

О.М. Алифанов, С.А. Будник, В.В. Михайлов, А.В. Ненарокомов

Московский авиационный институт (государственный технический университет), Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА МЕТОДАМИ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

АННОТАЦИЯ

Области практического использования методов обратных задач математической физики весьма разнообразны, в частности, они находят применение в теплофизике, геофизике, астрономии, электродинамике, гидротехнике и соответствующие примеры можно найти в различных монографиях и статьях. Данная работа посвящена некоторым приложениям только одного класса обратных задач - задач тепловой диагностики. Необходимость их решения появляется при проведении различных тепловых исследований, создании и эксплуатации теплонагруженных технических объектов, отработке технологических процессов.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для современной техники характерны конструкции, работающие в условиях интенсивных, часто экстремальных тепловых воздействий. Общая тенденция развития техники связана с увеличением числа ответственных теплонагруженных технических объектов, с ужесточением условий их теплового нагружения при одновременном повышении надежности и ресурса, снижении материалоемкости. Характерными особенностями современных теплонагруженных конструкций являются нестационарность, нелинейность, многомерность и сопряженный характер процессов теплообмена. Эти особенности ограничивают возможность использования многих традиционных расчетно-теоретических и экспериментальных методов.

Современные подходы к проблеме обеспечения заданного теплового состояния технических систем предполагают широкое применение методов математического и физического моделирования. Однако проведение математического моделирования невозможно без достоверной информации о внешнем тепловом воздействии на анализируемые объекты. Таким образом создание новых и совершенствование существующих технических объектов требует разработки новых более эффективных методов и средств диагностики тепловых режимов конструкций, агрегатов и систем. Такие методы и средства необходимы как на различных этапах создания теплонагруженных конструкций (в частности, при проведении теплофизических исследований на этапе проектирования, при проведении экспериментальной отработки конструкций, а также при проведении испытаний объектов, включая стендовые и летные), так и при их эксплуатации (в частности, в системах автоматизированного управления тепловыми режимами и в системах предупреждения

внештатных ситуаций).

В большинстве практических случаев прямое измерение теплового состояния и внешнего теплового воздействия для сложных конструкций является невозможным. Единственным путем, позволяющим преодолеть эти сложности, является не прямое измерение. Математически подобный подход обычно формулируется как решение обратной задачи: по прямым измерениям некоторых характеристик состояния системы (температуры в дискретных точках, концентрации компонентов и т.д.) требуется определить тепловое состояние в целом и/или внешнее тепловое воздействие. Нарушение причинно-следственных связей в постановке таких задач приводит к их некорректности в математическом смысле (т.е. отсутствию существования и/или единственности и/или устойчивости решения). Поэтому для решения подобных задач разрабатываются специальные методы, обычно называемые регуляризирующими.

Подходы к тепловой диагностике, базирующиеся на методах решения некорректных задач широко анализировались в России (СССР), а также в других странах и показали свою эффективность при разработке и исследовании современных конструкций в авиационной, автомобильной, космической отраслях техники, металлургии, энергетике и т.д. Разрабатываемые технологии для диагностики тепловых режимов объектов космической техники является комбинацией достаточно точных измерений первичных тепловых величин в условиях испытаний, максимально приближенных к натурным, и предельно корректной математической обработки экспериментальных данных на основе теории обратных задач. Окончательной целью этих исследований является разработка комплекса технических и методических средств тепловой диагностики для последующего широкого внедрения ее в практику теплового регулирования и предотвращения внештатных ситуаций. Успешное решение этой проблемы возможно только при учете ее физических, математических и технических аспектов. При этом необходимо решить следующие задачи:

- разработать нелинейные математические модели теплообмена (одно-, двух- и трехмерные) для теплонагруженных конструкций (однослойных и многослойных, регулярной и нерегулярной формы);
- разработать вычислительные алгоритмы и программное обеспечение для решения задач определения характеристик теплового состояния и нагружения конструкций в условиях нестационарного на-

грева на основе решения обратных задач теплообмена;

- разработать методы, алгоритмы и программы тепловой диагностики конструкций в реальном времени (оперативная диагностика, экспресс-диагностика);
- разработать средства измерений (включая, датчики температуры, тепловых потоков и др);
- разработать автоматизированную систему (АС) диагностики тепловых режимов, в том числе и портативную (мобильную) АС.;
- разработать методики подготовки и проведения тепловых испытаний для экспериментальной отработки создаваемых технических и методических средств диагностики тепловых режимов.

Разрабатываемая методология исследований позволит:

- на единой теоретической основе решать комплекс проблем, возникающих при проектировании и отработке теплонагруженных систем, конструкций и материалов;
- максимально учесть реально существующие эффекты нестационарности, нелинейности и многомерности теплообменных процессов, протекающих внутри и на поверхности конструкций, что существенно увеличит точность и достоверность результатов исследований;
- увеличить информативность экспериментов и испытаний, обеспечить возможность их проведения в условиях, максимально приближенных к натурным;
- сократить объем необходимых экспериментальных исследований и испытаний, и как следствие, снизить затраты средств и времени на разработку образцов техники.

2. ТЕХНИЧЕСКИЙ ПОДХОД И МЕТОДОЛОГИЯ

Как показали проведенные исследования, одним из наиболее эффективных и универсальных подходов к построению устойчивых алгоритмов решения некорректно поставленных обратных задач является итерационная регуляризация, под которой понимается построение параметрических регуляризирующих операторов с параметром регуляризации в виде номера итерации. С помощью этого метода могут быть получены удобные для практического использования алгоритмы решения различных обратных задач в различных постановках (линейных и нелинейных, одномерных и многомерных, в областях с фиксированными и подвижными границами, с минимальным необходимым составом исходных данных и переопределенных). Кроме того, оказалось возможным строго обосновать данный метод применительно к широкому классу задач, а также модернизировать итерационные алгоритмы для учета качественной и количественной априорной информации об искомом решении. Общая постановка обратной задачи может быть представлена в виде операторного уравнения первого рода

$$Au = f, u \in U, f \in F, \quad (1)$$

где принято, что U, F – гильбертовы пространства; A

– линейный непрерывный оператор, определенный на U : u и f – искомый и наблюдаемый элементы соответственно (u и f могут быть функциями и вектор функциями). Будем в дальнейшем предполагать, что уравнение (1) разрешимо единственным образом относительно f из области значений оператора A^* . При точно заданных операторе A и правой части f уравнение (1) имеет решение u_T .

Корректная разрешимость задачи (1) предполагает непрерывность оператора A^{-1} , борнатного к A . Однако в случае обратной задачи A^{-1} не является непрерывным оператором. Введем в рассмотрение приближенные исходные данные:

- 1) линейный непрерывный оператор A_h , аппроксимирующий оператор A с условием $\|A_h - A\| \leq \chi(h), \chi(h) \rightarrow 0, h \rightarrow 0$;
- 2) правую часть $f_\delta = f + \Delta f$, где $\Delta f \in F$ – ошибка с нормой $\|\Delta f\|_F \leq \delta$.

Погрешность исходных данных характеризуется вектором $\sigma = \{\delta, h\}$. Предположим, что имеется некоторый итерационный алгоритм, дающий последовательность приближений

$$u^{k+1} = F_A(u^k, \Delta f, h), k = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

начиная с заданной начальной оценки u^0 .

Установлено, что алгоритм (2) порождает регуляризирующее семейство операторов с параметром k , если выполняются условия:

- 1) для любого $u^0 \in U$ последовательность (2), построенная на точных данных ($\Delta f = 0, h = 0$), сходится к точному решению u_T ;
- 2) отображение $F_A(u, \Delta f, h)$ непрерывно во всех точках $\{u, 0, 0\}$, кроме, может быть, точки $\{u_T, 0, 0\}$.

То есть, в этом случае возможен выбор устойчивого приближения из соответствующей итерационной последовательности. Другими словами, найдутся такие $\delta_0 > 0, h_0 > 0$, что если, $\delta < \delta_0, h < h_0$, то существует номер итерации $k = \bar{k}(\sigma)$, для которого

$$\|u^{\bar{k}(\sigma)} - u_T\|_U \xrightarrow{\sigma \rightarrow 0} 0.$$

Указанным требованиям удовлетворяют градиентные методы оптимизации первого порядка, в частности, метод сопряженных градиентов

$$u^{k+1} = u^k - \beta_k S^k, \beta_k = \frac{(J_u^k, S^k)_U}{2 \|A_h S^k\|_F^2},$$

$$S^k = J_u^k + \gamma_k S^{k+1}, \gamma_0 = 0, \gamma_k = \frac{\|J_u^k\|_U^2}{\|J_u^{k-1}\|_U^2} \quad (3)$$

где $J_u^k = 2A_h^*(A_h u^k - f_\delta)$ – градиент функционала

$$J^k = J[u^k] = \|A_h u^k - f_\delta\|_F^2.$$

Таким образом, на основе итерационного процесса (3) возможно построение регуляризирующих

алгоритмов. Для этого нужно указать приемлемый способ согласования номера последней итерации \bar{k} с погрешностью входных данных σ . Такой способ может быть построен на основе критерия невязки. Было показано, что алгоритм (3) при выборе числа итераций из условия

$$\bar{k}(\sigma) = \min \left\{ k : \frac{(J^k + J^{k+1}) \sum_{i=0}^k \frac{1}{\|J'u^i\|_U^2}}{2 \sum_{i=0}^k \frac{\sqrt{J^i}}{\|J'u^i\|_U}} < \delta + \chi(h) \|u_T\|_U \right\} \quad (4)$$

являются регуляризирующими алгоритмами, т.е. дает устойчивые приближенные решения, точность которых будет неуклонно возрастать при уменьшении погрешности исходных данных и, теоретически, при $\sigma \rightarrow 0$ эти алгоритмы дадут точное решение. Таким образом, если не рассматривать ошибки аппроксимации ($\chi(h) \rightarrow 0$), то останов итерационного процесса по условию (4) с точностью до одной итерации равносильно останову по условию

$$k = \bar{k} : \|Au^k - f_\delta\|_F \cong \delta \quad (5)$$

без перехода через уровень δ .

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

Для определения характеристик многомерных, нестационарных и нелинейных процессов теплообмена, имеющих место при диагностике тепловых режимов конструкций (например, конструкций космических спускаемых аппаратов, где проблема надежной тепловой защиты является одной из критических), особое значение имеет экспериментально-расчетный подход с использованием автоматизированных комплексов управления, сбора и обработки информации. Задачам диагностики тепловых режимов соответствуют ОЗТ, позволяющие восстанавливать поля температур в сложных конструкциях, определять граничные условия, тепловые контактные сопротивления между элементами конструкций и коэффициенты радиационного теплообмена поверхностей. При этом для определения характеристик нестационарного теплового нагружения используются специальные датчики.

На рисунках 1 - 4 представлены некоторые возможные случаи использования таких датчиков при исследовании и обработке тепловых режимов различных элементов теплонагруженных конструкций объектов аэрокосмической техники. Например, при проведении летных испытаний систем теплозащиты спускаемых аппаратов (рис. 1).

Применение комплекса одномерных и двумерных датчиков тепловых потоков позволяет исследовать распределение тепловых нагрузок по поверхности аппарата (рис. 2).

На рис. 3 и 4 представлены фотографии экспериментальных моделей аэрокосмических аппаратов для исследования характеристик теплового нагружения в условиях газодинамического нагрева, оснащенных, одномерными и двумерными датчиками теплового потока из ниобия, разработанными в МАИ при участии В.К.Занцева.

На рис.5 и 6 представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученные при исследовании теплового нагружения спускаемого аппарата. Цилиндрические датчики диаметром 20 мм, выполненные из материала с заданными теплофизическими свойствами, устанавливались на внешней поверхности (число термопар и координаты их установки показаны на рис. 1).

Результаты показаний внутренних термопар и расчетные значения температур, соответствующие точкам установки термопар, представлены на рис. 5. Восстановленное значение теплового потока, как результат обработки экспериментальных данных, представлен на рис. 6. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность разрабатываемой методологии.

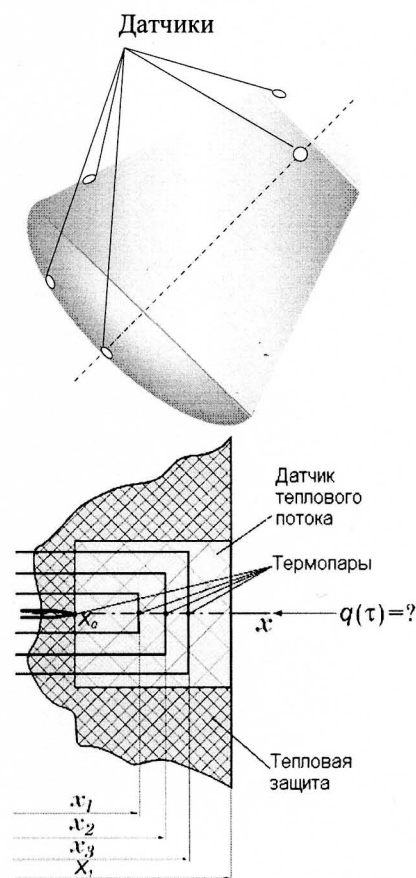


Рис. 1. Измерение характеристик теплового режима теплозащиты при проведении летных испытаний и при эксплуатации СА

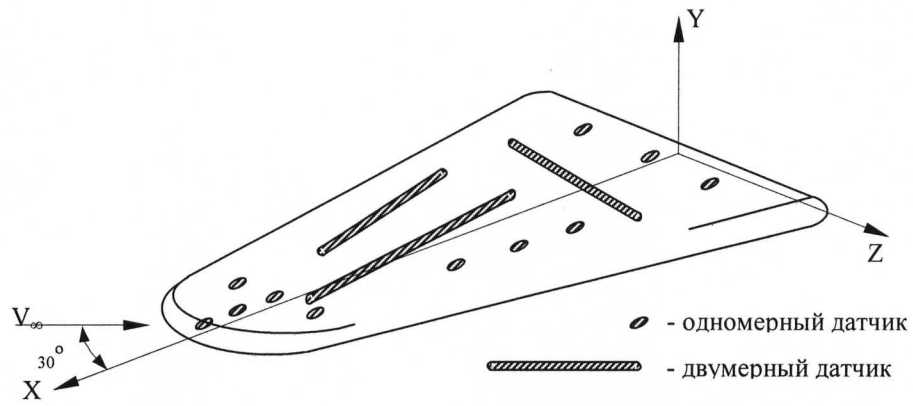


Рис. 2. Размещение датчиков на наветренной поверхности модели

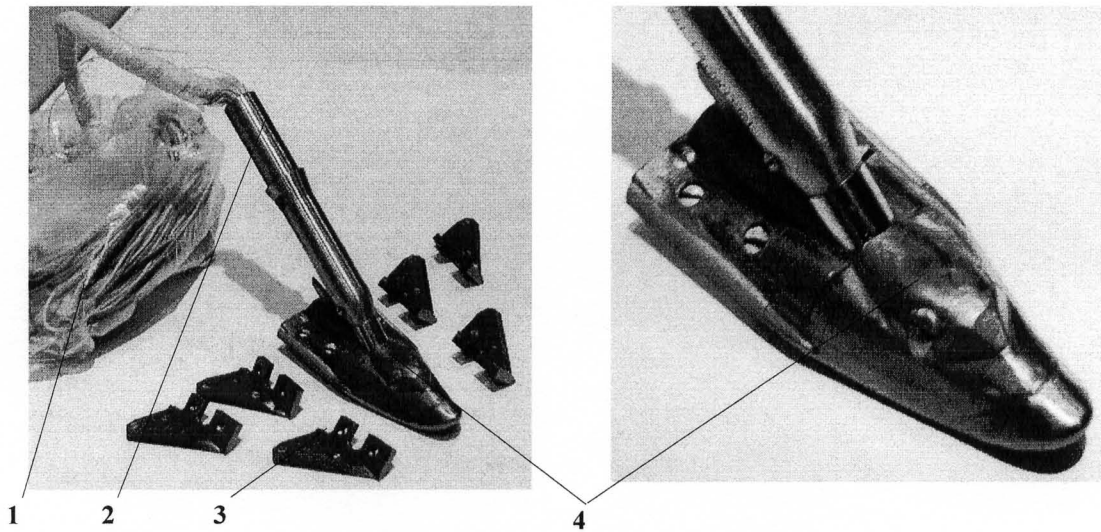
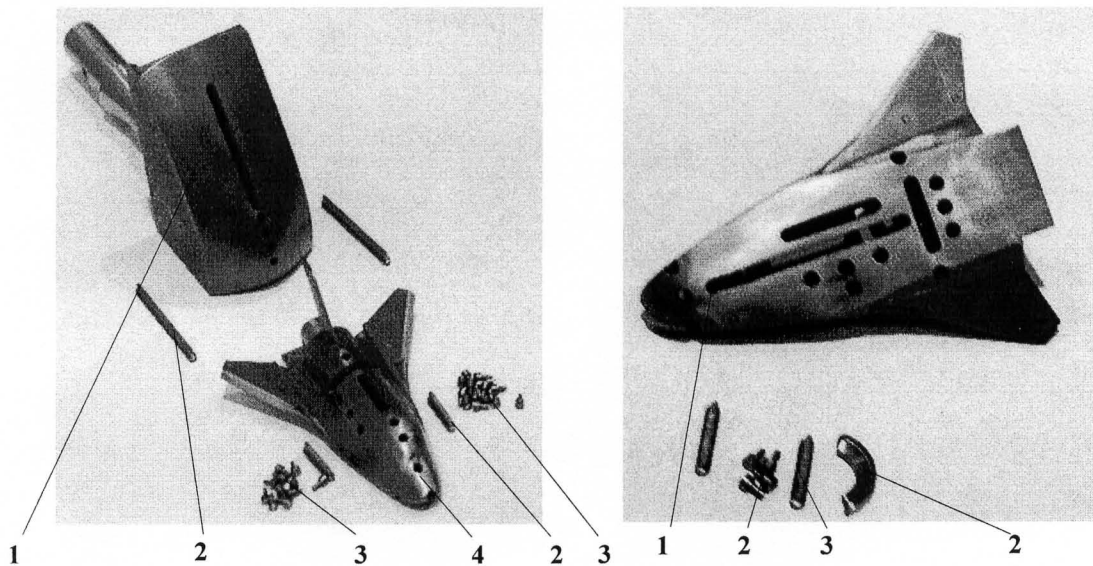


Рис. 3. Модель экспериментального аэрокосмического аппарата для стендовых испытаний в условиях газодинамического нагрева: 1 – кабель, 2 – державка, 3 – набор крыльев с различной стреловидностью, 4 - корпус



1 – Модель носовой части аппарата, 2 – двумерный датчик, 3 – одномерные датчики, 4 - модель

1 – Модель с отверстиями для установки датчиков, 2 – двумерный датчик, 3 – одномерные датчики

Рис. 4. Модели экспериментального аэрокосмического аппарата для стендовых испытаний в условиях газодинамического нагрева с набором одномерных и двумерных датчиков теплового потока

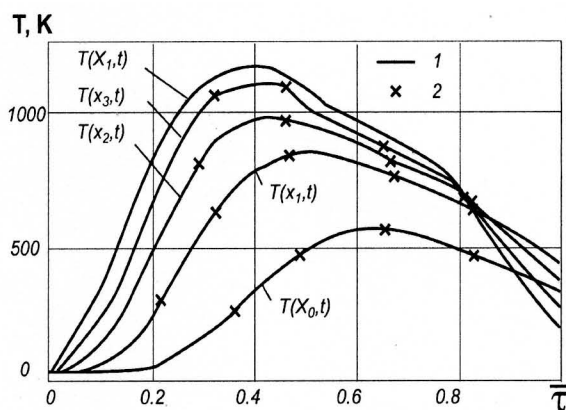


Рис. 5. Температуры в точках установки термомпар и на границах: 1 – расчетные значения, 2 – экспериментально измеренные значения

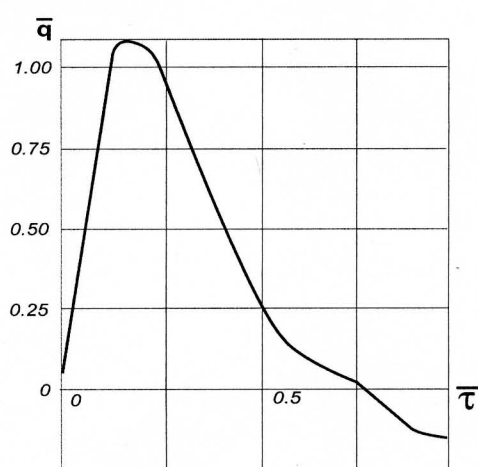


Рис. 6. Восстановленное значение теплового потока на внешней поверхности

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕПЛОЙ ДИАГНОСТИКИ

Успешная реализация методологии ОЗТ возможна только при рациональном сочетании физического моделирования процессов теплообмена, достаточно точных измерений первичных тепловых величин и корректной математической обработки экспериментальных данных на основе решения ОЗТ. Одним из эффективных путей решения данной проблемы является создание проблемно-ориентированных научно-исследовательских комплексов, объединяющих специально разработанное экспериментальное оборудование, автоматизированную систему научных исследований (АСНИ) и реализованное в ней методическое обеспечение эксперимента на основе решения ОЗТ.

Представленный в данном разделе экспериментально-вычислительный комплекс является результатом дальнейшего развития исследований, проводимых в МАИ и связанных с разработкой АСНИ тепловых процессов на основе методологии ОЗТ. Комплекс предназначен для проведения лабораторных и стендовых тепловых испытаний с целью

исследования процессов тепло- и массообмена в элементах теплонагруженных конструкций. Испытания могут проводиться в условиях нестационарного контактного и/или радиационного нагрева с темпом до 100 K/сек в диапазоне температур от 300 K до 1900 K на воздухе или в среде инертных газов при давлении до 1,6 бар, или в вакууме до $0,25 \times 10^{-7}$ бар. Кроме того, комплекс позволяет проводить исследования по следующим направлениям: отборочные испытания перспективных теплотехнических материалов и теплоизоляционных покрытий (в том числе гибких и многослойных); создание и отработка новых расчетно-экспериментальных методик диагностики и идентификации процессов нестационарного теплообмена в материалах и конструкциях; создание и отработка высокоточных термодатчиков и средств измерения.

В состав технических средств комплекса входят: высокотемпературный тепловакуумный стенд ТВС-1М; специальные экспериментальные модули (ЭМ) для реализации заданных моделей теплообмена в исследуемых образцах; автоматизированная система (АС) управления нагревом, измерения, сбора и обработки экспериментальной информации на базе рабочей станции и модульной системы РХИ фирмы National Instruments с автоматизированными рабочими местами (АРМ) инженера-испытателя и исследователя; оборудование локальной вычислительной сети, которое обеспечивает связь комплекса с удаленными АРМ исследователей, учебными рабочими местами и Интернет; специальное технологическое оборудование для подготовки экспериментальных образцов, изготовления термодатчиков и их установки в полимеризующиеся и высокопористые материалы. Методическое обеспечение экспериментальных исследований включает: методики подготовки и проведения тепловых испытаний; прикладное программное обеспечение (ПО) для подготовки экспериментов на основе методов теплового моделирования и планирования экспериментов; комплекс прикладных программ для обработки и интерпретации экспериментальных данных на основе решения ОЗТ; специальное программное обеспечение измерительно-управляющего узла АС на основе программных средств LabVIEW Схема и общий вид комплекса представлена на рис.7 и 8.

Представленный экспериментально-вычислительный комплекс реализует в полном объеме современную методологию диагностики процессов нестационарного теплообмена в материалах и конструкциях, основанную на методах ОЗТ. Создание подобных комплексов является перспективным направлением внедрения методологии ОЗТ в научную и инженерную практику тепловых исследований и испытаний перспективных систем для авиационно-космической техники, тепловой и ядерной энергетики, черной и цветной металлургии, химической промышленности, двигателестроения и др.

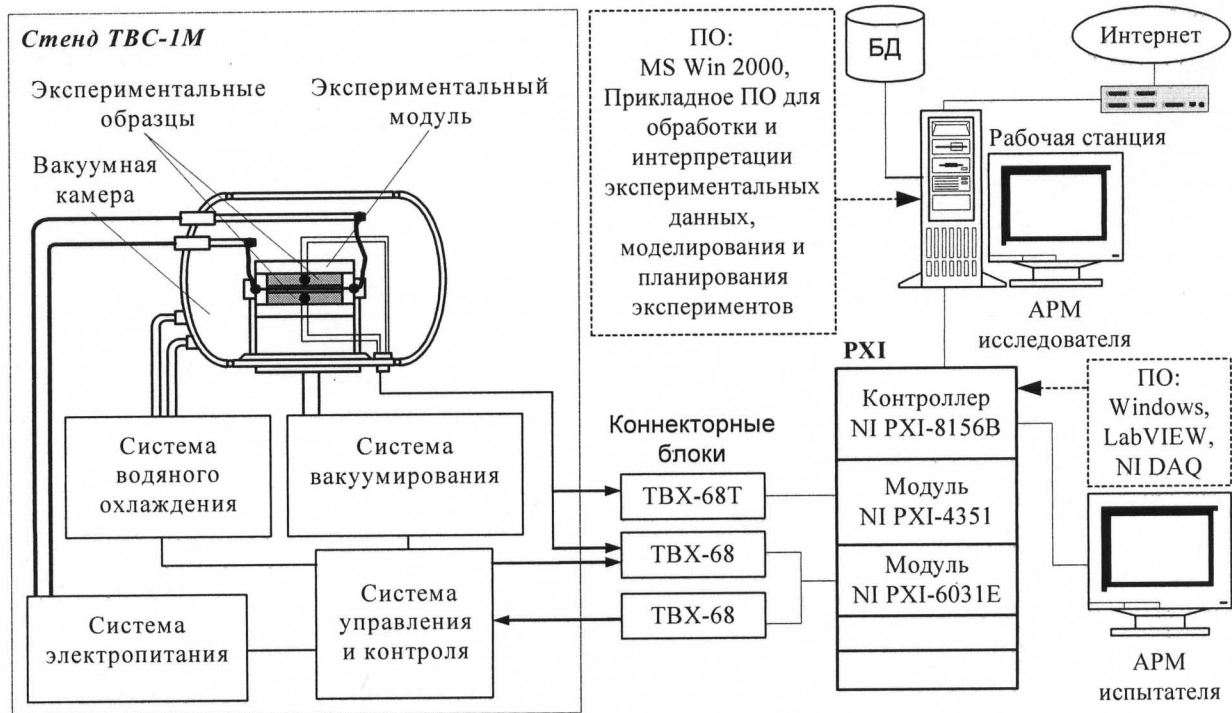


Рис. 7. Схема экспериментально-вычислительного комплекса

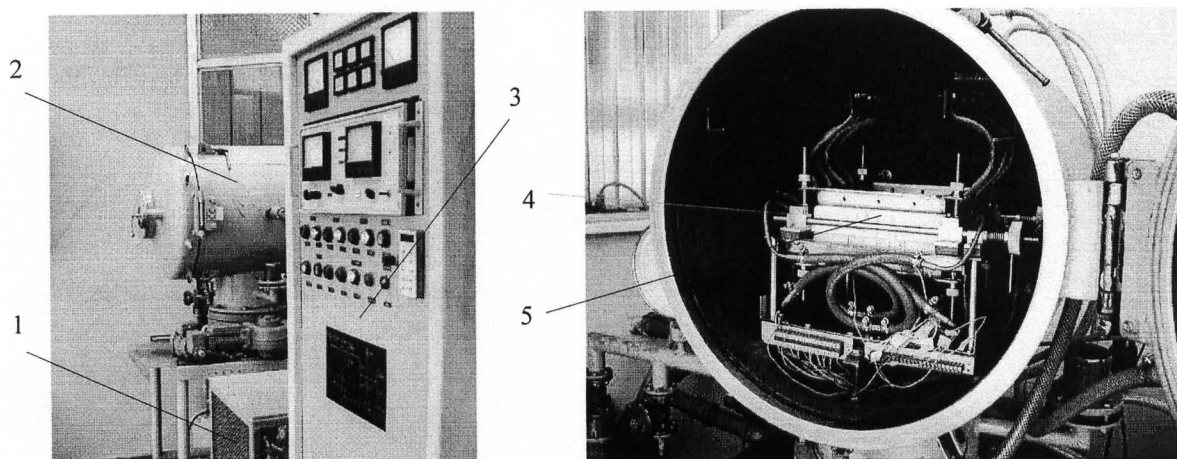


Рис. 8. Тепловакуумный стенд: 1 – силовой трансформатор, 2 – вакуумная камера, 3 – стойка системы управления и контроля, 4 – экспериментальный модуль в вакуумной камере, 5 – исследуемые образцы

5. ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Одномерные датчики позволяют измерять тепловые потоки или коэффициенты теплоотдачи в отдельной точке на поверхности. Для определения дискретного распределения этих величин необходимо достаточное число одномерных датчиков, установленных на поверхности исследуемого объекта. Однако решение двухмерных или трехмерных задач теплопроводности позволяет оценить непрерывные поля этих величин. В этом случае температурные измерения обычно проводятся на всей внут-

ренней поверхности. Температурные датчики с подобными измерительными элементами устанавливаются на исследуемой модели или реальной системе, также могут быть использованы внутренние температурные измерения. В настоящем разделе рассматривается задача определения внешнего теплового воздействия (граничного условия), зависящего от времени и местоположения точки на сферической поверхности. Ниже описывается пример практического использования предлагаемой методики для определения характеристик внешнего теплового нагружения на обтекатель астронавигационного прибора "Димид", установленного на спутнике «Марс-96», на участке траектории выведения КЛА, после сброса головного обтекателя. К тепловому

режиму этого прибора предъявлялись жесткие требования, что и потребовало проведение специальных исследований, описанных ниже. В ходе испытаний был реализован режим нагрева опытного образца, соответствующий тепловому нагружению крышки прибора при движении на участке траектории после сброса головного обтекателя. Тепловые испытания крышки прибора "Димио" с установленным на нем теплозащитным покрытием проводились на тепловакуумной стенде термоциклирования (см.рис. 9). Термопары N1 – N13 и N0 (рис. 10) были установлены на внутренней теплоизолированной крышке на трех окружностях ($\beta = 0^\circ$, $\beta = 30^\circ$, $\beta = 60^\circ$ соответственно) и N0 на окружности $\beta = 45^\circ$.

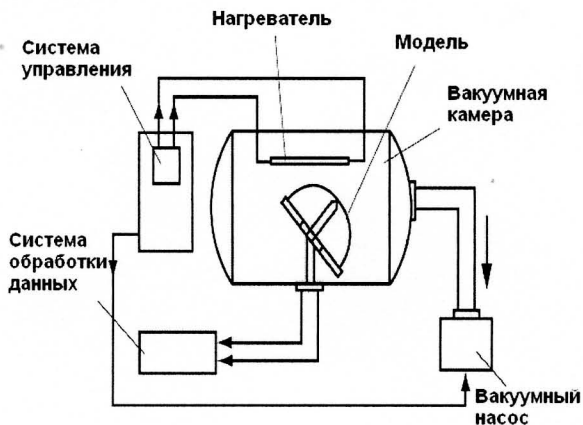


Рис. 9. Испытание экрана

Результаты испытаний в виде термограмм представлены на рис. 11. Там же приведены и расчетные значения температур. Достоверность полученных результатов обосновывалась путем сравнения расчетных и измеренных температур на внутренней поверхности крышки в критической точке N 0, что является корректным, потому что показания этой термопары не использовались при решении обратной задачи. Из рис. 11 видна достаточная близость расчетных и экспериментальных кривых.

На рис. 12 представлены временные зависимости тепловых потоков, подводимых к исследуемой крышке в точках установки термодатчиков. Очевидно, что в силу симметрии теплового воздействия относительно плоскости симметрии величины тепловых потоков в соответствующих точках должны совпадать. Указанное обстоятельство также подтверждает достоверность полученных результатов. Эти зависимости позволяют достаточно точно оценить интегральное количество тепла, поступающего от крышки к прибору "Димио", что в дальнейшем может быть использовано при отработке тепловых режимов подобных устройств. Представленные в настоящем разделе результаты подтверждают возможность использования и вычислительную эффективность рассматриваемого метода при диагностике многомерных процессов теплопроводности.

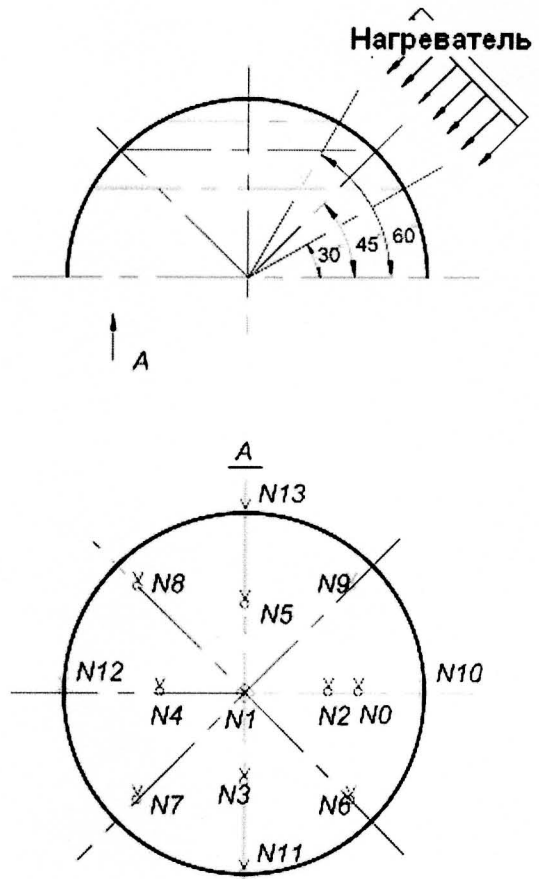


Рис. 10. Схема размещения термодатчиков на внутренней поверхности образца

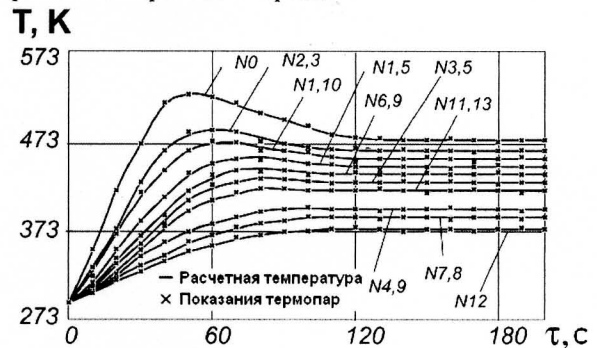


Рис. 11. Сравнение экспериментальных показаний термодатчиков с расчетными значениями температур

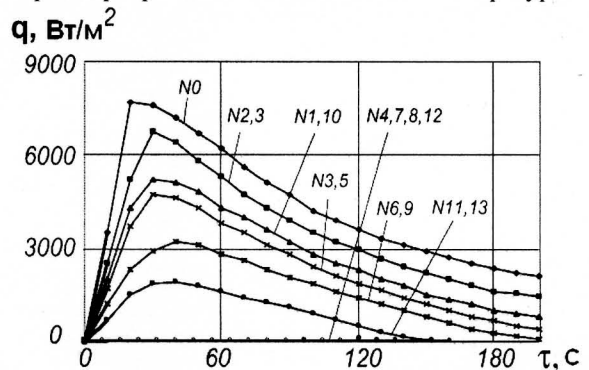


Рис. 12. Плотность теплового потока, подводимого к внешней поверхности крышки в точках установки термодатчиков

6. ТЕПЛОВАЯ ДИАГНОСТИКА ГЕТЕРОГЕННЫХ ПОТОКОВ

При анализе тепловых режимов работы машин и агрегатов важной задачей является исследование механизма теплового и тепломеханического взаимодействия высокоскоростного двухфазного потока с материалом конструкции. Проводимые для решения этой задачи измерения тепловых потоков в основном базируются на применении калориметрических методов или метода тонкой стенки. Однако основным недостатком этих методов в рассматриваемых условиях взаимодействия является требование сохранения массы калориметра или толщины стенки во время эксперимента. Это существенно ограничивает время измерения, так как при длительном воздействии гетерогенного потока на твердое тело начинается эрозионное разрушение. В результате данными методами затруднительно учесть влияние на теплообмен таких факторов, как, например, выбитых с обтекаемой поверхности частиц при эрозии, изменения формы, развитой шероховатости и др. В данном разделе представлена методика тепловой диагностики при взаимодействии элементов конструкции с высокоэнтальпийными гетерогенными потоками, основанная на применении методологии решения обратных задач теплообмена. Она позволяет исследовать процесс двухфазного теплообмена при эрозии поверхности и создать приближенную математическую модель, учитывающую влияние различных определяющих факторов. Экспериментальные исследования были проведены в ЦНИИМаш И.В.Репиным. Экспериментальная установка представляет собой газодинамическую трубу с открытой рабочей частью, использующую сильно недорасширенные струи газа и предназначенную для создания сверхзвуковых запыленных потоков. Схема установки приведена на рис.13. В качестве источника нагрева газа используется химическая энергия горения. Твердые частицы электрокорундового порошка вводятся в форкамеру 14 через форсунки, расположенные на днище по концентрическим окружностям. Равномерность обеспечивается специальной системой подачи твердых частиц к форсункам, состоящей из питателя 1, трубопровода и конуса рассекателя. Сверхзвуковой двухфазный поток формируется в сопле 3, специально спрофилированном с целью наиболее эффективного ускорения частиц. Сформированный сверхзвуковой двухфазный поток воздействует на калориметрическую модель 4.

По данным температурных измерений на основе решения граничной обратной задачи теплопроводности с подвижным фронтом разрушения определяется величина теплового потока, идущего на прогрев калориметра. Для этого необходимо дополнительно знать изменение длины калориметра в результате эрозионного разрушения в процессе испытания. Эта задача решается с помощью термопар, которые прикреплены к плоским днищам отверстий,

расположенным на разных расстояниях от внешней поверхности.

В процессе исследований обрабатывались результаты шести экспериментов. Результаты расчетов по определению потоков, идущих на прогрев модели, приведены на рис. 14 и 15. Можно сделать вывод, что при увеличении интенсивности потока падающей массы в экспериментах происходит увеличение теплового потока, идущего на прогрев внутренних слоев, при этом температура внешней поверхности не превосходит некоторого порогового значения, существенно меньшего, чем температура плавления меди, что свидетельствует о механическом характере разрушения образцов. Варьируя диаметр частиц при постоянных параметрах газа в форкамере, можно в широких пределах изменять условия воздействия частиц на модель и построить достаточно универсальные модели взаимодействия материалов с гетерогенными потоками.

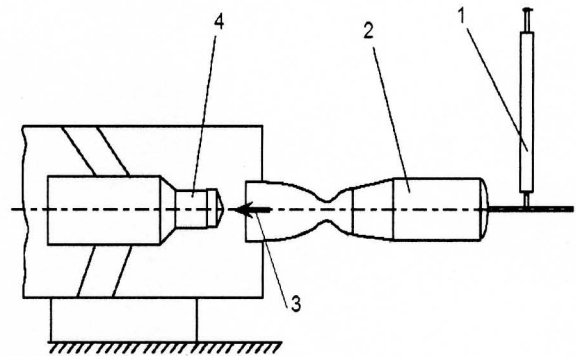


Рис. 13. Схема экспериментальной установки: 1 - питатель; 2 - форкамера; 3 - сопловой тракт; 4 - модель

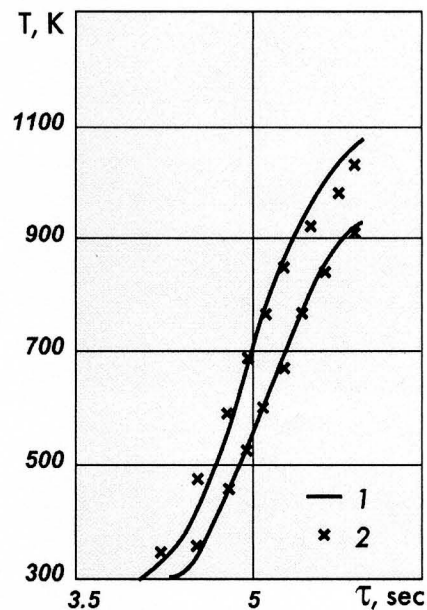


Рис. 14. Сравнение расчетных и экспериментальных показаний термопар (эксперимент N3): 1 - расчетные значения, 2 - экспериментальные значения

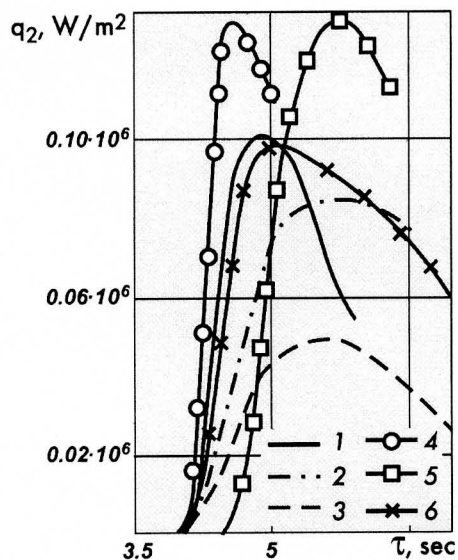


Рис. 15. Зависимость теплового потока от времени:
1 - эксперимент N1; 2 - N2; 3 - N3; 4 - N4; 5 - N5; 6 - N6

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНЫХ ТЕРМИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

В процессе работы твэлов ядерных реакторов их конструктивные элементы (топливо и оболочка) претерпевают целый ряд физико-химических и ядерно-физических превращений. Происходит изменение объема топлива вследствие терморadiационного доспекания, термического расширения и растрескивания; выход из топлива газообразных продуктов деления и их физико-химическое взаимодействие; механическое взаимодействие топлива с оболочкой; изменение размеров оболочки вследствие деформации и радиационного роста; изменение степени черноты и других характеристик топлива и оболочки. Причем эти процессы и их влияние на работоспособность и надежность твэлов зависят от теплового режима твэлов, который в значительной степени определяется величиной контактного термического сопротивления (КТС) между топливом и оболочкой. Расчетные методики, учитывающие перечисленные выше процессы, основаны на моделях проводимости зазора между топливом и оболочкой, которые в свою очередь строятся на эмпирических данных. Такие модели должны опираться на экспериментальные исследования величины КТС и на данные о его изменении в процессе облучения при различных режимах. Для этой цели нужны измерения величины КТС между топливом и оболочкой твэлов при проведении ресурсных испытаний на исследовательских реакторах.

Опытная тепловыделяющая сборка (ТВС) состояла из 18 твэлов, размещенных в два ряда (рис. 16), и охлаждалась водой под давлением в 160 Мпа. Твэлы R1-R6 были оснащены внутритопливными ВР термopарами, расположенными в центральном отверстии тепловыделяющего сердечника, в акси-

альном сечении, соответствующем зоне максимального энерговыделения. Объемное распределение энерговыделения в ТВС определялось с помощью аксиальной и азимутальнойборок датчиков нейтронного потока (родиевые ДПЗ).

Определение КТС между тепловыделяющим сердечником и оболочкой в твэлах типа ВВЭР-440, заполненных гелием и ксеноном, проводилась по данным нестационарных измерений в процессе первоначального выхода на мощность со свежим топливом и в процессе третьего выхода на мощность спустя двое суток. Результаты представлялись в виде зависимости КТС от линейной тепловой нагрузки, являющейся интегральной характеристикой энергонапряженности твэла.

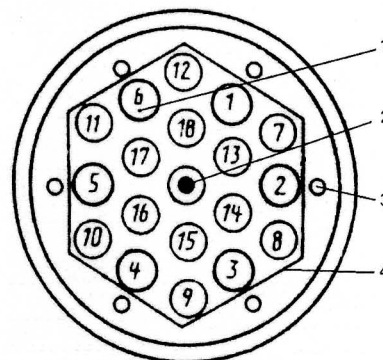


Рис. 16. Тепловыделяющая сборка (ТВС): 1 – термометрические твэлы, 2 – аксиальная сборка ДПЗ, 3 – азимутальная сборка ДПЗ, 4 – чехол ТВС

Результаты по первоначальному пуску со свежим топливом представлены на рис. 17. При выходе на мощность со свежим топливом в диапазоне линейных тепловых нагрузок от 150 до 240 Вт/см величина контактного термического сопротивления между топливом и оболочкой линейно уменьшается с ростом линейной тепловой нагрузки. Однако, как видно из рис. 17, при линейной тепловой нагрузке 190 Вт/см в твэлах R2 и r3 и при нагрузке 210 Вт/см в твэле R1 происходит скачок релокации (pellet jump), под которой понимается совокупное проявление эффектов растрескивания и фрагментации топливных таблеток, в результате которых существенно увеличивается диаметр тепловыделяющего сердечника и сокращается ширина зазора между сердечником и оболочкой твэла.

Существенным преимуществом данного метода исследований является то, что КТС между топливом и оболочкой, являющееся одним из критериев безопасности ядерного реактора, определяется по результатам нестационарных измерений, проводимых непосредственно в ходе работы реактора без целенаправленного воздействия на режим его работы. Это позволяет определять КТС между топливом и оболочкой твэлов в истинных натуральных условиях, что особенно важно, поскольку твэл является сложной технической системой, свойства которой зависят от истории облучения. Метод позволяет исследовать

довать также уровень механического взаимодействия топлива с оболочкой в зависимости от скорости подъема мощности реактора, который определяет его безопасность на режимах, связанных с увеличением мощности ядерного реактора.

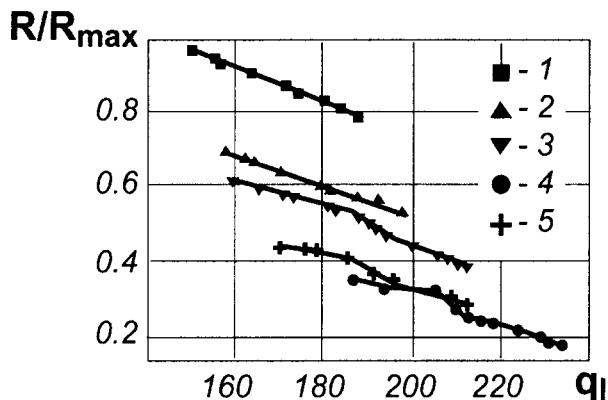


Рис. 17. Подъем мощности. Зависимость КТС от линейной тепловой нагрузки [Вт/см]. 1 – твэл R3, 2 – R5, 3 – R2, 4 – R6, 5 – R1

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов (введение в теорию обратных задач теплообмена). - М.: Машиностроение, 1979, 216 с.
- Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена, М.: Наука, 1988,- 288 с.
- Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненароков А.В. Идентификация математических моделей сложного теплообмена.- М.: Изд. МАИ, 1999, 268 с.
- Алифанов О.М. Применение принципа регуляризации для построения приближенных решений обратных задач теплопроводности // ИФЖ, 1972. т.23, N 6, с.1084-1091.
- Алифанов О.М. Регуляризационные схемы решения обратных задач теплопроводности // ИФЖ. 1973. т.24. N 2. с.324-333.
- Алифанов О.М. Прямые методы решения линейных обратных задач теплопроводности // ИФЖ. 1973. т.24. N 6. с.1129-1137.
- Алифанов О.М. Численное решение нелинейной обратной задачи теплопроводности // ИФЖ. 1973. т.25. N 2. с.363-370.
- Алифанов О.М. Обратная задача теплопроводности // ИФЖ. 1973. т.25. N 3. с.530-537.
- Алифанов О.М. О регуляризационных схемах приближенного решения нелинейной обратной задачи теплопроводности // ИФЖ.1974. т.26. N 1. с.116-121.
- Алифанов О.М. Определение граничного теплового режима из решения обратной задачи теплопроводности // ИФЖ. 1974. т.26. N 2. с.349-358.
- Алифанов О.М. Решение обратной задачи теплопроводности итерационными методами // ИФЖ. 1974. т.26. N 4. с.682-689.
- Алифанов О.М. Граничные обратные задачи теплопроводности // ИФЖ. 1975. т.29. N 1. с.13-26.
- Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена в исследовании тепловых процессов и проектировании технических систем // ИФЖ. 1977. т.33. N 6. с.972-981.
- Алифанов О.М. Определение тепловых нагрузок из решения нелинейной обратной задачи // ТВТ. 1977. т.15. N 3. с.598-605.
- Алифанов О.М. Некоторые вопросы решения обратных задач теплопроводности и автоматизированной обработки данных в теплофизических исследованиях // ИФЖ. 1980. т. 39. N 2. с.211-219.
- Алифанов О.М. О методах решения некорректных обратных задач // ИФЖ. 1983. т. 45. N 5. с.742-752.
- Алифанов О.М. Об идентификации физических процессов и обратных задачах // ИФЖ. 1985. т. 49. N 6. с.889-897.
- Алифанов О.М. Об одном способе учета априорной информации при решении некорректных обратных задач // ИФЖ. 1985. т.49. N 6. с.925-932.
- Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненароков А.В. Сплайн-аппроксимация решения обратной задачи теплопроводности, учитывающая гладкость искомой функции // ТВТ. 1987. т.25. N 4. с.693-699.
- Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Ненароков А.В. и др. Определение характеристик теплового взаимодействия материалов с двухфазными потоками методом обратных задач // ТВТ. 1993. т.31. N 3. с.450-454.
- Алифанов О.М., Михайлов В.В. Решение обратной задачи теплопроводности итерационными методами // ИФЖ. 1978. т.35. N 6. с.1123-1129.
- Алифанов О.М., Михайлов В.В. Решение граничной обратной задачи теплопроводности в переопределенной постановке. ИФЖ. 1983. т.45. N 5. с.776-781.
- Алифанов О.М., Румянцев С.В. Об устойчивости итерационных методов решения линейных некорректных задач // ДАН СССР. 1979. т.248. N 6. с.1289-1291.