126381

На правах рукописи
УДК 621.41

СВЕТЛОВ Владимир Анатольевич

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООБМЕНА ВО ВНУТРЕННЕМ КОНТУРЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА

Специальность

05.04.02 - Тепловые двигатели

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1999

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана

Научный руководитель - к.т.н., доцент Ефимов С. И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Фомин В.М.
кандидат технических наук Полтараус В.Б.

Ведущая организация: АМО ЗИЛ

Защита диссертации состоится «21» 06 1999 г. в 14 час. на заседании диссертационного Совета К.053.15.05 «Тепловые машины и теоретические основы теплотехники» в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская наб., д. 1, ф-т «Энергомашиностроение»

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экз., заверенный печатью, просим выслать по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, МГТУ им. Н. Э. ...изированного Совета

...50 1999 г.

Еф...

1563371

...бъем 1 пл. Тир. 100 эк...
...и. Н. Э. Баумана

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана
1563371
Светлов В.А. Расчетно-экс...

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в мире наблюдается повышенный интерес к двигателям Стирлинга, что в первую очередь связано с их высокими экологическими показателями. Низкий уровень шума при работе двигателя и низкая токсичность продуктов сгорания, а так же возможность использования в качестве топлива практически любых органических отходов - все это делает разработку энергосиловых установок на базе двигателя Стирлинга весьма перспективной. В то же время перед разработчиком стоит задача проектирования основных теплонапряженных деталей двигателя, таких как головка цилиндра, гильза, нагреватель с учетом особенностей их работы. Если для предварительного проектирования двигателя можно использовать эмпирические уравнения, основанные на экспериментальных данных, то для определения теплового и напряженно-деформированного состояния деталей двигателя информации для задания граничных условиях явно недостаточно.

Не имея объективных данных о параметрах теплообмена во внутреннем контуре, невозможно оценить температурное поле детали, количество введенной и потерянной теплоты. Без информации о тепловом состоянии детали невозможно оценить величину тепловых деформаций и напряжений и, следовательно, невозможно правильно оценить надежность конкретной детали и всего двигателя в целом. Следовательно, значения тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи во внутреннем контуре двигателя Стирлинга необходимы как при разработке новых двигателей, так и при доводке уже существующих образцов. К сожалению, в настоящее время отсутствуют не только объективные данные о параметрах теплообмена во внутреннем контуре, но и не представлены способы их получения. Таким образом, получение объективных данных о параметрах теплообмена во внутреннем контуре двигателя Стирлинга и разработка методики для их определения является весьма актуальной задачей.

Цель работы. Разработать методику, соответствующее программное и аппаратное обеспечение для определения параметров теплообмена во внутреннем контуре двигателя Стирлинга и определить эти параметры для реального экспериментального двигателя.

Научная новизна. Впервые диссертантом была разработана расчетно-экспериментальная методика определения параметров теплообмена во внутреннем контуре двигателя Стирлинга. Впервые при помощи разработанной диссертантом методики были определены средне-интегральные коэффициенты теплоотдачи в горячей полости и в зазоре между поршнем-вытеснителем и гильзой экспериментального двигателя Стирлинга.

Практическая ценность. В процессе выполнения работы были разработаны программное обеспечение для определения теплового состояния

1563371

МГТУ им. Н. Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

деталей двигателя Стирлинга, автоматизированная система измерения температурных полей, которая применяется в учебном процессе кафедры Э-2 МГТУ им. Н. Э. Баумана и для научных исследований в НИИ ЭМ МГТУ им. Н. Э. Баумана. Разработанная методика и программно-аппаратные средства могут быть использованы при разработке новых и доводке существующих образцов двигателя Стирлинга, что позволит значительно сократить сроки НИР и ОКР.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на 52 научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, 24-29 января 1994 г., международной научно-технической конференции «Двигатель-97», 14-16 октября 1997 г., Москва МГТУ им. Н. Э. Баумана, на научно-технических семинарах НИИ ЭМ МГТУ им. Н. Э. Баумана, а также на семинарах кафедр Э-2 и Э-6 МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 11 печатных работах и приведены в 2 научно-технических отчетах НИИЭМ МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных источников. Работа изложена на 159 страницах основного текста, содержит 45 рисунков, 9 таблиц, приведенная библиография насчитывает 149 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели работы, представлена структура диссертации.

