

Национальная Академия Наук Украины
Институт технической теплофизики

На правах рукописи

КРУКОВСКИЙ Павел Григорьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА НА ОСНОВЕ ОБЩЕГО
ИНЖЕНЕРНОГО ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ

05.14.06 - Техническая теплофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Киев, 1996.



Дисертація є рукописом

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики
Національної Академії Наук України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,
член-корреспондент НАН України **МАЦЕВИТІЙ** Юрій Михайлович

доктор технічних наук,
професор **НИКИТЕНКО** Николай Иванович

доктор технічних наук **ДЕМЧЕНКО** Владимир Федорович

Ведущая организация - Институт проблем материаловедения
НАН Украины

Защита состоится "4" июля 1996 г. в 13³⁰ час. на заседании
Специализированного ученого совета Д 50.04.02 по защите диссертаций
на соискание ученой степени доктора технических наук в Институте
технической теплофизики Национальной Академии Наук Украины по
адресу: 252057, г. Киев-57, ул. Желябова, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТТФ НАН
Украины.

Автореферат разослан "26" апреля 1996г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета
доктор технических наук

КРИВОШЕЙ Ф.А.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Интерес к обратным задачам тепломассопереноса (ОЗТ) неуклонно растет, т.к. постановки новых обратных задач (ОЗ) порождаются потребностями практики и интенсивным развитием современных численных методов и особенно программных средств решения разнообразных прямых задач тепломассопереноса (ПЗТ) на основе более полных математических моделей. Метод обратных задач может использоваться при интерпретации экспериментальных измерений для определения различных коэффициентов и условий теплообмена, идентификации параметров сложных моделей с целью проведения долгосрочных прогнозов и оптимизации параметров изделий и устройств. Количество инженеров и научных работников, занимающихся решением прямых задач тепломассопереноса намного превосходит количество лиц, имеющих возможность кроме прямых задач решать и обратные задачи тепломассопереноса. Причиной такого положения является тот факт, что все большее количество научных работников и инженеров в своей практической деятельности используют готовые, разработанные различными фирмами компьютерные программы решения ПЗТ, в которых отсутствует возможность решения обратных задач. Назрела необходимость разработки программно-методического обеспечения решения ОЗ, совместимого с уже имеющимися у инженеров программами решения ПЗТ. Поэтому представляется актуальной идея разработки такого подхода к решению ОЗ (с методической, алгоритмической и программной проработкой и реализацией), который можно было бы практически использовать с имеющимися моделями и компьютерными программами решения разнообразных ПЗТ.

Цель работы - разработать общий инженерный подход к решению различных обратных задач тепломассопереноса, позволяющего использовать для этого имеющиеся разнообразные модели и программы решения прямых задач тепломассопереноса. Показать работоспособность и эффективность такого подхода и использовать его для решения ряда практических ОЗТ технической теплофизики с целью исследования, прогнозирования и оптимизации различных процессов тепломассопереноса.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать необходимость и сформулировать понятие общего инженерного подхода к решению ОЗТ;

- сформулировать требования подхода к методу и программе решения ОЗ, удовлетворение которых позволяет достичь поставленной в работе цели;

- выбрать метод решения ОЗТ и доработать его для удовлетворения требований подхода;

- разработать основные принципы работы инженерных программ решения обратных задач, удовлетворяющие требованиям подхода;

- апробировать предложенный подход путем решения ряда методических и практических обратных задач с целью исследования, прогнозирования и оптимизации параметров различных практически важных процессов тепломассопереноса.

Идея работы состоит в создании методического обеспечения и программного модуля, позволяющего решать обратные задачи с не зависящими от него программными модулями решения прямых задач тепломассопереноса.,

Метод исследования. Экспериментально - расчетный, основанный на использовании натуральных измерений и численных методов математического моделирования процессов тепломассопереноса и идентификации параметров моделей.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием математических моделей, адекватных реальным процессам тепломассопереноса, удовлетворительным согласованием результатов расчета с данными натуральных и вычислительных экспериментов, использованием апробированных численных методов расчетных исследований.

Научная новизна работы заключается в создании общего инженерного подхода к решению обратных задач тепломассопереноса, позволяющего получать решения обратных задач на основе широкого круга существующих моделей и готовых программ решения прямых задач тепломассопереноса.

Наиболее существенные научные результаты, характеризующие новизну работы, состоят в следующем:

- впервые обоснована необходимость и актуальность разработки общего инженерного подхода к решению обратных задач тепломассопереноса, позволяющего обеспечить практические потребности инженеров в оперативном решении обратных задач тепломассопереноса

на основе существующих программных средств решения разнообразных прямых задач тепломассопереноса;

- сформулированы требования, которым должен удовлетворять метод решения ОЗ, используемый в таком подходе;

- впервые разработаны принципы построения общих инженерных программ решения обратных задач тепломассопереноса, реализующих идею создания независимого модуля решения ОЗ, способного взаимодействовать с независимыми программными модулями решения прямых задач тепломассопереноса;

- в качестве методического обеспечения такого подхода предложено использовать итерационный метод Ньютона-Гаусса и метод регуляризации А.Н.Тихонова для идентификации (оценки) искомых параметров по данным экспериментальных измерений;

- впервые показано, что на основе предложенного подхода появляется возможность ставить и решать обратные задачи тепломассопереноса, используя данные нескольких экспериментов одновременно, что позволяет увеличить точность их решения;

- на примере определения граничных условий теплообмена на поверхности цилиндра показана возможность повышения точности решения ОЗТ за счет оптимального выбора формы и теплофизических свойств этого цилиндра;

- определены граничные условия теплообмена в полостях теплообменного аппарата с диссоциирующим теплоносителем N_2O_4 ;

- на основе решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности разработана методика определения условий теплообмена при охлаждении плоской поверхности водовоздушной струей;

- решены ряд практически важных теплофизических задач оптимального теплового проектирования, сформулированных как обратные задачи;

- разработана математическая модель и предложен алгоритм (основанный на решении ОЗТ) прогноза высокотемпературной газовой коррозии лопаток газовых турбин;

- показана возможность и эффективность использования предложенного подхода решения ОЗТ для идентификации параметров массопереноса в моделях фильтрации с целью прогнозирования и управления качеством подземных вод;

- рассмотрены роль и место обратных задач тепломассопереноса в системах технических и экологических мониторингов.

Практическая ценность и реализация полученных результатов.

Разработанный общий инженерный программно-методический подход имеет четкую практическую направленность, поскольку он позволяет решенем ОЗТ определять разнообразные параметры и характеристики исследуемых процессов тепломассопереноса на основе используемых инженерами моделей и программ решения прямых задач тепломассопереноса. Такой подход, ориентированный на широкое использование инженерами при решении ОЗТ, реализован и опробован с различными пакетами программ решения прямых задач тепломассопереноса, в частности с широко известными в мире пакетами теплового анализа твердых тел COSMOS/M (фирмы SRAC, США), и моделирования прессов тепломассопереноса на основе уравнений Навье-Стокса PHOENICS (фирмы CHAM, Англия).

Результаты диссертационной работы использованы Институтом проблем материаловедения НАН Украины (г.Киев) при исследовании теплофизических свойств теплозащитных и конструкционных материалов; НИИ пожарной безопасности МВД Украины (г.Киев) для определения огнезащитной способности покрытий; Институтом геологических наук НАН Украины (г.Киев) при идентификации массообменных характеристик гидрогеологических моделей фильтрации подземных вод; Киевским техническим университетом при идентификации и оптимизации параметров теплообменных устройств и элементов, используемых в космических аппаратах; ЦКБ "Ритм" ПО Завод "Кварц" (г.Черновцы) при оптимизации параметров печей для выращивания полупроводниковых монокристаллов; НПО "Машпроект" (г.Николаев) при прогнозировании ресурса работы защитных покрытий лопаток газовых турбин; фирмой "Термосталь" (г.С.-Петербург) при исследовании теплофизических характеристик и условий теплообмена различных изделий при термической обработке.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы выкладывались на: Международной конференции "Моделирование систем - 83" (Прага 1983), Всесоюзных Гагаринских научных чтениях по космонавтике и авиации (Москва, 1985), Межд. школе-семинаре "Математические модели, аналитические и численные методы в теории переноса" (Минск, 1986), Межд. школе-семинаре "Тепло- и массообмен в технологии и эксплуатации электронных и микроэлектронных систем",

(Минск, 1989), Всесоюзной конференции "Методы и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей и их элементов" (Харьков, 1983, 1990), Всесоюзной конференции "Математическое моделирование в энергетике" (Киев, 1990), Международной конференции "Некорректно поставленные задачи в естественных науках" (Москва, 1991), Всесоюзной конференции "Обеспечение коррозионной надежности лопаток газовых турбин" (С.-Петербург, 1992), Минском между. форуме "Тепломассообмен - ММФ - 92", (Минск, 1992), Международной конференции "Проблемы промышленной экологии и безопасности" (Севастополь), 1993, Международной конференции "Проблемы экологического мониторинга и охраны труда" (Севастополь, 1993), Конференции "Оценка ресурсов подземных вод в условиях техногенеза" (Киев, 1993), II Международной конференции "Идентификация динамических систем и обратные задачи" (С.-Петербург, 1994), Международной конференции "Материалы в энергетическом машиностроении" (Бельгия, Льеж, 1994), XIII Всероссийской научн.-практ. конф. "Пожарная безопасность-95" (Москва, 1995), Международной конференции "Пожарная безопасность в строительстве" (Польша, Варшава-Спала, 1995).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 41 печатной работе, в том числе 1 монографии.

Личное участие автора в получении научных результатов состоит в разработке основной идеи диссертации, постановке и решении задач, выполнении расчетных исследований и разработке расчетных методик и программ. Автору принадлежат также обработка, анализ и обобщение полученных данных. Все работы, представленные в соавторстве, выполнялись диссертантом в виде равноправного партнерства.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложена на 209 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка и 8 таблиц, список использованных источников из 149 наименований, и приложения, всего 282 страницы.

Автор защищает:

1. идею и основные положения общего инженерного подхода к решению обратных задач тепломассопереноса, который позволяет удовлетворить практические потребности инженеров в оперативном решении обратных задач на основе существующих программных средств решения разнообразных прямых задач тепломассопереноса;

2. требования, которым должны удовлетворять метод и программа решения обратных задач, используемые в таком подходе;

3. методическое обеспечение такого подхода, основанное на использовании метода Ньютона-Гаусса и метода регуляризации А.Н.Тихонова для идентификации искоемых параметров по данным экспериментальных измерений или проектных состояний;

4. методику и результаты использования предложенного подхода для постановок и решения обратных задач тепломассопереноса с использованием данных нескольких экспериментов одновременно с целью повышения точности решения ОЗТ;

5. методику повышения точности решения ОЗТ за счет оптимального выбора формы и теплофизических свойств термометрируемых образцов (на примере определения граничных условий теплообмена на поверхности цилиндра по данным термометрирования его поверхности);

6. результаты определения граничных условий теплообмена в полостях теплообменного аппарата с диссоциирующим теплоносителем N_2O_4 ;

7. методику и результаты определения условий теплообмена при охлаждении плоской поверхности водовоздушной струей на основе решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности;

8. результаты решения ряда практически важных задач оптимального теплового проектирования, сформулированных как обратные задачи, в частности, оптимальных законов тепловыделения в электронагревателях печи для выращивания полупроводниковых монокристаллов индий-сурьма, оптимальных законов охлаждения керамического элемента газотурбинной сопловой лопатки, позволяющих уменьшить вероятность ее быстрого разрушения вследствие термических напряжений, оптимальных конструктивных параметров термоэлектрического устройства охлаждения фотоэлектронного умножителя;

9. математическую модель и алгоритм (основанный на решении ОЗТ) прогноза высокотемпературной газовой коррозии лопаток газовых турбин;

10. результаты решения методических ОЗТ для идентификации параметров массопереноса в моделях фильтрации с целью прогнозирования и управления качеством подземных вод, результаты анализа вопроса о роли и месте обратных задач тепломассопереноса в системах технических и экологических мониторингов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко отмечена практическая роль и место обратных задач при решении инженерных задач исследования, прогнозирования и оптимизации процессов теплопереноса, обоснована актуальность темы диссертационной работы и ее целевая направленность, научная новизна и практическая ценность результатов, связь проведенных исследований с тематикой НИР ИТТФ НАН Украины.

Первая глава посвящена краткому обзору и анализу проблем практического решения ОЗТ. Отмечено, что в настоящее время практические потребности в решении ОЗТ определяются возможностями современных программных разработок решения ПЗТ, которыми пользуются инженеры во всем мире. Обращено внимание на тот факт, что широко распространенные и популярные в мире пакеты решения ПЗТ (в частности, SUPERSAP, COSMOS/M, ANSYS, MSC/NASTRAN, PHOENICS, FLUENT, FLOW3D и др.) не содержат в себе возможность решения обратных задач теплопереноса, что в определенной мере снижает их ценность, т.к. решение обратных задач часто является важным, а в ряде случаев необходимым этапом определения или настройки (идентификации) параметров используемых математических моделей в целях исследования, прогнозирования или оптимизации моделируемых процессов теплопереноса.

Для решения этой проблемы предложено разработать так называемый общий инженерный подход к решению ОЗТ, позволяющий осуществлять практическую реализацию решения ОЗ на основе существующих пакетов программ решения ПЗТ. Дано определение терминов, составляющих название и суть предлагаемого подхода (в близком соответствии со словарями русского языка), а именно: **подход** - совокупность методов, способов и приемов, необходимых для решения задачи; **общий** - касающийся всех (одинаково подходящий ко всем ОЗ); **инженерный** - связанной с инженерной деятельностью. Предлагаемый подход к решению ОЗ рассматривается как совокупность общего метода решения ОЗ и инженерной программы решения ОЗ, одинаково подходящие к решению разнообразных обратных задач.

Сформулированы требования, которым должен отвечать такой подход, а именно:

К методу:

1. Инвариантность к смыслу и типу искоемых параметров, виду содержащей их математической модели ПЗТ.
2. Неизменность расчетных соотношений алгоритма и метода при решении различных ОЗТ.
3. Устойчивость к ошибкам в T_3 .
4. Вычислительная эффективность

К программе:

1. Модульность- независимость от программы решения ПЗТ.
2. Совместимость- способность взаимодействовать с программой решения ПЗТ как с "черным ящиком" через входные и выходные файлы.

С позиций сформулированных выше требований предлагаемого подхода рассмотрены и проанализированы существующие на сегодня методы решения ОЗТ, большой вклад в развитие которых внесли такие известные ученые, как Тихонов А.Н., Алифанов О.М., Морозов В.А., Бек Дж., Мацевитый Ю.М., Никитенко Н.И., Симбирский Д.Ф., Коздоба Л.А. и другие. Разделение всех методов решения ОЗТ на две группы, - экстремальные и прямые методы (по признаку необходимости построения оператора, обратного к оператору решения ПЗТ), позволило получить вывод о том, что для реализации предлагаемого подхода могут быть использованы только экстремальные методы решения ОЗТ, которые осуществляют минимизацию функционала (функции) F близости экспериментальных значений T_3 и соответствующих им расчетных выходных характеристик модели T_m на основе итерационных алгоритмов. Отмечено, что только эти методы удовлетворяют рассмотренным выше требованиям подхода 1-2 к методу. Отбрасывая из рассмотрения группу прямых и часть экстремальных методов решения ОЗТ мы не уменьшаем их достоинств, т.к. такой анализ не претендует на законченность и всеобщность, а лишь выражает особенность предлагаемого подхода к решению ОЗТ и анализ методов, которыми такой подход можно реализовать. Далее проведен анализ различных экстремальных методов решения ОЗТ с позиций необходимого числа решений ПЗТ для получения минимума функционала F , поскольку это определяет его вычислительную эффективность (требование 4 к методу, реализуемому в подходе). Делается вывод о том, что наиболее распространенными и эффективными для минимизации невязки F являются методы первого порядка, в которых необходимо вычислять только первую производную $\partial F / \partial P$. Наиболее экономичными в этом

плане являются так называемые градиентные методы и один из самых его эффективных - метод сопряженных градиентов с вычислением производных $\partial F / \partial P$ путем решения так называемой сопряженной (в математическом смысле) задачи к исходной (этот метод широко используется для решения ОЗТ, в частности, в работах Морозова В.А., Алифанова О.М. и др.). В соответствии с этим методом для выполнения каждой итерации необходимо решать три краевые задачи, - для распределений потенциала (например температуры), вариаций потенциала и сопряженной переменной. К сожалению, этот метод не удовлетворяется требованию подхода 2 к методу, сформулированному выше, поскольку при переходе от решения одной ОЗТ к другой необходимо построение других сопряженных операторов, что влечет за собой перестройку расчетных соотношений алгоритма.

Анализ литературы показывает, что имеются методы первого порядка, удовлетворяющие требованию 2 и имеющие достаточно высокую скорость сходимости, имея ввиду так называемые квазиньютоновские методы, используемые, в частности, для оценивания параметров сложных нелинейных моделей. Среди них достаточно надежным и экономичным является метод Ньютона-Гаусса. Этот метод имеет скорость сходимости метода Ньютона и вместе с тем лишен его недостатков, связанных с необходимостью вычисления вторых частных производных величины F и T_M от искомым параметров модели P . По объему вычислений на каждой итерации метод Ньютона-Гаусса близок к градиентному методу, а по скорости сходимости - к методу Ньютона.

Таким образом, исходя из поставленной в работе цели, проведенного анализа существующих методов решения ОЗТ и методов минимизации функционала F , сделан вывод о том, что реализация общего инженерного подхода возможна на основе только экстремальных методов решения ОЗТ с предпочтительным применением итерационных квазиньютоновских (в частности метод Ньютона-Гаусса) методов минимизации функционала F .

Особое внимание заостряется на проблемах программного обеспечения инженерных решений обратных задач тепломассопереноса. Отмечается, что характерной особенностью описанных в литературе программ решения ОЗТ является либо их жесткая привязка к конкретной прямой задаче (работы Алифанова О.М. и Бека Дж. с соавторами), либо необходимость представления математической модели прямой задачи в специальной (интегральной) форме (работы Тихонова

А.Н. и Верланыя А.Ф. с соавторами), что не удовлетворяет требованиям подхода 1-2 к программам, сформулированным выше. Констатируется, что создание программного обеспечения решения ОЗТ для широкого круга пользователей является достаточно важной проблемой, преодоление которой позволяет довести возможность решения ОЗТ до каждого заинтересованного инженера и исследователя, используя при этом имеющиеся у этих инженеров программы решения ПЗТ.

Вторая глава посвящена изложению методического и программного содержания авторской версии реализации предлагаемого подхода к решению ОЗТ. В качестве методической основы подхода выбран итерационный метод Ньютона-Гаусса для оценки (идентификации) параметров в общем случае нелинейных математических моделей (в том числе моделей процессов тепломассопереноса), в соответствии с которым ищется такой вектор искомых параметров

$$P = [P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n],$$

для которого величина невязки $F(P)$ стремится к минимуму

$$F(P) = \sum_{j=1}^m \left[T_{jm}(P) - T_{jэ} \right]^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $T_{jэ}$ и T_{jm} - экспериментальные и модельные (вычисленные решением ПЗТ) значения потенциала в j -й пространственно-временной точке области решения задачи, m - общее количество этих точек. Для поиска вектора P в соответствии с методом Ньютона-Гаусса используется следующая итерационная расчетная схема

$$P^{l+1} = P^l + \beta^l \cdot \Delta P^l, \quad (2)$$

где $l=0,1,\dots,L$ - номер итерации; β^l - длина шага; ΔP^l - приращение вектора искомых параметров P на итерации $l+1$, определяемое решением следующей системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\begin{cases} z'_{1,1} \Delta P'_1 + \dots + z'_{1,i} \Delta P'_i + \dots + z'_{1,n} \Delta P'_n = T'_{1M} - T_{1Э} \\ \dots \\ z'_{j,1} \Delta P'_1 + \dots + z'_{j,i} \Delta P'_i + \dots + z'_{j,n} \Delta P'_n = T'_{jM} - T_{jЭ}, \\ \dots \\ z'_{m,1} \Delta P'_1 + \dots + z'_{m,i} \Delta P'_i + \dots + z'_{m,n} \Delta P'_n = T'_{mM} - T_{mЭ} \end{cases} \quad (3)$$

где $Z'_{j,i}$ - функции чувствительности (изменения) потенциала T'_{jM} в j -й пространственно-временной точке измерения $T_{jЭ}$ ($j=1,2,\dots,m$) к изменению i -го параметра P'_i ($i=1,2,\dots,n$) вектора P . Значения T'_{jM} в (3) вычисляются решением ПЗТ при известных (заданных при $l=0$) параметрах на предыдущей итерации l с помощью математической модели и соответствующей ей компьютерной программы решения ПЗТ на каждой итерации в тех же пространственно-временных точках, в которых измерены или заданы соответствующие значения $T_{jЭ}$. Итерационный процесс (2)-(3) приводит к минимизации квадратичного критерия (1). Переопределенная (как правило) СЛАУ (3) размерностью $m \times n$ ($m \geq n$) решается с помощью метода наименьших квадратов

$$A^T A \cdot \Delta P^l = A^T B, \quad (4)$$

где A - матрица коэффициентов чувствительности $Z_{j,i}$ СЛАУ (3); B - вектор правых частей СЛАУ (3), A^T - матрица, транспонированная к матрице A . Выход из итерационного процесса осуществляется при удовлетворении критерия (1) или условия

$$\max_i \left| \frac{\Delta P'_i}{P'_i} \right| \leq \zeta, \quad (5)$$

где ζ - малая величина, например 0,005. Величина шага β^l в (2) может выбираться различными способами, но в работе принято $\beta^l=1$ с целью сокращения количества решений ПЗТ для решения ОЗТ. Функции

чувствительности $Z_{j,i}$, представляющие собой частные производные от потенциала T_{jM} , вычисляемого решением ПЗТ в точке j , по i -му искомому параметру P_i , вычисляются численно следующим образом

$$Z_{j,i} = \frac{T_{jM}(P_1, \dots, P_i + \delta P_i, \dots, P_n) - T_{jM}(P_1, \dots, P_i, \dots, P_n)}{\delta P_i} \quad (6)$$

Величина возмущения δP_i для i -го искомого параметра вычисляется как $\delta P_i = 0,001 \cdot P_i$. Значение 0,001 подобрано эмпирически и позволяет с одной стороны обеспечить приемлемую точность вычисления величины $Z_{j,i}$ по (6), а с другой стороны избежать влияния машинных ошибок округления.

Анализ показывает, что несмотря на то, что матрица $A^T A$ является положительно определенной, она не всегда является хорошо обусловленной. В плохой обусловленности матрицы $A^T A$ проявляется ("вылезает") вся физическая и математическая некорректность каждой конкретной ОЗТ, поэтому решение СЛАУ (4) может привести к неустойчивым решениям этой ОЗТ. Для повышения устойчивости решения ОЗТ предлагается использовать метод регуляризации А.Н.Тихонова, согласно которому вместо СЛАУ (4) решается СЛАУ

$$(A^T A + \alpha E) \Delta P = A^T B, \quad (7)$$

где E -единичная матрица; α - параметр регуляризации, который может выбираться различными способами, описанными в литературе. Мы остановились на известном способе так называемого эталонного примера, согласно которому α (когда это нужно) выбирается таким, для которого решение ОЗТ по исходным данным, содержащим ошибку, близкую к ожидаемой в эксперименте, наиболее близко к точному. В работе широко используется так называемая параметрическая (степенная) регуляризация ОЗТ, если искомые функции в ПЗТ задаются в виде степенных зависимостей (например сплайнов). Наконец, так называемая итерационная регуляризация также реализуется в этом методе (т.к. он итерационный). При этом итерационный процесс заканчивается при выполнении условия приближенного равенства невязки $F(P)$ (1) величине ошибки эксперимента δ^2 (если известна эта величина δ^2).

В работе учитываются ограничения на вектор искомых параметров P сверху и снизу. Для этого вводятся еще два вектора, P_{\max} для максимальных значений искомых параметров и P_{\min} - для минимальных, которые задаются из различных априорных соображений, связанных с возможным диапазоном изменения искомых параметров. Наличие в данном алгоритме решения ОЗТ СЛАУ (3) позволяет легко учесть ограничения типа неравенств (наиболее распространенные при решении ОЗТ)

$$p_{i \min} \leq p_i^l \leq p_{i \max} \quad (8)$$

на итерации $l+1$. Для q параметров, входящих в вектор P и нарушивших ограничения (8), приращения Δp_i^l вычисляются по формулам

$$\Delta p_i^l = \begin{cases} p_{i \max} - p_i^l, & p_i^{l+1} > p_{i \max} \\ p_{i \min} - p_i^l, & p_i^{l+1} < p_{i \min} \end{cases} \quad (9)$$

Столбцы матрицы СЛАУ (3) с приращениями, вычисленными по (9), переносятся в правую часть СЛАУ (3) и СЛАУ (7) решается снова, но только относительно тех Δp_i^l , которые не нарушили ограничения (8). Далее итерационный процесс (2) - (9) продолжается так же. Естественно, что при наличии q параметров, нарушивших ограничения (8), решаемая СЛАУ (3) снижает свой порядок с $n \times m$ на $(n-q) \times m$.

В рассматриваемом методе используются частные производные от T_M по искомым параметрам P и их вычисление производится численно по формуле (6), для чего требуется на каждой итерации n раз решать прямую задачу тепломассообмена. Соотношение, определяющее общее количество K решений ПЗТ, необходимое для решения ОЗТ, можно записать

$$K=L(n+1)+1,$$

где L - общее количество итераций, n - общее количество искомых параметров.

В качестве предварительного исследования метода Ньютона-Гаусса было проведено его сравнение с некоторыми экстремальными методами, наиболее зарекомендовавшими себя для оценки параметров и минимизации функций многих переменных. Для сравнения были выбраны метод покоординатного спуска (метод Хука-Дживса, метод минимизации нулевого порядка) и следующие методы минимизации первого порядка: метод сопряженных градиентов (метод Флетчера - Ривса), рассматриваемый в работе метод Ньютона - Гаусса, метод Левенберга - Марквардта и метод Дэвидона - Флетчера - Пауэла (метод переменной метрики). Главный интерес составлял (как отмечалось выше) вопрос исследования методов в плане числа обращений к расчету функции $F(P)$, - количество обращений к "черному ящику" или к решению прямой задачи при примерно одинаковой точности получаемых разными методами результатов. Сравнительное исследование всех перечисленных шести методов и имеющихся в литературе программ проводилось путем оценки параметров (от 2 до 4) в тестовых аналитических нелинейных функциях, представляющих собой

степенные, дробнорациональные, экспоненциальные и тригонометрические функции. Анализ результатов сравнения показал, что наиболее эффективным с точки зрения количества обращений к вычислению функции (количества решений прямой задачи) является метод Ньютона-Гаусса без использования методики автоматического выбора шага спуска. В ряде тестовых задач эффективность метода Ньютона-Гаусса был в 3 и более раз выше, в ряде других - на порядок выше.

Далее рассмотрены основные принципы создания и схема работы общих инженерных программ решения обратных задач, как независимых от произвольных программ решения ПЗТ модулей и



Рис 1 Схем взаимодействия программы решения обратных задач (ОЗ) с программами решения прямых задач тепломассопереноса.

легко совместимых с этими модулями решения ПЗТ. Отмечено, что взаимодействие программы решения ОЗ с программой решения ПЗТ может осуществляться только через входные и выходные файлы программы решения ПЗТ (рис.1), которые содержат в себе все причинные характеристики исследуемого процесса (входные файлы), и все следственные характеристики процесса (выходные файлы). Сформулированные выше требования к свойствам программ решения ОЗ легли в основу создания инженерной программы решения ОЗТ, названной в работе FRIEND (FRee Identification for ENgineers and Designers). Программа FRIEND была опробована с рядом независимых программ решения ПЗТ, в том числе с широко известными в мире программой PHOENICS и COSMOS/M

Третья глава посвящена использованию рассмотренного выше подхода (метода, алгоритма и реализованной на их основе компьютерной программы) для решения ряда методических и практических обратных задач, связанных с исследованием различных процессов теплообмена.

Традиционной областью применения метода ОЗТ является определение теплофизических характеристик теплозащитных материалов. В работе приводятся результаты решения одномерных тестовых и практических ОЗТ по определению теплофизических характеристик теплозащитных материалов, в частности, зависимости коэффициента теплопроводности от температуры $\lambda(T)$ при заданной зависимости теплоемкости C_v от температуры по данным измерения нестационарных температур в четырех пространственных точках по глубине образца в условиях произвольного одностороннего нестационарного нагрева. Искалась такая зависимость $\lambda(T)$, для которой величина (1) для двух внутренних термодатчиков будет минимальна. Здесь и далее во всей работе искомые решением ОЗТ разнообразные функциональные зависимости представлялись в виде кубических сплайнов - функций вида

$$\lambda(T) = \sum_{k=0}^3 a_{i,k} \cdot T^k, \quad T_i \leq T \leq T_{i+1}, \quad (10)$$

где λ - искомая функция аргумента T ; $a_{i,k}$ - коэффициенты сплайна. Таким образом производится так называемая параметризация задачи.

ЛИБ им. В. Стефанюка
АН Украины

Решением ОЗТ ищутся такие значения λ_i ($i=1,2,\dots,n$) сплайн- функции в узлах сплайна (при выбранных значениях аргументов T_i), интерполяция которых сплайн-функцией (10) и соответствующие им решения ПЗТ относительно T_M дают минимум величины невязки F в (1). Одномерная нестационарная нелинейная ОЗТ решалась с пятью узлами при температурах 20, 300, 600, 900 и 1200°C. Искались 5 параметров (значения коэффициентов теплопроводности при указанных выше температурах). Решение рассмотренной выше ОЗТ при возмущенных значениях температур на 9% дало решение, близкое к точному, что удалось получить благодаря применению перечисленных выше методов борьбы с неустойчивостью (сужению класса искомых функций $\lambda(T)$ до класса сплайн-функций (10) и применения регуляризации А.Н.Тихонова). Следует отметить, что при данных условиях проведения эксперимента, когда ОЗТ и ПЗТ (с граничными условиями I рода) решались по данным показания термодпар, представляется возможным определение только зависимости $\lambda(T)$ при заданной зависимости $C_V(T)$.

