

На правах рукописи

МАРКИН АЛЕКСАНДР ДМИТРИЕВИЧ

Развитие научных основ и разработка эффективных методов и средств идентификации технологических процессов черной металлургии.

Специальность 05.16.02 -
"МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



00778438 (.)

Робота являється рукописом

Робота виконана в Донецькому
університеті.

Офіційні опісники -

Нумілов Кирило Андрійович, докт. техн. наук, проф.;

Гуцковський Вадим Іванович, докт. техн. наук, проф.;

Андронов Валерій Іванович, докт. техн. наук, проф.;

Рожков Ігорь Михайлович, д. т. н., проф.;

Ведуче підприємство -

Металургійський комбінат "Азовсталь", г. Маріуполь

Захита состоится "24" ноября 1994 г. в 12 час.
на засіданні спеціалізованого совета Д 068.20.01 в
в Донецькому державному технічному університеті по адресу:
340000, г. Донецьк, ул. Артема, 58

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці університета

Автореферат розіслан "21" октября 1994 г.

Учений секретарь
спеціалізованого совета,
докт. техн. наук, профессор

В.С. Сапіро

Донецький державний технічний університет, 1994

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из важнейших задач развития всех отраслей промышленности любого государства является задача экономного и эффективного использования энергоресурсов. Решение этой задачи становится особенно важным в производствах, технология которых требует обеспечения тепловых нагрузок высокого уровня, что, в первую очередь, относится к теплоиспользующим, теплоэнергетическим и огнетехническим установкам большой мощности в энергетике, черной и цветной металлургии и др.

Решение задачи повышения эффективности промышленности и экономичного использования энергоресурсов предусматривает:

- реконструкция существующих промышленных агрегатов;
- интенсификацию технологических процессов на базе более эффективного использования промышленного оборудования;
- исследование новых технологических процессов и создание на их основе высокоэффективных производств.

В настоящее время решение любой из задач невозможно без тщательного исследования технологии использования тепла в общем технологическом процессе полного цикла (до выпуска готового изделия) и построения на этой основе математических моделей объектов исследования, позволяющих их эффективное использование в условиях производства. Интенсивное развитие методов построения моделей привело к развитию самостоятельного направления в общей теории управления - идентификации объектов управления.

Широкое применение методов построения моделей в теории и практике исследования теплообменных процессов предполагает наличие достоверной информации об их параметрах (краевых условиях, теплофизических характеристиках и т.д.). Отсутствие такой информации во многих случаях приводит к необходимости решать задачу идентификации этих параметров по ограниченным данным о температурном поле исследуемого объекта, т.е. решать обратную задачу теплопроводности, которая в ряде случаев является единственным источником получения сведений о неизвестных параметрах теплообмена.

В связи с этим практика исследования теплообменных процессов, моделирования и теплового проектирования теплоиспользующих, теплоэнергетических, теплонагруженных агрегатов и др. потребовала разра-

ботки методов и средств диагностики, построенных на новых принципах — принципах анализа обратных задач нестационарного теплообмена. Работы О.М.Алифанова, Д.Ф.Симбирского, В.М.Мацевитого, О.А.Герашенко, Л.А.Коздоби, Н.А.Яршвева, А.Г.Темкина, Ю.В.Полежаева, являясь методической основой приложения этих принципов к разработке методов нестационарной тепловой диагностики, дали толчок к появлению довольно большого числа работ в этой области.

Итоги Всесоюзных семинаров, посвященных обратным задачам теплообмена, (Москва), Всесоюзных совещаний по тепло- и массообмену (Минск), Всесоюзных конференций по методам и средствам диагностики газотурбинных двигателей и их элементов (Харьков), по динамике тепловых процессов (Киев) и др. подтвердили все возрастающий интерес к разработке методов тепловой диагностики теплообменных процессов, построенных на новых принципах.

Несмотря на определенные успехи методологического плана в разработке этих вопросов, следует отметить недостаточное исследование направления, связанного с разработкой методов и средств диагностики, позволяющих их непосредственное использование при практической реализации теплотехнологических процессов черной металлургии.