В первой главе показано, что в настоящее время единственным реальным способом определения параметров граничных условий во внутреннем контуре двигателя Стирлинга (ДС) является способ, основанный на решении обратной внешней задачи теплопроводности (ОЗТ). Были рассмотрены все возможные схемы и методы решения обратной задачи теплопроводности и произведен выбор схемы и метода, наиболее полно удовлетворяющих поставленным условиям. Проведен анализ существующих методов определения теплового состояния деталей. Выполнен обзор имеющихся способов решения задач оптимизации. Приведена сравнительная характеристика существующих средств автоматизации измерений. В завершении главы сделаны выводы об актуальности направления работы, сформулированы ее цели и задачи.

При создании нового двигателя Стирлинга также как и при доводке существующих образцов, перед разработчиком встает проблема ввода теплоты во внутренний контур. Для проектирования и доводки теплообменных аппаратов необходимо знать параметры теплообмена. Параметры граничных условий в полостях и теплообменных аппаратах также необходимы и для проведения расчетов теплового и напряженно-

деформированного состояния деталей ДС. Попытки оценки параметров теплообмена в полостях проводились и в нашей стране. Правда, большая часть работ, проводимых в данной области, была посвящена не ДС, а криогенным газовым машинам, работающим по циклу Стирлинга. Следует заметить, что во всех работах параметры теплообмена определялись исходя из суммарного количества подводимой или отводимой теплоты без учета влияния изменения температур в полостях.

К сожалению, конструктивные особенности ДС не позволяют получить необходимые данные путем непосредственных измерений. Поскольку в качестве рабочего тела ДС используются такие легкотекучие газы, как гелий или водород, то измерения температур и тепловых потоков в полостях ДС связаны с большими трудностями из-за проблемы уплотнения датчиков. Измерение каких-либо параметров внутри теплообменников невозможно из-за их малых геометрических размеров. К трудностям измерений относится и то, что при установке датчиков возникают дополнительные «мертвые» объемы, которые отрицательно сказываются на качестве рабочего процесса двигателя. Именно сложность определения реальных параметров теплообмена во внутреннем контуре ДС заставляет применять различные допущения при анализе рабочего процесса. Однако при доводке конкретного двигателя, требуется более точная информация. Поскольку определить параметры теплообмена во внутреннем контуре ДС методом прямых измерений не представляется возможным, наиболее приемлемым для получения требуемых данных остается один способ - это решение обратной задачи теплообмена (ОЗТ). В этом случае для определения параметров теплообмена во внутреннем контуре ДС, необходимо при решении задачи определения теплового состояния головки ДС, подобрать такие граничные условия, чтобы расчетное температурное поле совпадало с экспериментальным. Тогда можно говорить об идентичности параметров теплообмена, полученных расчетным путем, с реальными.

Существует несколько методов решения задач теплопроводности в областях сложной формы. В основе всех лежит уравнение теплопроводности в той или иной постановке и все они базируются на его численном решении. Численные методы, развитые для решения дифференциальных уравнений в частных производных, описывающие различные физические процессы, можно условно разбить на две основные группы. В одной из них используется аппроксимация функции в расчетной области, в другой - аппроксимация функций на ее границе. К первой группе относятся методы конечных элементов и контрольного объема. Вторую группу представляют метод граничных элементов и метод граничных интегральных уравнений.

После тщательного анализа достоинств и недостатков каждого метода выбор был остановлен на конечноэлементном методе контрольного объема (МКЭ-КО).

Существующие методы решения оптимизационных задач условно можно разделить на две группы. К первой группе относятся способы решения задачи, при которых производится вычисление целевой функции по всей области оптимизации. В качестве примера можно привести метод прямого перебора. Ко второй группе можно отнести методы решения, при которых, после вычисления целевой функции, определяется направление поиска и шаг. Ярким представителем данной группы являются известные всем методы половинного деления или метод золотого сечения.

И первая, и вторая группа имеют свои достоинства и свои недостатки. К достоинствам первой группы можно отнести устойчивость решения, определение именно глобального экстремума функции и получение решения с заданной точностью. Однако, данный метод имеет один крупный недостаток - задачу приходится решать многократно. При учете того, что решение прямой задачи теплопроводности требует значительного времени, процесс получения решения оптимизационной задачи требует колоссальных затрат вычислительных ресурсов. Для реализации способа решения, сочетающего достоинства обоих методов и свободного от их недостатков необходима разработка специального алгоритма.

Для решения ОЗТ большое значение имеют исходные данные, к которым в первую очередь относится экспериментальная информация, от объема и достоверности которой зависит не только точность решения, но возможность его получения вообще. В качестве данных для решения ОЗТ могут выступать либо данные о температурном поле исследуемой детали, либо данные о тепловых потоках в ней. Как было указано выше, получение данных о тепловых потоках в двигателе Стирлинга крайне затруднено из-за особенностей его конструкции, поэтому рассмотрим возможность получения наиболее полной и достоверной информации о температурном поле деталей.

В настоящее время уровень развития электроники и вычислительной техники вырос настолько, что автоматизация научного эксперимента стала не просто желательным, а обязательным требованием к проведению экспериментальных работ. В случае измерения температурных полей дополнительным аргументом в пользу автоматизированного эксперимента служит требуемый объем измеряемой информации. При измерении показаний большого количества термопар объем приборного парка и количество регистрируемой информации настолько велико, что возможность возникновения ошибки при проведении эксперимента резко возрастает. Тем более что при проведении автоматизированного эксперимента имеется возможность задействовать весь математический аппарат статистики и цифровой фильтрации данных прямо в процессе получения экспериментальной информации, что значительно сокращает объем выходных экспериментальных данных при значительном увеличении степени их достоверности. В связи с этим встает задача разработки

программно-аппаратного комплекса для автоматизированного измерения температурных полей.

Сформулированы следующие задачи, вытекающие из проведенного обзора, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

1. Разработка программного обеспечения для определения теплового состояния деталей ДС, использующего для решения задач теплопроводности конечноэлементный метод контрольного объема;
2. Разработка способа решения ОЗТ путем сопоставления данных, полученных при решении прямой задачи теплопроводности, с экспериментальными данными;
3. Разработка програмно-аппаратного комплекса для получения экспериментальных данных, необходимых для решения ОЗТ;
4. Получение параметров теплообмена во внутреннем контуре экспериментального ДС.

Во второй главе изложены принципы решения задачи определения теплового состояния деталей двигателя Стирлинга, приведены описания и блок-схемы программных комплексов, а также результаты их тестирования.

Запишем уравнение теплопроводности в дивергентной форме

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} + \mathrm{div}(\vec{q}) = S_c + S_p T, \qquad (1)$$

где S_c и S_p - постоянная и линейная части объемного теплового источника.

Здесь $\vec{q}$ - вектор плотности теплового потока

$$\vec{q} = -[\lambda]\,\mathrm{grad}\,T, \qquad (2)$$

где

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} \\ \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} \end{bmatrix}. \qquad (3)$$

Уравнение (1) определено в плоской области сложной формы, показанной на рис 1. Начальные условия для уравнения (1) имеют вид:

$$T(0,r) = f_1(r), \qquad (4)$$

где r - радиус вектор точки, лежащей на граничной поверхности.

Граничные условия для уравнения (1) могут быть трех типов:

1. На участке границы Γ_1 - заданы граничные условия 1-го рода:

$$T(\tau,r)=f_2(\tau,r). \qquad (5)$$

2. На участке границы Γ_2 - заданы граничные условия 2-го рода:

$$(\vec{q},\vec{n}) = f_3(\tau,r) \qquad (6)$$

3. На участке границы Γ_3 - заданы граничные условия 3-го рода:

$$(\vec{q},\vec{n}) = \alpha(\tau,r)\,[T - T_f(\tau,r)] \qquad (7)$$

Для решения поставленной задачи применим конечноэлементный метод контрольного объема. В этом случае расчетная область разбивается треугольной или тетраэдральной сеткой конечных элементов в зависимости от размерности задачи. Около каждого узла расчетной области из частей конечных элементов формируется контрольный объем, ассоциируемый с данным узлом.

Для получения дискретного аналога уравнения теплопроводности (1) проинтегрируем его по типичному контрольному объему:

$$\int_{V_i} \rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} dV + \int_{V_i} \operatorname{div} \vec{q}\, dV = \int_{V_i} (S_c + S_p)\, dV , \qquad (8)$$

где V_i - контрольный объем i узла (рис 2).

Заметим, что

$$V_i = \sum_{l=1}^{M} V_{il} . \qquad (9)$$

Здесь V_{il} - вклад в контрольный объем от l элемента, в котором узел i является вершиной элемента, M - число элементов, окружающих выбранный узел.

Ко второму слагаемому в левой части уравнения (1) применим теорему Остроградского-Гаусса :

$$\int_{V_i} \operatorname{div} \vec{q}\, dV = \int_{S_i} (\vec{q},\vec{n})\, dS . \qquad (10)$$

Здесь S_i - площадь боковой поверхности, ограничивающей контрольный объем i-го узла, $\vec{n}$ - внешняя нормаль к этой поверхности.

Для S_i, аналогично V_i, можно записать

$$S_i = \sum_{l=1}^{M} S_{il} , \qquad (11)$$

где S_{il} - часть площади поверхности, ограничивающей i-й КО и принадлежащая l-му элементу.

Тогда получим:

$$\int_{V_{il}} \rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} dV + \int_{S_{il}} (\vec{q},\vec{n})\, dS - \int_{V_{il}} (S_c + S_p T)\, dV + \left\{ \begin{matrix} \text{вклады из других элементов} \\ \text{от i - го узла} \end{matrix} \right\} = 0 . \qquad (12)$$

После проведения вычислений всех интегралов, выражение (12) примет вид

$$\sum a_N T_N = b_i \,, \qquad (13)$$

где N - число связей i-го узла.

Объединим все вектор-строки для каждого узла элемента в одну матрицу и все локальные вклады в правые части в один вектор-столбец.

На основе данного алгоритма были разработаны программные комплексы TEM2D для двумерного и TEM3D для трехмерного случая и проведено их подробное тестирование. Для этого были решены задачи, имеющие аналитическое решение, а так же был проведен расчет теплового состояния клапана двигателя ВАЗ и поршня двигателя ЧТЗ. Далее был проведен расчет теплового состояния тех же деталей при помощи программного обеспечения, разработанного на кафедре Э-2 МГТУ им. Н. Э. Баумана, и проанализированы полученные результаты. Результаты анализа подтвердили работоспособность созданного программного обеспечения.

При помощи этого программного обеспечения был проведен расчет теплового состояния головки экспериментального ДС. Результаты расчета приведены на рис 3.

В третьей главе изложена методика определения параметров теплообмена во внутреннем контуре двигателя Стирлинга, которая базируется на решении обратной задачи теплопроводности. В рамках этой задачи был предложен способ решения задачи оптимизации, основанный на дискретизации области оптимизации сеткой изопараметрических восьмиузловых конечных элементов. Прямая задача теплопроводности решалась для каждого узла конечноэлементной сетки. Далее, используя функции формы конечного элемента, определялись значения целевой функции по всей площади расчетной области. Далее анализировались полученные результаты, сужалась область поиска и процесс повторялся.

При решении данной задачи целесообразно идентификацию модели теплопроводности выполнять, минимизируя сумму квадратов ошибок между вычисленными и измеренными значениями температур в местах установки датчиков. Независимо от процедуры минимизации и применяемого при этом метода, минимизируемый функционал сохраняет одинаковую форму, вытекающую из среднеквадратичного приближения:

$$\Phi(T) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\hat{T}_i(x,y,z) - \tilde{T}_i(x,y,z))^2} \,, \qquad (16)$$

где

$\hat{T}_i(x,y,z)$ - измеренные значения температур в выбранных то (вектор наблюдений);

$\tilde{T}_i(x,y,z)$ - моделируемые в конечноэлементной модели значения температуры (прогноз).

На базе приведенной методики был разработан программный комплекс и проведено его тестирование как на задачах, имеющих аналитическое решение, так и на реальной задаче. В этом случае на основании температур, полученных при решении прямой задачи теплопроводности были восстановлены коэффициенты теплоотдачи в горячей полости и в зазоре между поршнем-вытеснителем и гильзой. Погрешность восстановления не превышает 0,5%, что подтверждает работоспособность методики и программного обеспечения.

Далее была проведена оценка влияния места расположения датчиков на точность решения обратной задачи. Было показано, что при удалении датчика температуры от исследуемой области на расстояние свыше 100 мм, погрешность его показаний практически не влияет на точность определения параметров граничных условий в исследуемой области.

После этого была проведена оценка факторов, снижающих точность восстановления параметров теплообмена во внутреннем контуре ДС. Это погрешность задания свойств материала и погрешность измерения температур газа в полости и температуры поверхности детали. Для оценки степени влияния этих ошибок на точность восстановления коэффициентов теплоотдачи была проведена серия численных экспериментов, при которых после ввода фиксированных ошибок в исходные данные, оценивалась точность полученного результата. После проведения оценки влияния погрешности задания теплофизических свойств материала, было показано, что при 60% погрешности задания теплопроводности материала головки погрешность полученного коэффициента теплоотдачи не превышает 5%.

Для определения погрешности, вносимой ошибкой измерения температуры газа в горячей полости, было показано, что при 5% погрешности температуры газа, погрешности восстановления коэффициента теплоотдачи не превышает 8%.

Для оценки влияния погрешности измерения температурных полей на поверхности детали была проведена серия численных экспериментов, при которых варьировалась погрешность задания узловых температур и оценивалась ошибка восстановления коэффициента теплоотдачи. Для оценки влияния систематической составляющей погрешности измерения температуры, ошибка вносилась в показания всех датчиков температуры. Анализ полученных данных показывает, что при разбросе погрешности измерений от -2,5 до 2,5%, погрешность восстановления коэффициента теплоотдачи изменяется в пределах от -10 до 12%. Для оценки случайной составляющей погрешности варьировались ошибки задания температуры от -2,5 до 2,5% в каждой из контрольных точек при фиксированном значении температуры в остальных местах расположения датчиков. Из анализа полученных данных видно, что при ошибке задания температуры в одной контрольной точке, погрешность восстановления параметров теплообмена

составляет примерно 1% на каждый процент погрешности определения температуры, что лишний раз подтверждает точность и устойчивость разработанной методики.

Для моделирования условий реального эксперимента была проведена дополнительная серия расчетов, при которой погрешность получения температуры задавалась в каждом узле в случайном порядке. В этом случае при разбросе температур в узлах в пределах от -2,5 до 2,5% погрешность восстановления коэффициента теплоотдачи не превысила 7%.

Все это дает возможность утверждать, что погрешность предложенной методики определения параметров теплообмена во внутреннем контуре ДС составляет 15-20%. Данная точность является очень высоким показателем для решения задач такого класса.

В четвертой главе приведены общая схема и принцип действия экспериментальной установки, разработанной в МГТУ им. Баумана. Основой установки является экспериментальный двигатель, созданный на базе холодильной газовой машины ЗИФ-700. Это одноцилиндровый двигатель вытеснительного типа (β модификация по классификации Kirkley). Для уменьшения нагрузки на подшипники, буферная полость расположена в картере двигателя. Предусмотрена система внутренней подпитки. Коленчатый вал выполнен со сдвигом фаз между поршнями 58 градусов. В качестве рабочего тела используется гелий высокой очистки. Перед заправкой ДС производится деаэрация методом вакуумирования. Заправка производится через картер, служащий одновременно буферной полостью. Гелий через клапан внутренней подпитки и через зазоры поршневых колец попадает в рабочую полость. При работе ДС также будут иметь место некоторые утечки по штоку поршня-вытеснителя и по поршневым кольцам, но это будет происходить до тех пор, пока средние давления в холодной полости и в картере не уравняются. При повышении давления в картере сработает обратный клапан, и рабочее тело попадет обратно в холодную полость. Для предотвращения утечек в других местах, во всех разъемных соединения предусмотрены уплотнительные прокладки из отожженной меди. Благодаря разработанной на кафедре Э-2 технологии уплотнения горячего газового стыка, удалось добиться надежно гарантированной герметичности двигателя. Для уплотнения носка коленчатого вала применено самоподжимное уплотнение.

Для получения более полной информации о тепловом состоянии деталей двигателя была разработана автоматизированная система измерения температурных полей. Система предназначена для автоматизации сбора экспериментальных данных технологических процессов в случае, когда требуется проводить измерения температур с помощью термопарных датчиков или термометров сопротивления. Разработанная автоматизированная измерительная система (АИС) обеспечивает обработку полученных данных и вывод протокола на внешнее устройство (принтер,

диск, дисплей) в интерактивном режиме. Принципиальная схема АИС приведена на рис. 4.

МикроЭВМ в составе АИС обеспечивает управление сбором, обработкой и хранением получаемой информации по заданной управляющей программе, а также контролем работоспособности модулей КАМАК. Устройство связи с объектом (УСО) выполнено в стандарте КАМАК и необходимо для преобразования сигналов датчиков в цифровой код, совместимый с кодом микроЭВМ, и для передачи этого кода управляющему компьютеру. Использование УСО в стандарте КАМАК позволяет применять стандартное оборудование для связи с ЭВМ. Погрешность измерения температур при работе с АИС не превышает 0,4 %. Для подтверждения этого была проведена метрологическая аттестация во ВНИИФТРИ и получен метрологический паспорт на данную АИС.

При помощи разработанной методики была произведена работа по восстановлению среднеинтегральных коэффициентов теплоотдачи в горячей полости и в зазоре между поршнем-вытеснителем и гильзой экспериментального двигателя Стирлинга. Первоначально были определены параметры теплоотдачи с использованием двумерной модели. Решение ОЗТ проводилось в три этапа с постепенным уменьшением зоны поиска и частоты разбивки области поиска на конечные элементы. Далее было проведено определение параметров теплообмена с использованием трехмерной модели. Вид зависимости полученных коэффициентов теплоотдачи от частоты вращения вала двигателя приведен на рис. 5. При анализе полученных данных нетрудно заметить, что коэффициенты теплоотдачи в зазоре между поршнем-вытеснителем и стенкой гильзы, полученные при расчетах, проведенных с использованием двух описанных выше моделей, близки.

Данные по коэффициентам теплоотдачи в горячей полости, полученные при различной постановке задачи, значительно различаются. Это объясняется тем, что двумерная модель не учитывает всех особенностей конструкции данной детали и дает заниженные значения температур в наиболее термонагруженной области - в зоне крепления нагревателя. Это ясно видно на рис 6, где приведены изменения значений экспериментально полученных температур и температур, полученных при дву- и трехмерных расчетах по образующей гильзы экспериментального двигателя. Легко заметить, что температуры, полученные при решении ОЗТ в двумерной постановке, значительно отличаются от экспериментальных. В зоне, определяемой влиянием параметров теплообмена в щелевом зазоре между вытеснителем и стенкой головки, отклонение расчетных температур от экспериментальных незначительно. Это дает нам право сделать вывод о том, что значения коэффициента теплоотдачи в горячей полости, полученное при решении ОЗТ в двумерной постановке, явно завышены. В то же время значения коэффициентов теплоотдачи в зазоре между гильзой цилиндра и

поршнем-вытеснителем, полученные при решении этой же задачи, близки к реальным.

Отклонения температур, полученных при решении трехмерной задачи, от экспериментальных незначительны во всех точках, что дает возможность говорить о точности полученных результатов. Из проведенного анализа полученных данных можно сделать вывод, что решение ОЗТ в двумерной постановке допустимо при условии, что исследуемая деталь достаточно точно описывается двумерной моделью и не предъявляется особых требований к точности получаемых результатов. Однако, для получения точного решения рекомендуется использовать трехмерные модели. Решение данной задачи требует значительных затрат машинного времени, но полученные результаты достаточно точно отражают реальные процессы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

1. Проведен анализ методов определения параметров теплообмена во внутреннем контуре двигателя Стирлинга.
2. Проведен анализ существующих численных методов определения теплового состояния теплонапряженных деталей.
3. Разработаны программные комплексы, основанный на конечно-элементном методе контрольных объемов, предназначенный для определения теплового состояния деталей двигателя Стирлинга в дву- и трехмерной постановке и проведено его тестирование.
4. Проведен расчет теплового состояния головки экспериментального двигателя Стирлинга в дву- и трехмерной постановке.
5. Разработан программно-аппаратный комплекс для автоматизированного измерения полей температур в деталях тепловых двигателей. С целью подтверждения заявленной точности измерений проведена метрологическая аттестация данного комплекса и получен метрологический паспорт.
6. Разработан методика и программный комплекс решения ОЗТ для определения параметров теплообмена во внутреннем контуре двигателя Стирлинга и проведено его тестирование.
7. При помощи разработанной методики на основе полученных экспериментальных данных впервые были получены значения коэффициентов теплоотдачи в горячей полости и в зазоре между поршнем-вытеснителем и головкой экспериментального двигателя Стирлинга для нескольких рабочих режимов.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Светлов В.А., Ефимов С.И., Иващенко Н.А., Сячинов А.В. Методика определения параметров теплообмена во внутреннем контуре двигателя Стирлинга // Материалы Международной научно-технической конференции "Двигатель-97" МГТУ, М.: 1997. С. 128-129
2. Светлов В.А., Иващенко Н.А., Ефимов С.И. Определение параметров теплообмена во внутреннем контуре двигателя Стирлинга // Материалы Международной научно-технической конференции "Двигатель-97" МГТУ, М.: 1997. С. 130-131
3. Светлов В.А., Сячинов А.В. Автоматизированная система измерений температурных полей // Материалы Международной научно-технической конференции "Двигатель-97" МГТУ, М.: 1997. С. 131-132
4. Пластинин П.А., Дегтярева Т.С., Светлов В.А., Сячинов А.В. Автоматизированная система измерений, накопления и обработки данных при испытаниях поршневых компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. Вып.3-4 (16-17). С.-Петербург.: 1997. – С.12-14
5. Грехов Л.В., Светлов В.А., Сячинов А.В. Автоматизированный комплекс для испытания топливной аппаратуры // Материалы Международной научно-технической конференции "Двигатель-97" МГТУ, М.: 1997. - С. 101
6. Аникин С.А., Иващенко Н.А., Светлов В.А. Исследование напряженно-деформированного состояния блоков цилиндров двигателей АМО ЗИЛ // Материалы Международной научно-технической конференции "Двигатель-97" МГТУ, М.: 1997. С. 74-75
7. Иващенко Н.А., Светлов В.А., Никишин В.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния системы крышка цилиндра-упорное кольцо стыка-цилиндр-блок цилиндров // Материалы Международной научно-технической конференции "Двигатель-97" МГТУ, М.: 1997. С. 76
8. Захаров Л.А., Иващенко Н.А., Рогов В.С., Светлов В.А. Анализ теплового и напряженно-деформированного состояния поршня карбюраторного двигателя // Материалы Международной научно-технической конференции "Двигатель-97" МГТУ, М.: 1997. С. 77

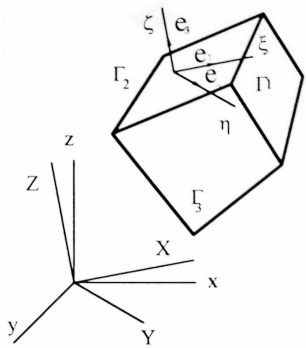


Рис. 1. Представление расчетной области

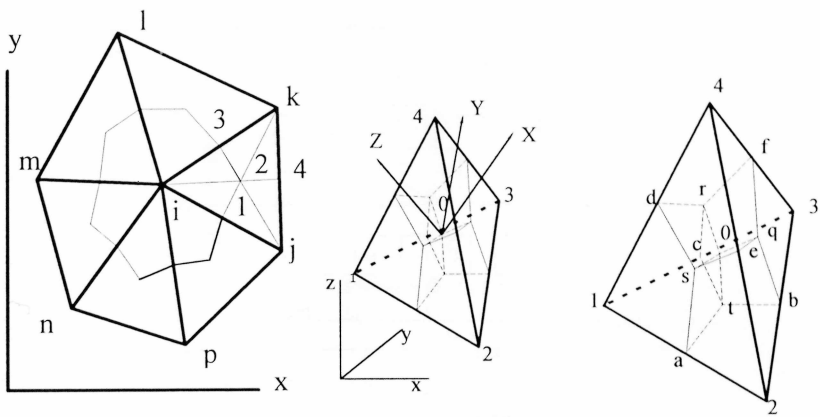


Рис. 2. Дискретизация расчетной области

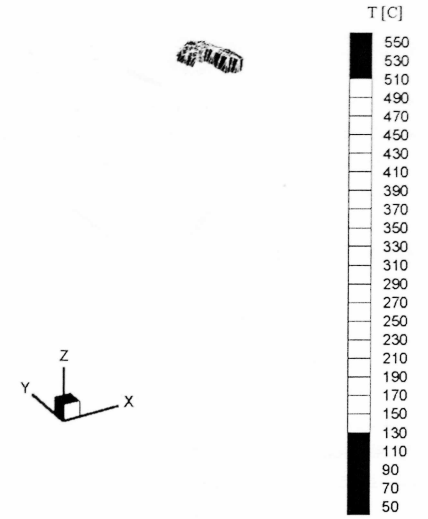


Рис. 3. Температурное поле детали

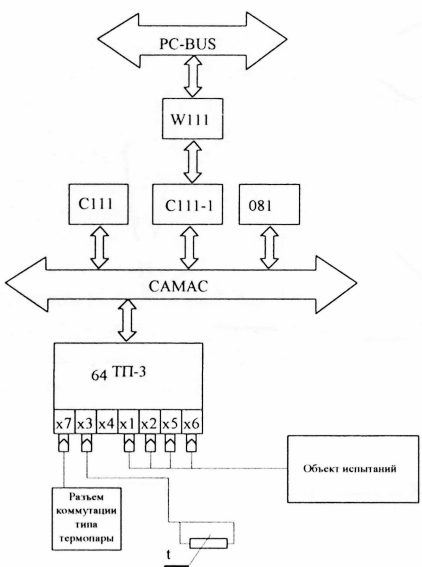
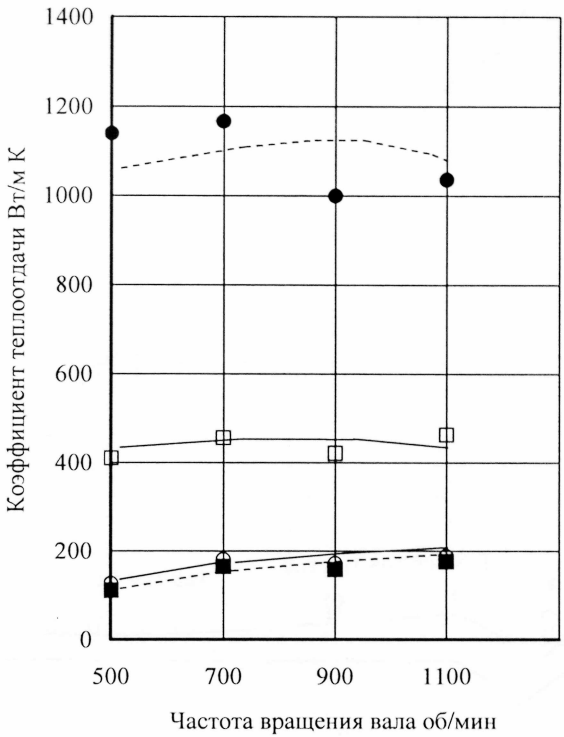


Рис. 4. Структурная схема АИС



□ Коэффициент теплоотдачи в горячей полости трехмерная модель

● Коэффициент теплоотдачи в горячей полости осесимметричная модель

■ Коэффициент теплоотдачи в зазоре трехмерная модель

○ Коэффициент теплоотдачи в зазоре осесимметричная модель

Рис 5. Коэффициенты теплоотдачи во внутреннем контуре Двигателя Стирлинга.

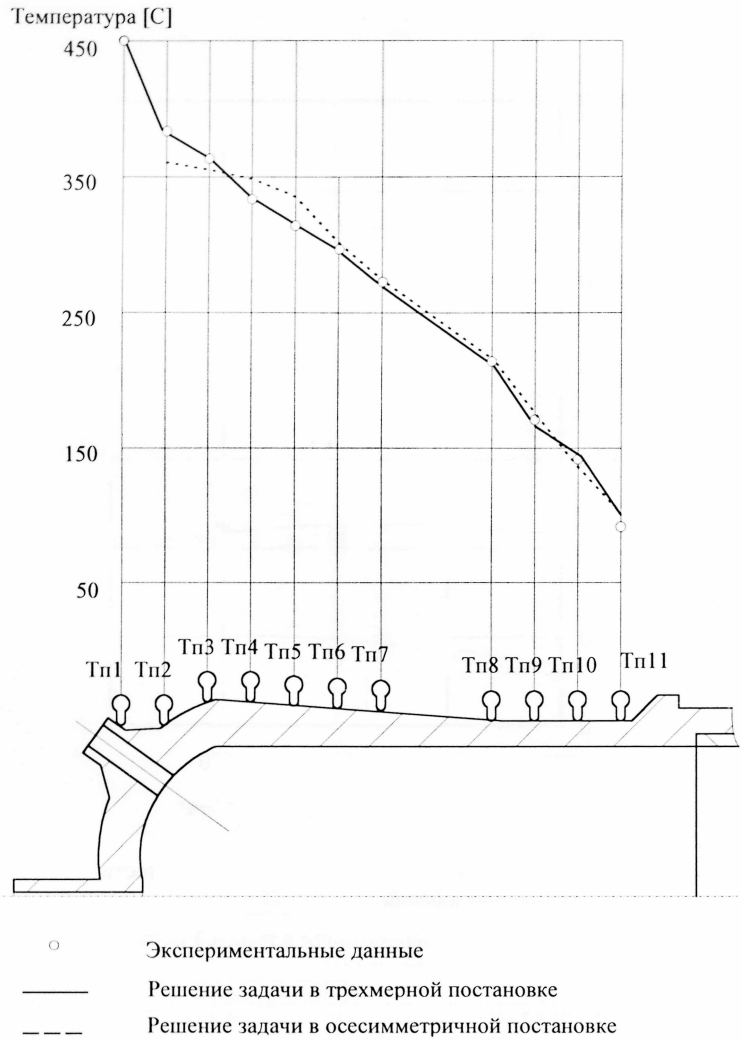


Рис 6. Результаты обработки экспериментальных данных $n=500^{-1}$

Подписано к печати 30.05.99 Заказ №152. Тираж 100 экз.