Далее приведены постановка задачи и результаты определения зависимости $\lambda(T)$ и величины $C_V = \text{const}$ теплозащитных материалов, используемых как огнезащитные (от воздействия пожара) покрытия на поверхности металлических изделий. В качестве экспериментальных

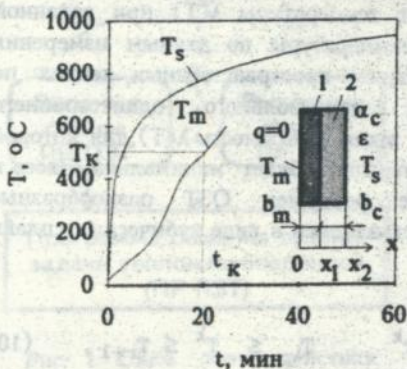


Рис.2. Тепловая схема образца и характерные зависимости температуры среды T_0 и металла T_m от времени t при испытаниях на огнестойкость.

данных использовались результаты экспериментальных огневых испытаний, регламентированных международным стандартом ISO 834, согласно которому двухслойная конструкция, состоящая из металлической стенки 1 и огнезащитного покрытия 2 (рис.2), помещается в специальную печь и подвергается огневому воздействию со стороны покрытия. Закон изменения температуры в печи $T_s(t)$ в ходе испытания измеряется, строго регламентирован и соответствует режиму "стандартного пожара".

Задан коэффициент теплоотдачи α_c от горячих газов к защитному покрытию на границе $x=x_2$. По данным термометрирования металлического элемента $T_m(t)$ в точке $x=0$ (отсутствие теплообмена в этой точке) и заданным граничным условиям III рода (с учетом лучистого теплообмена) на границе $x=x_2$ необходимо определить теплофизические характеристики покрытия. Практические испытания и измерения проводятся для различных толщин металлической стенки и защитного покрытия, но при одинаковых граничных условиях в точке $x=x_2$. Предварительные решения методических одномерных нестационарных ОЗТ по данным термометрирования в точке $x=0$ с ошибками измерений, составляющими 3%, показали, что используемая схема измерений позволят по данным одного испытания достаточно хорошо восстанавливать зависимость $\lambda(T)$ при заданной зависимости $C_v(T)$ и не позволяет одновременно восстановить обе эти зависимости.

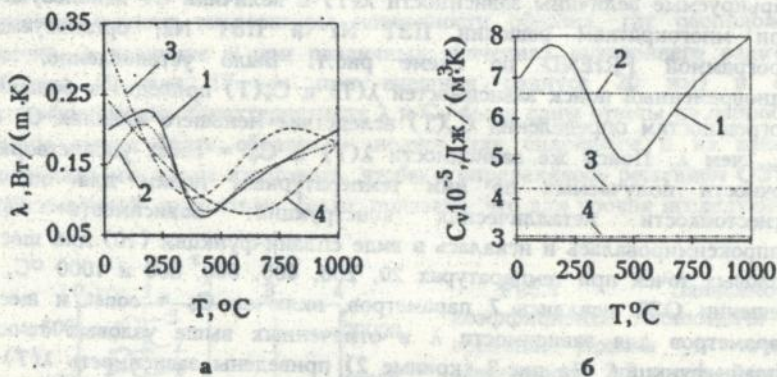


Рис.3. Зависимости коэффициента теплопроводности (а) и теплоемкости (б) от температуры: Кривые 1 - точные зависимости; 2-4 - зависимости, найденные решением ОЗТ при возмущенных на 3% значениях исходных температур (2- по данным двух опытов, 3- по данным опыта N 1, 4- по данным опыта N 2).

Не удастся даже с приемлемой точностью восстановить зависимость $\lambda(T)$ и постоянное значение C_v . На рис.3 показаны исходные (точные) зависимости $\lambda(T)$ и $C_v(T)$, использованные для решения методических

ОЗТ по данным измерений в точке $x=0$ для двух различных испытаний с одинаковыми граничными условиями, одинаковыми зависимостями λ и C_v от температуры (рис. 3, кривые 1), одинаковой толщиной покрытия $b_c = 15$ мм, но с разными толщинами металла $b_{m1} = 20$ мм (испытание (опыт) N 1) и $b_{m2} = 2$ мм (испытание N 2). В сложившейся ситуации, когда идентификация λ и C_v по каждому из испытаний не удовлетворяет необходимой точности, была предложена методика идентификации $\lambda(T)$ и $C_v(T)$ путем решения ОЗТ при одновременном использовании данных нескольких испытаний (испытаний N 1 и N 2). Реализация такой идеи оказалась возможной на основании предложенного в работе общего инженерного подхода к решению ОЗТ, согласно которому программа FRIEND искала одинаковые значения во входных файлах прямых задач, моделирующих испытания N 1 и N 2, последовательно запускала эти задачи и использовала в критерии (1) расчетные и измеренные температуры в точке $x=0$ во времени для обоих испытаний. Искомые и варьируемые величины зависимости $\lambda(T)$ и величина C_v используются при многократном решении ПЗТ N1 и ПЗТ N2, организуемые программой FRIEND по схеме рис.1. Было установлено, что одновременный поиск зависимостей $\lambda(T)$ и $C_v(T)$ приводит к большим погрешностям определения $C_v(T)$ вследствие меньшего влияния C_v на T_m , чем λ . Поиск же зависимости $\lambda(T)$ и $C_v = \text{const}$ удовлетворяет точности получаемых по ним температурным полям для оценки огнестойкости металлических конструкций. Зависимость $\lambda(T)$ аппроксимировалась и искалась в виде сплайн-функции (10) для шести узловых точек при температурах 20, 200, 400, 600, 800 и 1000 °С. В решении ОЗТ искались 7 параметров, включая $C_v = \text{const}$ и шесть параметров для зависимости λ в отмеченных выше узловых точках сплайн-функции. На рис.3 (кривые 2) приведены зависимость $\lambda(T)$ и величина C_v , найденные решением ОЗТ при одновременном использовании данных возмущенных значений $T_m(\tau)$ для испытаний N 1 и N 2. Было показано, что решение ОЗТ, полученное по данным любого одного из опытов N 1 или N 2 (рис.3, кривые 3,4), приводит к значительным ошибкам в температурах при решении ПЗТ N 1 или N 2 соответственно. Рассмотренным выше методом определены теплозащитная способность огнезащитного покрытия "Эндотерм ХТ-150" для стальных несущих строительных конструкций, а также огнезащитного покрытия "ОПВ-1" для стальных воздухопроводов систем вентиляции объектов Чернобыльской АЭС. В заключение следует

отметить, что предложенная выше методика увеличения точности решения ОЗТ за счет одновременного использования данных нескольких испытаний (в данном случае двух) рассматривается впервые (нам не известны литературные источники с использованием такой методики). Нам представляется, что реализация такой методики становится возможной на основе предложенного в работе подхода к решению ОЗТ, позволяющего "запускать" несколько независимых ПЗТ с различными условиями однозначности (в частности, геометрическими) и использовать результаты решения этих ПЗТ для решения общей ОЗТ.

Разработанная методика решения ОЗТ использовалась также для планирования эксперимента с целью определения условий конвективного теплообмена относительно коэффициента теплоотдачи α в условиях нестационарного теплообмена внешней поверхности цилиндрического образца потоком воздуха или водовоздушной смесью. Измеряется температура внешней поверхности предварительно разогретого до 800°C образца и температура охлаждающей среды. С помощью анализа чувствительности температуры поверхности образца, где расположен датчик, к величине α при различных значениях внутреннего радиуса образца (0 или 17 мм при внешнем радиусе 20 мм) и его теплофизических характеристиках λ и C_p были даны ответы на вопросы: каким лучше брать образец, - полым или сплошным и из какого материала его лучше изготовить, чтобы α определялось решением ОЗТ с максимальной точностью. Было показано, что для уровня исследуемых

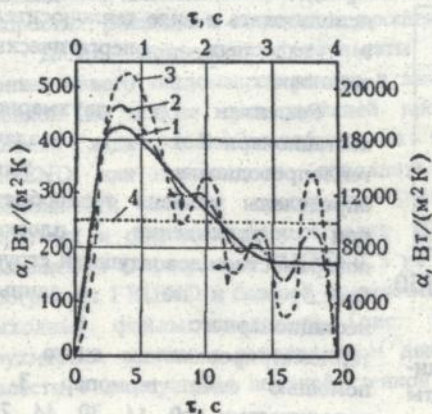


Рис.4 Зависимость коэффициента теплоотдачи от времени. Кривая 1- точная зависимость; 2,3 - зависимости, найденные решением ОЗТ для полого медного (кривая 2) и сплошного стального (кривая 3) образцов (нижняя и левая оси координат); 4 - $\alpha = \text{const}$, используемое для анализа чувствительности.

$\alpha=250$ Вт/(м² К) предпочтение следует отдать полому медному цилиндру, в случае уровня исследуемых $\alpha=10000$ - сплошному стальному. Сделанные выводы были подтверждены решениями методических ОЗТ (рис.5) по данным возмущенных на 3 и 6% значениям температур на поверхности цилиндра. Анализ кривых 2 и 3, полученных с 3%-м возмущением T_3 , показывает, что большей устойчивостью обладает решение с использованием полого по сравнению со сплошным цилиндрическим образцом (ошибка примерно вдвое меньше), что подтверждает сделанный ранее вывод. Решения ОЗТ с возмущением T_3 на 6% для уровня $\alpha = 0+425$ усиливает неустойчивость примерно вдвое. Относительные ошибки решения ОЗТ для уровня $\alpha = 0 +17000$ по сравнению с точной зависимостью $\alpha(\tau)$ примерно в 10 раз ниже, чем для уровня $\alpha = 0+425$. В этом случае лучшую идентифицируемость зависимости $\alpha(\tau)$ показал сплошной стальной цилиндр.

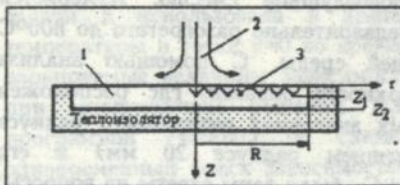


Рис.5 Схема взаимодействия охлаждающей струи с диском. 1 - стальной диск, 2 - водо-воздушная струя, 3 - теплоизоляция.

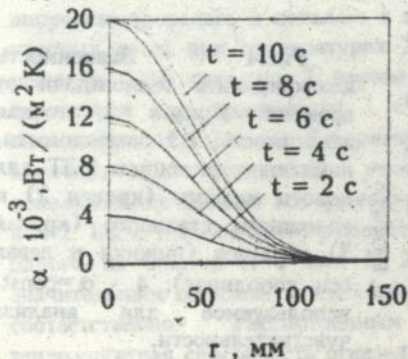


Рис 6 Зависимость коэффициента теплоотдачи от координаты для различных моментов времени.

Решением двухмерной стационарной задачи теплопроводности были определены условия теплообмена в полостях теплообменного аппарата с газообразным диссоциирующим теплоносителем (окислы азота N_2O_4), который предполагалось использовать в виде теплоносителя в ядерных энергетических установках.

Решением двухмерной нестационарной задачи теплопроводности были определены условия теплообмена при охлаждении плоской поверхности водовоздушной струей (рис.5) по данным нестационарного термометрирования диска с помощью семи термопар 3 с координатами $r=0, 14, 30, 44, 70,$

90 и 120 мм. Глубина заделки термопар от охлаждаемой поверхности составляла 2 мм. Диаметр стального диска составлял 300 мм., толщина - 30 мм. Двухмерная зависимость $\alpha(r,t)$ искалась в виде интерполяционных одномерных сплайн-функций третьего порядка для зависимости $\alpha(t)$ с тремя узлами по времени для четырех точек по радиусу на поверхности диска. Для решения тестовой задачи в качестве исходной зависимости для $\alpha(r,t)$ была выбрана следующая аналитическая зависимость (кривая Гаусса)

$$\alpha(r,t) = 2 \cdot 10^3 \cdot t \cdot \exp(-2.8 \cdot 10^{-4} \cdot r^2), \quad (11)$$

Зависимости $\alpha(r)$ для различных моментов времени приведены на рис. 6. Численным решением прямой задачи теплопроводности (вычислительный эксперимент) с законом (11) были рассчитаны температуры в указанных ранее семи точках. Решение обратной задачи с точными значениями температур дает зависимости $\alpha(r,t)$, совпадающие с точными (сплошные кривые на рис. 6). Пунктирные кривые на рис. 6 представляют решение обратной задачи по данным возмущенных на 10% экспериментальных данных, что показывает достаточную устойчивость рассмотренного метода и алгоритма решения ОЗ. Решение было получено на третьей итерации (начальные значения для вектора искомых параметров P в зависимости $\alpha(r,t)$ принимались равными $1 \cdot 10^3$).

Предложенная методика использовалась для обработки экспериментальных данных с целью исследования теплообмена при охлаждении плоской поверхности водовоздушной струей при различных скоростях, расходах и плотностях орошения струи.

Далее приведены результаты решения обратной задачи конвективного теплопереноса в замкнутой полости с движущейся стенкой на основе существующей программы PHOENICS решения прямых задач теплообмена и гидродинамики и программы FRIEND, как независимого дополнительного модуля, расширяющего возможности базовой программы PHOENICS в область решения обратных и оптимизационных задач. При этом никаких изменений и дополнений в программе PHOENICS не потребовалось. Взаимодействие программы FRIEND и базовой программы происходило через входные и выходные файлы последней (рис. 1). Известная в литературе двухмерная задача о вынужденном движении жидкости в замкнутой полости с движущейся верхней стенкой (в библиотеке тестовых задач

пакета PHOENICS названной SQCAVITY), ставилась следующим образом (рис.7). Скорость движущейся стенки $V_w=1$, температура $T_w=100$, температура остальных трех стенок равна нулю. Рассчитываются поля скоростей, давлений и температур в области решения с неравномерной сеткой. Для решения ОЗТ использовались точки $T_1=36.92$ и $T_2=14.87$. Решением ОЗТ определялись скорость V_w и температура T_w движущейся стенки по данным заданных температур T_1 и T_2 (рис.7). Начальные значения V и T задавались $V_0=2$, $T_0=200$. Решение такой обратной задачи было получено за три итерации. Была решена оптимизационная задача по определению такого значения температуры движущейся стенки T_w (при заданной скорости $V_w=1$), которое дает значения температур в некоторых четырех равноотстоящих

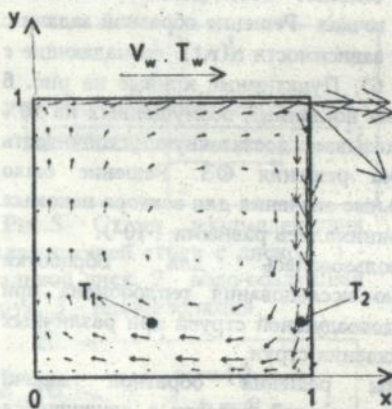


Рис. 7 Область решения двухмерной прямой и обратной задач тепломассопереноса в замкнутой полости. Точками отмечены места измерения температур, стрелками - обозначены направления результирующей скорости.

В конце главы показана возможность идентификации параметров в обобщенных критериальных тепломассообменных зависимостях на основе рассмотренного в работе метода. С помощью предлагаемой методики обрабатывались (обобщались) экспериментальные данные по

точках области решения, наиболее близкие к заданной оптимальной температуре $T_{opt}=50.0$. С помощью программного гандема PHOENICS-FRIEND была также решена трехмерная тестовая обратная задача теплопроводности по определению двух температур в противоположных углах равностороннего куба при заданных (из вычислительного эксперимента) температурах в некоторых двух его точках на гранях. Приведенные выше результаты тестовых задач показывают возможность эффективного решения обратных и оптимизационных задач тепломассообмена с помощью программы FRIEND на базе программы PHOENICS без каких либо изменений в последней.

теплообмену на выпуклой и вогнутой поверхностях лопаток сопловых аппаратов ГТД в виде уравнений подобия.

Четвертая глава посвящена решению трех практических обратных задач, связанных с оптимизацией параметров различных изделий и устройств.

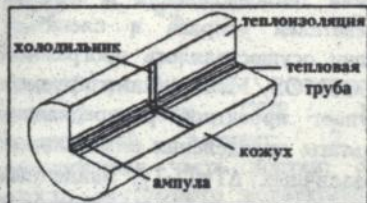


Рис.8. Общая схема печи
Зона между нагревателями

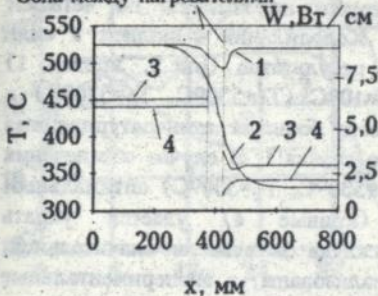


Рис.9 Зависимость температуры T (кривые 1,2) и мощности нагревателей W (кривые 3,4) вдоль оси печи для различных ΔT . Кривые 1,3- $\Delta T=10,^{\circ}\text{C}$; 2,4- $\Delta T=200,^{\circ}\text{C}$.

от внешнего кожуха охлаждается в окружающий воздух по законам естественной конвекции. Тепловое состояние печи со всеми конструктивными элементами моделировалось в двумерной осесимметричной постановке с помощью численного метода конечных элементов, реализованного в программе COSMOS/M. Задача оптимизации ставится как обратная задача теплопроводности по поиску такого закона тепловыделения W в нагревателях печи, который обеспечивает распределение температур T_M вдоль оси ампулы с

Рассматривается задача исследования тепловых режимов технологической печи для выращивания и очистки полупроводниковых кристаллов методом горизонтальной узкозонной плавки (метод Бриджмена) (рис.8), которая состоит из металлического кожуха теплоизоляции, двух коаксиальных тепловых труб, расположенных слева и справа от холодильника, выполненного в виде полой шайбы с центральным отверстием и каналом. Через всю печь и отверстие в холодильнике вдоль оси печи со скоростью 2-5 мм/час протягивается кварцевая ампула, заполненная исходным полупроводниковым материалом (в данном случае индий - сурьма). На тепловые трубы намотан электронагреватель, закон тепловыделения которого определяет уровень температур в объеме полупроводникового материала. Печь

полупроводниковым материалом, наиболее близкое (в смысле суммы квадратов их отклонений) к скачкообразному заданному распределению температур T_3 от некоторой температуры жидкого состояния материала T_1 до некоторой температуры твердого состояния T_2 . В качестве искоемых параметров выступали значения тепловыделений в секциях (общих или отдельных) двух нагревателей (справа и слева от холодильника). Решение обратной задачи осуществлялось программой FRIEND, объединенной с программой COSMOS/M. В минимизируемом критерии F в качестве T_3 выступает проектное распределение температур. На рис.9 приведены результаты определения оптимальных законов тепловыделения $W(x)$ для различных $\Delta T = T_1 - T_2$, найденных решением обратной задачи, для печи несколько другой конструкции. У этой печи вместо тепловой трубы справа от холодильника была установлена кварцевая (алундовая) труба, на которую по четырем секциям намотан электронагреватель. Холодильник выполнен в виде полого кольцевого канала. Анализ результатов (рис.9, кривая 1) показывает, что при обеспечении $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ ($T_1 = 530^\circ\text{C}$, $T_2 = 520^\circ\text{C}$) в такой реальной конструкции имеет место большая температурная яма "глубиной" около 25°C (больше самого скачка!). В случае обеспечения перепадов температуры $\Delta T = 200^\circ\text{C}$ ($T_1 = 530^\circ\text{C}$, $T_2 = 330^\circ\text{C}$) оптимальным выбором закона тепловыделения (кривые 4) удается убрать температурную яму, но ширина зоны скачка оказывается значительной. Предложенные законы $W(x)$ были реализованы, а экспериментальные измерения температур вблизи зоны кристаллизации оказались близкими к требуемым и расчетным.

В качестве второй задачи была решена задача численного моделирования и оптимизации термоэлектрического устройства охлаждения фотоэлектронного умножителя с целью достижения минимальных температур в зоне фотокатода умножителя. Задача теплопроводности решалась в двухмерной осесимметричной постановке с помощью метода конечных разностей. По данным эксперимента с помощью решения ОЗТ была проведена идентификация модели по параметрам эффективных теплопроводностей областей тепловыделения термобатарей. Дальнейшее исследование модели свелось к поиску оптимальных конструктивных изменений с целью выхода в заданный (-20°C) режим охлаждения фотокатода при максимально допустимой ($+50^\circ\text{C}$) температуре окружающей среды.

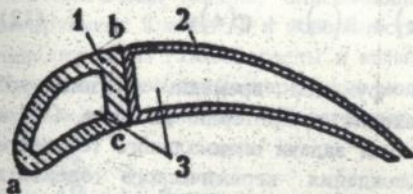


Рис.10 Сечение составной сопловой лопатки ГТД : 1 - керамический элемент; 2 - металлическая часть лопатки; 3 - полости внутреннего конвективного охлаждения.

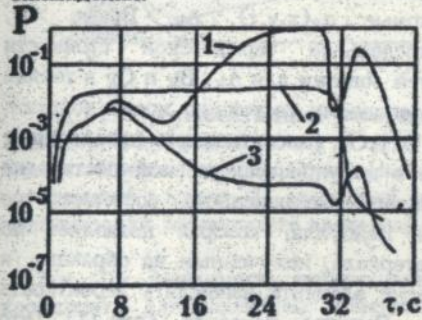


Рис.11 Зависимость вероятности быстрого разрушения керамического элемента от времени для различных законов изменения $\alpha_1(x, y, t)$. Кривая 1 - $\alpha_1 = 0$ (неохлаждаемый элемент), 2 - $\alpha_1 = \text{const} = 3000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$, 3 - $\alpha_1 = \alpha_1(x, y, t)$, - охлаждаемый по закону, найденным решением обратной задачи.

времени t является линейной функцией декартовых координат x, y, z . В рассматриваемом сечении керамического элемента (рис.10 - двухмерная постановка задачи) это условие для проектного (оптимального) распределения температур T_{II} имеет вид

Далее приведена постановка и решение задачи оптимального теплового проектирования внутреннего охлаждения керамического элемента лопатки ГТД (рис.10), оценка работоспособности которой проводилась по последующей расчетной схеме: 1 - расчет теплового состояния детали (в двухмерной постановке); 2 - расчет напряженного состояния детали; 3 - расчет вероятности быстрого разрушения керамической детали. Расчетные исследования термонапряженного состояния не охлаждаемых керамических лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) показали, что в реальных динамических тепловых условиях ее нагружения вероятность быстрого разрушения лопатки может приближаться к единице. Из теории термических напряжений известно, что напряжения в неравномерно нагретом нестесненном теле будут нулевыми, если температурное поле в этом теле $T(x, y, z, t)$ в течение всего

$$T(x, y, \tau) = A(\tau) + B(\tau)x + C(\tau)y, \quad (12)$$

где A , B , C - произвольные функции времени. Оптимальное распределение температур (12) входит в критерий качества (1) в качестве экспериментальных. Обратная задача оптимального теплового проектирования внутреннего охлаждения керамического элемента газотурбинной лопатки сводится к поиску таких зависимостей коэффициента теплоотдачи $\alpha_1(x, y, \tau)$ на внутренней охлаждаемой поверхности керамического элемента, которые минимизируют функцию (1). Прямая задача решалась методом конечных элементов с количеством элементов, равным 160, временных шагов - 80. Для решения поставленной ОЗТ использовался предложенный в работе метод с учетом ограничений на искомые $\alpha_1(x, y, \tau)$, A_k , B_k и C_k , соответствующие условиям предельной термической стойкости керамической и металлической частей лопатки для A_k , B_k и C_k в точках a, b, c (рис.10). По оптимальному тепловому состоянию носка лопатки, соответствующему оптимальным $\alpha_1(x, y, \tau)$, рассчитывалось напряженное состояние керамического элемента в полупространственной постановке И.А.Биргера с оценкой предельного напряженного состояния по статистической теории прочности Вейбулла, которая позволяет по характеристикам керамического материала, полученным на образцах, и распределению напряжений в объеме элемента вычислять вероятность его быстрого разрушения $P(\tau)$. Расчеты показали (рис.11), что реализация найденных решением ОЗТ коэффициентов $\alpha_1(x, y, \tau)$ позволяет снизить максимальную вероятность быстрого разрушения керамического элемента лопатки на $1.5 + 2$ порядка по сравнению с $\alpha_1 = \text{const}$.

Пятая глава посвящена постановке и решению задач прогнозирования процессов тепломассопереноса на основе решения обратных задач, в частности задачи построения математической модели и алгоритма прогноза высокотемпературной газовой коррозии (ВТГК) лопаток газовых турбин. Показаны актуальность этой проблемы и недостатки существующих сугубо эмпирических зависимостей, описывающих ВТГК, которые справедливы только для тех температурно-временных условий, для которых они были получены, и не могут быть использованы для прогноза коррозионных процессов при длительных временах эксплуатации деталей из исследуемых материалов. Предложена

математическая модель, описывающая процессы диффузии основных легирующих элементов к поверхности сплава, массоотдачу и диффузию окислителя из газовой среды и кинетику образования окисной пленки. Предложено основные параметры модели определять решением ОЗТ по данным краткосрочных лабораторных испытаний, что делает возможным



Рис.12. Пространственное распределение концентрации легирующего элемента (Me) и окислителя (Ox) в поверхностном слое жаростойкого сплава. Кривая 1 - свободный (не прореагировавший с окислителем) легирующий элемент; 2 - связанный легирующий элемент; 3 - суммарная концентрация легирующего элемента; 4 - концентрация окислителя.

Рис. 13. Зависимость концентрации легирующего элемента (C_T) от координаты для различных моментов времени в сплаве ЭИ607 после окисления при $T=900^\circ\text{C}$. Кривая 1 - 1000ч; 2 - 5000ч; 3 - 10000ч; \square - эксперимент, 1000ч

осуществление долгосрочных прогнозов кинетики роста окисной (коррозионной) пленки и последующей оценки ресурса работы ответственных деталей (в частности лопаток) ГТД. Физическая модель процессов диффузионного перераспределения легирующих элементов в поверхностном слое сплава и образования коррозионного (окисного) слоя (Рис.12) представляется диффузией легирующих элементов (Me), расходуемых на образование окисной фазы в направлении к границам x_1 и x_2 растущих во времени окисных слоев. Навстречу ему в противоположном направлении диффундирует окислитель (Ox), адсорбируемый на поверхности окисной пленки из газовой среды. При этом формируется окисный (коррозионный) слой из окислов этих

легирующих элементов, состоящий из зоны сплошной окисной пленки $x_0 < x < x_1$, зоны внутреннего окисления $x_1 < x < x_2$ и зоны обезлегирования основными легирующими элементами сплава $x_0 < x < x_1$. Рассмотренный физический процесс нестационарен, - границы x_0 , x_1 , x_2 , x_3 подвижны. Разработана математическая модель описанного выше процесса ВТГК, состоящая из уравнения диффузии легирующих элементов и уравнения диффузии окислителя. Процесс окисления учитывается стоками массы в обоих уравнениях, каждый из которых равен произведению концентраций легирующего элемента и окислителя на свой коэффициент поглощения. Соотношение между коэффициентами поглощения определяется соответствующим стехиометрическим соотношением между легирующим элементом и окислителем, идущими на образование окисла. Предложенная математическая модель и методика оценки массообменных параметров на основе решения ОЗТ были использованы для прогноза окислительного процесса образца из сплава ЭИ607, применительно для лопаток ГТД, при температуре 900°C до 10000 часов. На рис. 13 приведены распределения концентрации суммарного хрома C_{Me} для различных моментов времени. На рис. 14 приведены временные зависимости роста толщин зон сплошной окисной пленки x_1-x_0 , внутреннего окисления x_2-x_0 и обезлегирования x_3-x_0 . Прогноз был сделан при следующих значениях коэффициентов массообмена,

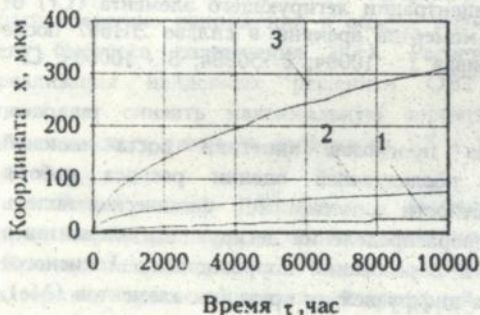


Рис. 14. Зависимость толщин зон сплошной окисной пленки (1), внутреннего окисления (2) и обезлегирования (3), от времени в сплаве ЭИ607 после окисления при $T=900^\circ\text{C}$.

найденных решением ОЗТ:
 $D_{Me} = 3 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$, $D_{Ox} = 1 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$, $k_{Me} = 0.6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/м}^3\cdot\text{с}$, $k_{Ox} = 0.3 \cdot 10^{-6} \text{ 1/м}^3\cdot\text{с}$, $\beta_{Ox} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$.

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений концентраций хрома для времени 1000 ч. показывает, что предложенная модель качественно и количественно описывает сложные диффузионные и окислительные процессы в поверхностном слое

рассматриваемого сплава. Разработанная модель и методический подход определения диффузионных и коррозионных характеристик на основе решения ОЗТ были использованы для оценки ресурса работы многослойных защитных покрытий типа СДП8-СДП11 на сплаве ЧС88ВИ лопатки ГТД при $T=900^{\circ}\text{C}$.