Это прежде всего относится :

- к разработке эффективных методов идентификации теплотехнологических процессов для неоднородных пространственных систем с переменными коэффициентами переноса в условиях сложного радиационно-конвективного теплообмена в промышленных печах,
- к разработке методов, средств контроля и управления теплотехнологическими процессами в "реальном" времени,
- к разработке методов алгоритмизации для ЭВМ нелинейных математических моделей теплообменных процессов, распространенных в черной металлургии.

Цель работ

Развитие научных основ и установление новых форм зависимостей теории идентификации теплотехнологических процессов черной металлургии, позволяющих прогнозирование и оптимизацию параметров технологических систем и режимов их эксплуатации, и на этой основе разработка и внедрение новых эффективных методов и средств диагностики теплотехнологических процессов.

Идея работы

Использование разработанных принципов идентификации параметров теплотехнологических процессов методом возмущений и новой формы решения уравнения Фурье для формирования нового подхода к тепловой диагностике в черной металлургии.

Научная новизна

1. В дальнейшем развитии основ теории идентификации:

а/ впервые разработан метод диагностики радиационно - конвективного теплообмена в промышленных печах, базирующийся на новых принципах регуляризации многомерных нелинейных обратных задач теплопроводности методом малого параметра и позволяющий стандартизовать процедуру использования ЗЕМ,

б/ впервые разработаны и исследованы улучшенные методы алгоритмизации нелинейных многомерных математических моделей переноса тепла и массы применительно к ЗЕМ, построенные на новом классе многопараметрических интегро - итерационных разностных схем, позволяющих улучшить характеристики сходимости и устойчивости получаемого решения,

в/ разработанная методика регуляризации вариационной обратной задачи теплопроводности (ОВТ) позволила свести решение к обычной краевой задаче.

2. В разработке эффективных методов диагностики ТТФ черной металлургии и средств их реализующих, в основе которых новая форма решения уравнения Фурье, позволяющих исследование нестационарных процессов.

3. В разработке методов и средств определения теплофизических характеристик для исследований в условиях теплотехнологического процесса.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена результатами математического моделирования с использованием ЭЦМ и АВМ и их сравнения для некоторых модельных задач с известными аналитическими и численными решениями, результатами физического моделирования на экспериментальных стендах Донецкого политехнического института, Института технической теплофизики АН УССР, Института ядерных исследований им. Б.Кидрича (ОФЯ), результатами промышленных исследований на Донецком металлургическом заводе им. В.И.Ленина, на Макеевском металлургическом комбинате им.

С.М.Кирова, на Мариупольском металлургическом комбинате "Азовсталь", Нижне-Тагильском металлургическом комбинате.

Практическое значение и реализация результатов работы

Внедрены и в различное время использовались с положительным эффектом следующие разработки и рекомендации настоящей диссертации:

1. На Донецком металлургическом заводе

-при исследованиях теплообмена в методических печах листопрокатного цеха и определении коэффициентов несимметричности нагрева по всему тракту печей 1,2 и 3, позволивших провести конкретные мероприятия по усовершенствованию тепловой работы печей (регулировка горелок, устранение подсосов холодного воздуха и т.д.)

-при исследовании теплообмена в режиме наладки печи с шагающими балками для термообработки заготовок, отлитых на машине непрерывного литья (МНЛЗ), позволивших разработать экономичные режимы работы для камеры регламентированного охлаждения.

2. На металлургическом комбинате "Азовсталь"

-при исследованиях параметров несимметричности нагрева стального листа в проходной роликовой печи стана "3600".

3. На Нижне-Тагильском металлургическом заводе

-при диагностике состояния футеровки металлоприемника доменной печи, позволяющей получить оперативную информацию о разгаре футеровочных блоков (компьютерная диагностика).

4. На Мариупольском металлургическом комбинате им.Ильича

-при контроле и управлении режимом охлаждения агломерата, позволившем улучшить эксплуатационные характеристики транспортных систем;

-при контроле и управлении теплотехнологическим процессом "дресировки" листа, обеспечившем повышение его качества.

5. В Институте технической теплофизики АН Украины, Киев

-при контроле тепловых режимов имитатора инфракрасного излучения при его тепловакуумных испытаниях.

6. При исследовании тепловых излучений при выпуске стали в мартеновских цехах металлургических заводов Донецкого региона, позволивших определить уровни тепловых нагрузок на рабочих.

7. В Институте ядерных исследований им. Бориса Кидрича (г. Белград, СФРЮ)

- при исследовании теплофизических характеристик твердых тел (ТФХ)

8. На Макевском металлургическом комбинате

- при исследовании теплопроводности рудугольных заготовок в процессе прямого восстановления железа.

Общий экономический эффект за счет внедрения разработок с участием автора превышает I 200 000 руб. (в ценах 1990 г.).

А п р о б а ц и я р а б о т ы.

Результаты работы докладывались:

на Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену в г. Минске (1972);

на Всесоюзной конференции по методам и средствам диагностики газотурбинных двигателей и их элементов в г. Харькове (1980);

на Всесоюзных семинарах по обратным задачам теплопроводности в г. Москве (1974, 1976, 1982, 1986),

на Всесоюзной конференции по вопросам совершенствования тепловой работы и конструкций металлургических печей в г. Днепропетровске (1980);

на Всесоюзной конференции по проблемам энергетики теплотехнологий в г. Москве (1983);

на Всесоюзной конференции по динамике тепловых процессов в г. Киеве (1980);

на Всесоюзной конференции по теплофизике технологических процессов в г. Ташкенте (1984);

на Всесоюзной конференции "Интенсификация процессов термической и химико-термической обработки металлов" в г. Челябинске (1984);

на Всесоюзном семинаре по обратным задачам теплопроводности в г. Уфе (1984);

на Международной конференции в г. Тршинец, ЧССР (1977) по теплотехнике и автоматизации нагревательных печей;

на XXVI Югославской конференции ЭТАН в г. Суботица (1982) по вопросам автоматизации тепловых процессов;

на Международной конференции в г. Пловдив, Болгария (1990) по автоматизации тепловых процессов;

на 2-й Международной конференции "Идентификация динамических систем и обратные задачи", г.Петербург (1994);

неоднократно на заседаниях секции "Теплотехнические свойства веществ" Научного Совета по проблемам "Теплофизики" Госкомитета по науке и технике СССР;

на семинарах Московского авиационного института.

Основное содержание диссертации опубликовано в 40 работах (из них 6 - в СФРГ и ЧССР). Новизна разработанных устройств подтверждена 11 авторскими свидетельствами на изобретения.

Объем рукописи. Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Общий объем составляет 336 страниц, в том числе: основной текст 234 страницы, 133 рисунка и 10 - таблиц, список литературы. - 136 л.

При непосредственном творческом участии автора (и его руководстве) спланированы и выполнены 9 госбюджетных и козловых работ, которые получили практическое внедрение. Личный вклад автора заключается в самостоятельном развитии всех принципиальных решений, и непосредственном участии в детальной разработке и внедрении изобретений, реализующих теоретические исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Развитие современной техники, проектирование и создание сложных технологических систем и оборудования выдвинули ряд качественно новых задач, связанных с контролем, управлением и оптимизацией теплотехнологических процессов (ТП). Из всего многообразия технологических процессов, существующих в современном производстве, следует особо отметить те, в которых оказывается необходимым изменение температурных режимов одного или нескольких элементов системы, определяющих данный процесс. В последнее время в теоретических и экспериментальных исследованиях такого рода процессов интенсивно развивается направление, связанное с использованием методов построения моделей (идентификацией параметров ТП как объекта управления).

В работах Азифанова О.М., Мацевитого Ю.М., Бутковского А.Г., Коздоба Л.А. и др. подробно рассмотрен комплекс вопросов, определяющий в целом проблему идентификации тепловых процессов, начиная с терминологии и классификации задач.

Используя установившиеся определения, отметим, что рассматривая ТП как объект управления, в общем можно выделить две задачи управления — прямую и обратную. Решение прямой задачи определяет поведение управляемой системы при заданном управляющем воздействии, а решение обратной — такое управление, которое реализует необходимое изменение параметров объекта в интересующем временном интервале. Нахождение такого управления (в форме краевых условий, теплофизических характеристик и т.д.) по ограниченным данным о самом объекте методами решения обратных задач и является целью идентификации ТП.

Получение информации о ТП в черной металлургии связано с постановкой экспериментальных исследований, в которых наиболее распространенной контролируемой характеристикой является температура. