четырехтактного дизеля. С помощью предложенных в диссертации формул для расчета тепловых нагрузок легко связать максимальные величины последних с режимными параметрами двигателя (нижняя часть), а с помощью формул для расчета интенсивности охлаждения - увязать, как это сделано в верхней части, перепады температур в пограничном слое охлаждающей среды $\Delta t_б$ и в огневом днище Δt с интенсивностью охлаждения ($а$ и $в$ - поверхностное кипение соответственно при небольших и высоких скоростях течения, $б$ - развитое кипение), видом металла и конструктивными особенностями огневого днища. Имея данные о предельных уровнях температур

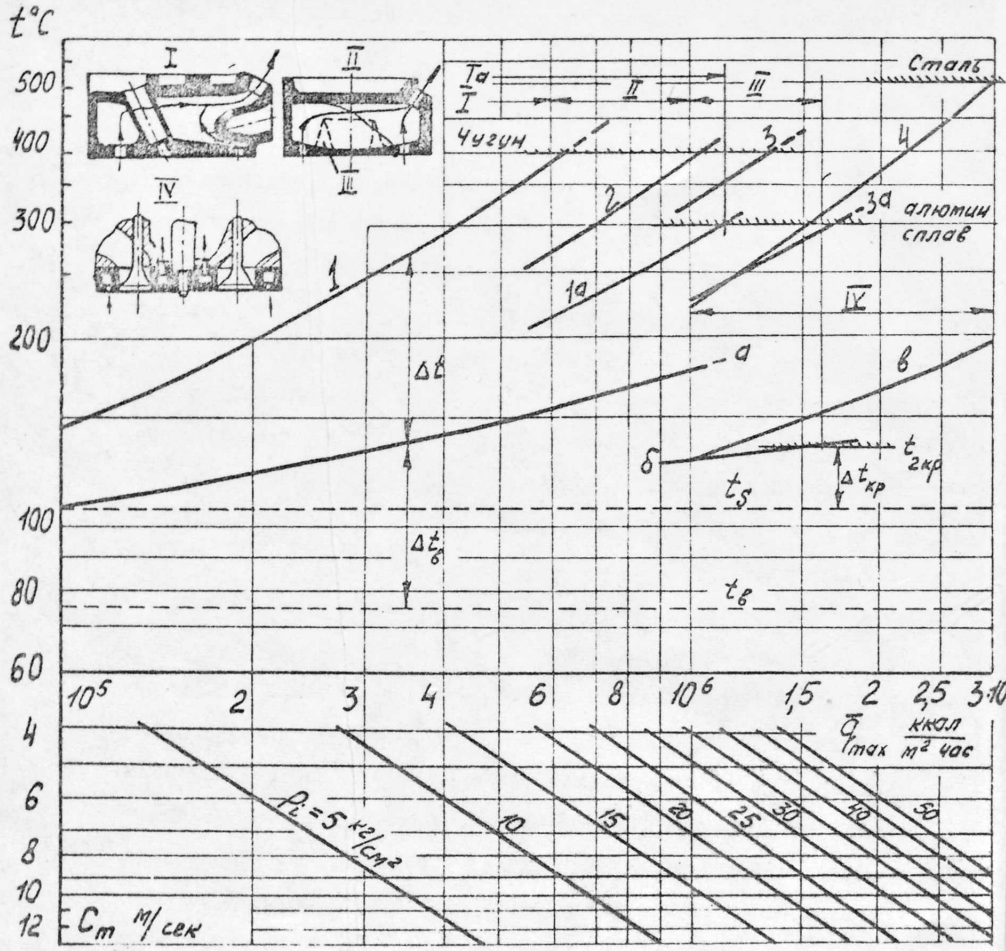


Рис. 10. Области применения основных модификаций головок цилиндров в зависимости от уровня форсировки четырехтактного дизеля.

1, 2, 3 – максимальные температуры тепловоспринимающих поверхностей при использовании чугуна, 1а, 3а – алюминиевых сплавов, 4 – стали; а и в – температуры поверхностей, охлаждаемых в режиме поверхностного кипения соответственно при малых и высоких скоростях воды, б – то же при развитом кипении.

тепловоспринимающих поверхностей, можно достаточно четко определить области работоспособности основных типов головок.

Так, для непрофилированных чугунных огневых днищ (схема I) при охлаждении в режиме поверхностного кипения нежелательно превышать значения $\bar{q}_{max} = 6.10^5$ ккал/м^2.час. Профилирование огневого днища (схема II) отодвигает этот предел примерно до 10^6 ккал/м^2.час, а усиление охлаждения центральной зоны (схема III) - до $1{,}5.10^6$ ккал/м^2.час. Приблизительно такими же оказываются области применения аналогичных конструкций из алюминиевых сплавов, но при $\bar{q}_{max} = (0{,}5 \div 1).10^6$ ккал/м^2.час последние должны быть надежнее, ибо их температуры несколько дальше от предельных, чем у чугунных.

Работоспособность этих конструкций лимитируется образованием паровой пленки со стороны охлаждения при достижении температуры $t_{2кр}$. Это может быть предотвращено резким повышением скорости теплоносителя, но тогда для уменьшения затрат мощности на циркуляцию необходимо уменьшить его расход, осуществив движение в узких каналах только непосредственно в зонах теплоотвода (схема IУ). Необходимость снизить перепады температур в стенках приводит к уменьшению их толщины и требует применения сталей, что позволяет поднять предельные тепловые нагрузки примерно до 3.10^6 ккал/м^2.час. Далее, видимо, необходим переход от четырехтактных двигателей к двухтактным с расходящимися поршнями. С помощью данных, приведенных в диссертации, можно таким же образом выбрать конструктивные варианты поршней и гильз цилиндров и тем самым значительно облегчить конструирование и доводку теплонапряженных деталей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации впервые подвергнут критическому пересмотру весь комплекс вопросов, связанных с проблемой тепловой напряженности деталей двигателей внутреннего сгорания, вскрыты причины низкой результативности общепринятых методов и предложены более эффективные методы исследований и обобщения опытных данных.

На этой основе сформировано новое научное направление в области изучения тепловой напряженности. Его отличительными особенностями являются: подход к особенностям локального теплового нагружения и охлаждения, сочетание исследований на действующих двигателях и моделях, имитирующих отдельные стороны исследуемых процессов, и количественная характеристика нестационарного циклического теплопереноса с помощью интегральных показателей, локальные значения которых определяются посредством перераспределения их средних по соответствующим поверхностям величин.

В итоге существенно уточнены особенности физических механизмов процесса теплопереноса в двигателях и факторы, влияющие на работоспособность теплонапряженных деталей, что впервые позволило просто и достаточно точно прогнозировать локальные граничные условия теплового нагружения и охлаждения, обосновать рациональные области применения известных и предложить ряд новых конструктивных решений.

В качестве наиболее существенных результатов, достигнутых в работе, могут быть отмечены следующие.

I. Выявлены типы двигателей, освоенных промышленностью, которые соответствуют рациональным принципам преобразования тепловой энергии в механическую, и показано, что проблемы механической и тепловой напряженности целесообразнее всего решать путем усовершенствования этих двигателей.

2. Установлена зависимость доли тепла, передаваемого стенкам цилиндров посредством радиации, от особенностей организации рабочего процесса и режима работы и определены классы двигателей, для которых этот вид теплоотдачи имеет существенное значение.

3. Теоретически и экспериментально доказано, что структуры всех формул, предлагавшихся для расчета конвективной теплоотдачи от газов к стенкам цилиндров, идентичны и что они не отражают действительной степени сложности этого процесса и различий в интенсивности теплоотдачи к разным поверхностям цилиндров.

4. Сформулирован и впервые последовательно применен ко всем сторонам процесса теплопередачи в двигателях принцип локальности; обоснованы преимущества использования интегральных показателей процесса - локальных квазистационарных тепловых потоков - в качестве параметров теплового нагружения. Впервые установлено, что величина локальных тепловых нагрузок зависит от двух групп факторов, влияние каждого из которых может учитываться раздельно.

5. Разработан новый принцип прогнозирования локальных тепловых нагрузок, сводящийся к перераспределению их средних значений и пригодный для любых объектов, в которых мо-

жет быть разграничено влияние на теплонапряженность режимных и конструктивных параметров. Показано, что для создания практических расчетных методик первостепенное значение имеет выяснение факторов, влияющих на форму полей тепловых потоков.

6. Выяснено, что неравномерность тепловых нагрузок поверхностей цилиндров вызвана преимущественно газодинамическими факторами, определяется локальными значениями относительных интенсивностей турбулентности и ориентацией поверхностей относительно движения газа и зависит в основном от качественных особенностей процесса смесеобразования.

7. Сформулирована и подтверждена экспериментально гипотеза о подобии полей локальных тепловых потоков для двигателей с однотипной организацией рабочего процесса, на основе которой разработана оригинальная методика определения полей локальных тепловых нагрузок для головок, поршней и гильз цилиндров, доведенная до практического приложения для двигателей с интенсивным вращением воздушного заряда и неразделенными камерами сгорания.

8. Уточнены физические особенности процесса теплоотдачи при различных режимах водяного охлаждения и системы определяющих критериев и параметров.

9. Получены более полные и надежные критериальные зависимости для расчета локальных интенсивностей охлаждения гильз и головок цилиндров на различных режимах и для разных схем движения теплоносителей; определены критические режимы, при которых происходит смена этих режимов.

IO. Разработаны рекомендации, основанные на действительных условиях работы теплонапряженных деталей:

а) по выбору режима и методам интенсификации охлаждения;

б) по выбору схем движения теплоносителя и зон, нуждающихся в усиленном теплоотводе;

в) по методам управления полями температур теплонапряженных деталей;

г) по рациональному конструктивному оформлению этих деталей с учетом особенностей теплового нагружения и охлаждения;

д) по выбору значений конструктивных и режимных параметров, влияющих на тепловое состояние двигателя.

Ряд положений, впервые выдвинутых автором, получил резонанс в научно-технической литературе и практике исследований; особенно это относится к принципу локальности, использованию полей локальных тепловых потоков и моделированию отдельных сторон сложных процессов на упрощенных моделях. Методы исследований и расчетов, разработанные автором, внедрены в учебный процесс Ярославского политехнического института. На основании их производится планомерная подготовка инженеров, ориентированных в вопросах теплонапряженности, и комплектование из них специализированных заводских лабораторий. На ЯМЗ, из выпускников ЯПИ, сформированы и успешно действуют две такие лаборатории - теплонапряженности и систем охлаждения; в стадии организации находятся аналогичные подразделения на некоторых других заводах.

Результаты диссертации переданы ряду предприятий и

организаций, в том числе: заводам им.Лихачева и Дегтярева, Ярославскому и Рыбинскому моторостроительным заводам, НАМИ и некоторым другим организациям; используются при модернизации существующей и разработке новой техники.

Основные материалы диссертации освещены в следующих опубликованных работах:

1. Стефановский Б.С. Критерий и метод расчета тепловой напряженности двигателя внутреннего сгорания. "Вестник машиностроения", 1962, № 8.

2. Стефановский Б.С., Кулев В.Я., Ретюхин Е.П. Влияние знакопеременных поперечных ускорений на конвективную теплоотдачу в каналах. "Энергомашиностроение", 1967, № 9.

3. Милков В.А., Стефановский Б.С. К вопросу о закономерностях конвективной теплоотдачи в цилиндрах поршневых машин. "Известия ВУЗов. Машиностроение", 1969, № 7.

4. Кулев В.Я., Стефановский Б.С. Теплоотдача при заторможенном кипении и переходном режиме течения в каналах. Ученые записки ЯТИ, т.12, вып.2, 1970.

5. Ховах М.С., Стефановский Б.С. и др. К вопросу теплонапряженности быстроходных дизелей. "Известия ВУЗов. Машиностроение", 1971, № 10.

6. Новенников А.Л., Стефановский Б.С. О некоторых закономерностях теплоотдачи от гильзы цилиндра к охлаждающей жидкости в поршневых двигателях. Труды Костромского сельхозинститута, вып.32, 1971.

7. Новенников А.Л., Стефановский Б.С. Влияние геометрических параметров кольцевого канала с внутренним обогревом на теплоотдачу конвекцией к жидким теплоносителям. Сборник "Тепло- и массоперенос в телах и системах при различных граничных условиях", вып.2, Омск, 1971.

8. Стефановский Б.С. О показателях двигателей, использующих тепловое расширение твердых тел. "Вопросы двигателестроения". Сборник научных трудов. Ярославль, 1972.

9. Стефановский Б.С. К вопросу о выборе типа силовой установки для наземного транспорта. "Вопросы двигателестроения". Ученые записки ЯТИ, т.29, 1972.

10. Новенников А.Л., Стефановский Б.С. О закономерностях теплоотдачи в жидкостных системах охлаждения. "Вопросы двигателестроения", Ученые записки ЯТИ, т.29, 1972.

11. Ховах М.С., Стефановский Б.С. и др. Метод расчета локальных тепловых потоков в головках цилиндров двигателей. "Известия ВУЗов. Машиностроение", 1972, № 2.

12. Стефановский Б.С. и др. Испытания двигателей внутреннего сгорания. "Машиностроение", 1972.

13. Милков В.А., Стефановский Б.С. Методика и результаты исследований конвективной теплоотдачи, инициируемой движением поршня с плоским днищем в цилиндре динамической модели. "Машины и технология переработки каучуков, полимеров и резиновых смесей", Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1972.

14. Милков В.А., Стефановский Б.С. О применимости опытных формул, полученных на динамических моделях, для расчета конвективной теплоотдачи в цилиндре поршневого компрессора. "Машины и технология переработки каучуков, полимеров и резиновых смесей". Межвузовский сборник научных трудов. Ярославль, 1972.

15. Стефановский Б.С. Выбор схемы для преобразования тепловой энергии в механическую применительно к автономным теплоэнергетическим установкам умеренной мощности. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1973.

16. Стефановский Б.С., Жаров А.В. К вопросу о теплоотдаче газа к головке быстроходного дизеля. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1973.

17. Жаров А.В., Стефановский Б.С., Милков В.А. Влияние диаметра камеры сгорания на теплоотдачу в головку цилиндра двигателя. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1973.

18. Стефановский Б.С., Новенников А.Л., Пикус В.И. Метод расчета локальных тепловых потоков в гильзах цилиндров дизелей. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1973.

19. Новенников А.Л., Стефановский Б.С. К вопросу выбора режима работы системы охлаждения гильзы цилиндра поршневого двигателя. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1973.

20. Стефановский Б.С., Жаров А.В. О факторах, влияющих на неравномерность тепловых потоков в головках цилиндров и днищах поршней. "Вестник машиностроения", 1975, № 2.

21. Стефановский Б.С. и др. Некоторые особенности работы компрессионных поршневых колец быстроходных автотракторных дизелей. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1975.

22. Стефановский Б.С. и др. Уточнение закономерностей теплообмена в замкнутом объеме цилиндра. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1975.

23. Стефановский Б.С., Новенников А.Л., Пикус В.И. Теплобалансовые характеристики быстроходного автотракторного дизеля. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1975.

24. Стефановский Б.С. и др. Методика и некоторые результаты исследования движения воды в каналах головки цилиндров. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1975.

25. Стефановский Б.С. и др. Исследование основных закономерностей теплоотдачи в полости охлаждения головки цилиндра. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1975.

26. Пикус В.И., Стефановский Б.С., Новенников А.Л. Влияние установки термопар на точность измерения температур деталей ДВС. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1975.

27. Стефановский Б.С., Новенников А.Л., Пикус В.И. О повышении работоспособности головок цилиндров дизелей с неразделенными камерами сгорания. "Автомобильная промышленность", 1976, № 3.

28. Стефановский Б.С., Истомин А.Н. Конвективная теплоотдача к стенкам цилиндрического объема. "Известия ВУЗов. Машиностроение", 1976, № 8.

29. Стефановский Б.С. и др. Расчет давлений газа в межкольцевом пространстве поршней двигателей внутреннего сгорания. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1976.

30. Стефановский Б.С. и др. Оценка температур на фактических пятнах контакта в условиях двигателя внутреннего сгорания. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1976.

31. Стефановский Б.С., Новенников А.Л., Игнашин В.Е. К вопросу об исследовании теплового состояния выпускных клапанов. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1976.

32. Стефановский Б.С., Истомин А.Н. Некоторые закономерности теплообмена в цилиндрическом объеме при резких колебаниях параметров газа. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1976.

33. Стефановский Б.С. Прогнозирование локальных тепловых нагрузок в теплонапряженных деталях двигателей внутреннего сгорания. "Двигатели внутреннего сгорания". Межвузовский сборник научных трудов, Ярославль, 1976.

34. Стефановский Б.С. Выбор основных параметров двигателей с учетом их назначения и ограничений по износостойкости и теплонапряженности. Ярославль, 1977.

АК 00404. Подписано в печать 20/У-1977 г. Формат 60x84 1/16.
Усл.печ.л. 3,02, Заказ 893. Тираж 200. Бесплатно.

Типография Ярославского политехнического института
Ярославль, ул.Советская, 14а

Отпечатано на ротапринте