Решение ОЗТ с целью настройки моделей по параметрам играет важную роль в массообменных задачах фильтрации подземных вод промышленного и питьевого использования с целью прогнозирования и управления качеством этих вод на основе математического моделирования процессов фильтрации. Это особенно важно в задачах фильтрации с учетом миграции загрязнений с поверхности Земли или вытеснением пресных вод морскими при повышенных расходах водозабора. Для моделирования, прогнозирования и выработки оптимальных управляющих воздействий для многих "объектов" Украины с запасами подземных вод создаются так называемые постоянно действующие гидрогеологические модели. Эти модели есть не что иное, как гидрогеологические мониторинги. Рассмотренный в работе общий инженерный подход к решению ОЗТ был применен в таких моделях - мониторингах специалистами Института геологических наук НАН Украины на основе своих гидрогеологических программ решения прямых задач фильтрации и программы FRIEND. Рассмотрены постановки и результаты решения методических обратных задач фильтрации по определению коэффициентов инфильтрации и водопроницаемостей по данным измерений напоров в различных точках модели. Кратко рассмотрен пример использования решений ОЗ для практической задачи моделирования и прогнозирования геофильтрации подземных вод с целью управления их качеством на участке Инкерманского водозабора в Крыму, эксплуатирующего водоносный горизонт в долине реки Черной для водоснабжения г. Севастополя. При этом решением ОЗТ также определялись как инфильтрационные питания, так и водопроницаемости в различных блоках и зонах модели.

Рассмотрены роль и место обратных задач в системах технических и экологических мониторингов (Рис.15). Сделан вывод о том, что любой мониторинг, имеющий модели наблюдаемых процессов, не может нормально функционировать без рассмотренной (или ей подобной) программы идентификации параметров этих моделей.



Рис.15 Общая схема экологического мониторинга с отображением роли и места программы идентификации (типа программы FRIEND) параметров моделей мониторинга.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Обоснована необходимость и актуальность разработки общего инженерного подхода к решению обратных задач тепломассопереноса с целью обеспечения практической потребности инженеров в оперативном решении обратных задач на основе существующих программных средств решения разнообразных прямых задач тепломассопереноса.

2. Сформулированы требования, которым должен удовлетворять метод решения ОЗТ, используемый в таком подходе.

3. Разработаны принципы и схема построения общих инженерных программ решения обратных задач тепломассопереноса, реализующие идею создания независимого модуля решения ОЗ, способного взаимодействовать с независимыми программными модулями решения прямых задач тепломассопереноса. В качестве практического примера реализации подхода рассмотрена программа FRIEND, которая была исследована и использована при решении ряда обратных задач тепломассопереноса с независимыми программами решения ПЗТ, в том числе с широко распространенными в мире программами PHOENICS и COSMOS/M.

4. В качестве методического обеспечения такого подхода предложено использовать метод Ньютон-Гаусса и метод регуляризации А.Н.Тихонова для идентификации искомых параметров по данным экспериментальных измерений или проектных состояний.

5. Предложенный подход позволяет ставить и решать обратные задачи тепломассопереноса, используя данные нескольких экспериментов одновременно. Показана эффективность использования такого подхода к решению ОЗТ по определению теплофизических характеристик теплозащитных материалов при одновременном использовании данных двух испытаний.

6. На примере определения граничных условий теплообмена на поверхности цилиндра показана возможность повышения точности решения ОЗТ за счет оптимального выбора формы и теплофизических свойств этого цилиндра.

7. Определены граничные условия теплообмена в полостях теплообменного аппарата с диссоциирующим теплоносителем N_2O_4 .

8. На основе решения двухмерной нестационарной задачи теплопроводности разработана методика определения условий

теплообмена при охлаждении плоской поверхности водовоздушной струей.

9. На основе предложенного подхода показана возможность решения обратных задач конвективного теплопереноса, описываемых уравнениями Навье-Стокса, с помощью программы PHOENICS фирмы CHAM (Великобритания).

10. Решены ряд практически важных задач оптимального теплового проектирования, сформулированных как обратные задачи, по поиску:

- оптимальных законов тепловыделения в электронагревателях печи для выращивания полупроводниковых монокристаллов индий-сурьма (ОЗТ решались совместно с программой решения ПЗТ COSMOS/M фирмы SRAC, США);

- оптимальных законов охлаждения керамического элемента газотурбинной сопловой лопатки, позволяющих уменьшить вероятность ее быстрого разрушения вследствие термических напряжений;

- оптимальных конструктивных параметров термоэлектрического устройства охлаждения фотоэлектронного умножителя.

11. Разработаны математическая модель и предложен алгоритм (основанный на решении ОЗТ) прогноза высокотемпературной газовой коррозии лопаток газовых турбин.

12. Показана возможность и эффективность использования предложенного подхода решения ОЗТ для идентификации параметров массопереноса в моделях фильтрации с целью прогнозирования и управления качеством подземных вод.

13. Рассмотрены роль и место обратных задач теплопереноса в системах технических и экологических мониторингов.

Предложенный общий инженерный подход к решению обратных задач дает инженерам возможность практического решения разнообразных ОЗТ с использованием имеющихся у них компьютерных программных средств решения прямых задач теплопереноса. В рамках предлагаемого подхода могут быть использованы другие экстремальные методы решения ОЗТ, отвечающие требованиям этого подхода. Разработанный подход внедрен в виде программно-методических разработок в ряде организаций и учреждений. Широкое использование рассмотренного подхода к решению обратных задач позволяет расширять возможности многих популярных программ решения прямых задач теплопереноса, что должно способствовать научно-техническому прогрессу.

Основные публикации автора по теме диссертации.

1. Коздоба Л.А., Круковский П.Г. Методы решения обратных задач теплопереноса. -К.: Наукова думка, 1982, - 360 с.
2. Круковский П.Г. Численные методы решения обратных задач теплопроводности в идентификации параметров тепловых объектов. // System Analysis and Simulation 1980. Proceedings of the International Symposium held at Berlin (GDR) September 1-5, 1980, Akademie-Verlag; Berlin, 1980, pp. 336-341.
3. Кищенко Т.А., Круковский П.Г. Автоматизированная система идентификации теплофизических параметров объектов на основе решения ОЗТ. // Инж.-физ. журн., т.45, N5, 1983, - с. 825-828.
4. Круковский П.Г. Определение граничных условий теплообмена для тонкой пластины с тепловыделением. // Пром. теплотехника, 1983, 5, N2, - с. 22-25.
5. Круковский П.Г. Идентификация параметров некоторых тепловых объектов. // В кн. Моделирование систем - 83. Труды Меж. конф., Прага, 5-7 июля 1983г., доклад N645, - 5 с.
6. Круковский П.Г., Соколов В.А. Методика и результаты численного исследования температурных полей в теплообменном аппарате. // В кн. Проблемы нелинейной электротехники. Тез. докладов II Всесоюзной научно-технической конференции, ч. 3, Киев, 1984, - с. 85-86.
7. Титов А.В., Круковский П.Г., Товстоног В.А., Тырсин П.В. Определение теплофизических характеристик графитовых материалов методами обратных задач теплопроводности с использованием радиационного нагрева. // В кн. Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. 1985г. - М.: Наука, 1986, - с. 164.
8. Круковский П.Г. Численное решение многомерных прямых и обратных задач теплопроводности. // В сб. Математические модели, аналитические и численные методы в теории переноса. Материалы межд. школы-семинара, ч. 1, Минск, Ин-т тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова АН БССР, 1986, - с. 94-99.
9. Круковский П.Г. Численное решение двухмерной обратной задачи теплопроводности. // Пром. теплотехника, 1988, т.10, N3, - с. 32-36.
10. Круковский П.Г., Халатов А.А. Математическое моделирование теплового состояния электронной системы "телевизионная камера -

- аккумулятор холода". // В кн. Тепло- и массообмен в технологии и эксплуатации электронных и микросистемных систем. Материалы междушколы-семинара, ч.1, Минск, ИТМО АН БССР, 1989, - с. 31-35.
11. Круковский П.Г., Ахмедзянова Д.М. Численное моделирование теплового состояния объектов сложной формы. // Пром. теплотехника, 1989, т. 11, N4, - с. 41-47.
 12. Халатов А.А., Круковский П.Г., Михайлюк С.И. Оптимальное тепловое проектирование внутреннего охлаждения керамического элемента газотурбинной лопатки. // Доклады АН УССР, сер. А, 1990, N12, - с. 62-65.
 13. Круковский П.Г., Халатов А.А., Флока В.Ф. Планирование одного теплофизического эксперимента на основе параметрического анализа чувствительности его модели. // Пром. теплотехника, 1991, том 13, N 2, - с. 100 - 104.
 14. Круковский П.Г., Халатов А.А., Сысков Л.В. Методика определения параметров математических обобщений экспериментальных данных по конвективному теплообмену. // Пром. теплотехника, 1991, том 13, N 3, - с. 61 - 64.
 15. Гецов Л.Б., Рыбников А.И., Круковский П.Г., Рабинович А.А. Методика расчета долговечности многослойных покрытий с внешним керамическим слоем. // Физикохимическая механика материалов, т.27, N3, 1991, - с. 7-21.
 16. Исаев К.Б., Круковский П.Г. Исследование теплопроводности коксуемых полимерных материалов решением обратных задач. // В кн. Некорректно поставленные задачи в естественных науках. Тез. докл. междушколы-семинара, - М.: Изд-во ИПМ им. М.В.Келдыша АН СССР, 1991, - с. 153.
 17. Гецов Л.Б., Рыбников А.И., Круковский П.Г., Рабинович А.А. Методика расчетного определения коррозионной долговечности многослойных покрытий на лопатках газотурбинных двигателей. // В кн. Обеспечение коррозионной надежности лопаток газовых турбин, вып. 530, С.-Петербург: Судостроение, 1992, - с. 44-52.
 18. Круковский П.Г., Лисовский А.В. Численное моделирование термоэлектрического устройства охлаждения фотоэлектронного умножителя (тепловой анализ и оптимизация). // Пром. теплотехника, 1992, т.14, N 4 - 6, - с. 38 - 43.

19. Круковский П.Г., Гецов Л.Б., Рыбников А.И. Прогнозирование процессов обезлегирирования поверхностного слоя лопаток газотурбинных двигателей в условиях длительной эксплуатации. // В кн. Обеспечение коррозионной надежности лопаток газовых турбин, вып. 530, С.-Петербург: Судостроение, 1992, - с. 52-57.
20. Круковский П.Г., Петрова Е.А. Методика и программа решения обратных задач теплообмена, совместимая с программами решения прямых задач пользователя. // В кн. Теплообмен - ММФ - 92. Труды II Минского международного форума, Минск: АНК "ИТМО им. А.В.Лыкова" АНБ, 1992, т. IX, ч. 1, - с. 120 - 123.
21. Круковский П.Г., Михайлюк С.И. Расчетная оптимизация термонапряженного состояния керамических элементов двигателей. // В кн. Теплообмен - ММФ - 92. Труды II Минского международного форума, Минск: АНК "ИТМО им. А.В.Лыкова" АНБ, 1992, т. IX, ч. 2, - с. 96 - 103.
22. Круковский П.Г. Методика и программа идентификации произвольных параметров, совместимая с пользовательскими программами моделирования задач промышленной экологии и безопасности. // В кн. Проблемы промышленной экологии и безопасности. Материалы конференции, : МП "Диада", Севастополь, 1993, - с. 48-49.
23. Круковский П.Г. Программа идентификации параметров математических моделей, как составная часть системы экологического мониторинга. // В кн. Проблемы экологического мониторинга и охраны труда. Матер. Межд. научн.-технич. конфер., Севастополь, 1993, - с. 84-86.
24. Круковский П.Г., Новак С.В. Методы обратных задач теплообмена в определении огнестойкости объектов и параметров возгорания материалов. // В кн. Проблемы экологического мониторинга и охраны труда. Матер. Межд. научн.-технич. конфер., Севастополь, 1993, - с.69-70.
25. Круковский П.Г. Обратные задачи как составная часть компьютерных технологий прогноза изменения состава и ресурса подземных вод. // В кн. Оценка ресурсов подземных вод в условиях техногенеза. Тез. докладов конфер., Киев, 1993, - с.43-44.
26. Круковский П.Г. Универсальный программно-методический подход к решению обратных задач теплопереноса (программа

- FRIEND). // В кн. Идентификация динамических систем и обратные задачи. Труды II Межд. конф., С.-Петербург, 1994, т. 1, - с. А.8.1 - А.8.12.
27. Круковский П.Г., Гецов Л.Б., Картавова Е.С., Рыбников А.И. Идентификация параметров теплообмена в моделях прогноза высокотемпературной диффузии и газовой коррозии лопаток ГТУ. // В кн. Идентификация динамических систем и обратные задачи. Труды II Межд. конф., С.-Петербург, 1994, - т. 2, - с. D.8.1-D.8.12.
 28. Новак С.В., Харченко И.А., Хмельницкий В.В., Круковский П.Г. Применение методов обратных задач теплообмена для решения задач пожарной безопасности". // В кн. Идентификация динамических систем и обратные задачи. Труды II Межд. конф., С.-Петербург, 1994, т. 2, - с. D.9. 1-D.9.10.
 29. Гецов Л.Б., Рыбников А.И., Круковский П.Г. Изменение поверхностного состава жаропрочных сплавов при окислении. // Защита металлов, 1995, т.31, N 4, - с. 376-381.
 30. Гецов Л.Б., Круковский П.Г. Комплексный метод расчета высокотемпературной газовой коррозии деталей и узлов ГТУ. // Тяжелое машиностроение, 1995, N9, - с.2-5.
 31. Новак С.В., Харченко И.А., Круковский П.Г. Оптимизация параметров огнестойких конструкций методами математического моделирования процессов теплообмена. // В кн. Пожарная безопасность-95. Мат-лы XIII Всероссийской научн.-практ. конф., М.: ВНИИПО МВД России, 1995, - с. 246-248.
 32. Новак С.В., Харченко И.А., Хмельницкий В.В., Круковский П.Г. Математическое моделирование тепловых процессов в решении задач пожарной безопасности. // В кн. Проблеми пожежної безпеки, Київ: МВС України, 1995, - с.349-351.
 33. Krookovsky P.G. Numerical simulation of thermal state of some thermal systems. // System analysis and simulation 1985, Proc. of the Int. Symp., Akademic Verlag, Berlin, 1985, pp. 314-317.
 34. Krookovsky P.G. Heat transfer process numerical modeling in some technological system, European Congress on Simulation. Late submission, 1987, Prague, September 21-25, 1987, Inst. of Computer Science Czechoslovak Academy of Sciences, pp. 102-109.
 35. Getsov L.B., Rybnikov A., Krukovski P.G., Kartavova E.S. De-alloying and fatigue of high-temperature alloys used for gas turbine blades. // Materials for Advanced Power Engineering 1994.

- Abstracts of Fifth International Conference, 3-6 October 1994, Liege, Belgium. 1994, p. 44.
36. Krukovsky P.G. Program of parametric identification of mathematical model of heat and mass transfer as a part of thermo-CAD and control-measuring system. // Proc. of 9th Int. Conf. on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO), 14-16 June, 1995, Abstracts., Budapest, Hungary, 1995, pp. 339-343.
 37. Krukovsky P.G. A universal approach to solution of inverse heat transfer problems (method and software). // Proc. of the 30th (1995) National Heat Transfer Conf. New York, ASME (United Eng. Center), 1995, Vol.10 (HTD-Vol.312), pp. 107-112.
 38. Krukovsky P.G., Kartavova E.S., Getsov L.B., Rybnikov A.I., Rabinovich A.A. The model of high temperature diffusion and gas corrosion of gas turbine blade // Materials ageing and component life extension, Proc. of Int. Symp., Italy, Milan, October, 1995, vol.1, pp. 765-773.
 39. Novak S.V, Kharchenko I.A., Krukovsky P.G. Design and experimental method of determination of fireproofing capability of metallic construction coatings according to the thermometric data obtained during fire-duration tests // 9th International conference on thermal engineering and thermogrammetry (Thermo). Budapest, 1995, - pp. 285- 289.
 40. Prisjagnjuk L.A., Kharchenko I.A, Novak S.V., Krukovsky P.G. Methodological Approaches to Optimization of Fire-Resistant Constructions Parameters. // Bezpieczenstwo Pozarowe Budowli. I Miedzynarodowa Konferencja, 21-22.11.1995, Spala, Warszawa, 1995, pp. 189-200.
 41. Rybnikov A.I., Getsov L.B., Krukovski P.G. Damage modeling and life prediction for high temperature coating with ceramic layer. // Materials ageing and component life extension, Proc of an Int. Symp., Italy, Milan, October, 1995, vol.1, pp. 1163-1173.

АННОТАЦІЯ

Krukovsky P.G. Investigation, prediction and optimization of heat-mass transfer processes on the base of general engineering approach to solution of inverse problems. The thesis is submitted for Doctor's degree in Engineering (specialization 05.14.06 - Engineering Thermophysics), Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1996.

An approach to solution of inverse heat-mass transfer problems which allows to use existing models and computer programs for solution of direct problems of heat-mass transfer is proposed, investigated and made in this work. Some practical inverse problems for determination of thermophysical properties of heat protected materials and heat transfer conditions between flows and solid wall were solved as well as some optimization problems formulated as inverse problems. A model and technique (based on solution of inverse problems) for prediction of high temperatures gas corrosion of turbine blade were proposed.

Круковский П.Г. Исследование, прогнозирование и оптимизация процессов теплопереноса на основе общего инженерного подхода к решению обратных задач. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук (специальность 05.14.06 - Техническая теплофизика), Институт технической теплофизики НАН Украины, г.Киев, 1996г.

В работе предложен, исследован и реализован подход к решению обратных задач теплопереноса, позволяющий использовать существующие модели и программы решения прямых задач теплопереноса. Решены ряд практических обратных задач по определению теплофизических свойств теплозащитных материалов и условий теплообмена между потоками и стенкой. Решены ряд задач оптимизации, сформулированные как обратные задачи. Предложена модель и алгоритм (основанный на решении обратных задач) для прогноза высокотемпературной газовой коррозии лопаток газовых турбин.

Ключові слова: Обернена задача, пряма задача, теплоперенос, математичне моделювання, оптимізація, прогнозування.

Подписано к печати 26.04.1996г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл.-печ.лист.2,0 Уч.-изд.лист 2,0.
Тираж 100. Заказ 185.

Полиграф. уч-к Институту электродинамики НАН Украины
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

АННОУАЦІЇ

Климовський П.Г. Investigation, prediction and optimization of heat-mass transfer processes on the base of general engineering approach to solution of inverse problems. The thesis is submitted for Doctor's degree in Engineering (specialization 05.14.06 - Engineering Thermophysics), Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine. Kiev, 1996.

An approach to solution of inverse heat-mass transfer problems which allows to use existing models and computer programs for solution of direct problems of heat-mass transfer is proposed, investigated and made in this work. Some practical inverse problems for determination of thermophysical properties of heat protected materials and heat transfer conditions between flows and solid wall were solved as well as some optimization problems formulated as inverse problems. A model and technique (based on solution of inverse problems) for prediction of high temperatures gas corrosion of turbine blade were proposed.

Климовський П.Г. Исследование, прогнозирование и оптимизация процессов тепло-массопереноса на основе общего инженерного подхода к решению обратных задач. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук (специальность 05.14.06 - Техническая теплофизика), Институт технической теплофизики НАН Украины, г.Киев, 1996г.

В работе предложено, исследовано и оптимизовано подход к решению обратных задач тепло-массопереноса на основе общего инженерного подхода к решению прямых задач. Рассмотрены некоторые практические обратные задачи для определения термодинамических свойств теплозащитных материалов и условий теплообмена между течениями и твердыми телами. Предложена модель и алгоритм (на основе решения обратных задач) для прогнозирования высокотемпературной коррозии лопатки турбины.

Климовський П.Г. Исследование, прогнозирование и оптимизация процессов тепло-массопереноса на основе общего инженерного подхода к решению обратных задач. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук (специальность 05.14.06 - Техническая теплофизика), Институт технической теплофизики НАН Украины, г.Киев, 1996г.

AB3H.TOT

444817

AB 34.707

AB 34.707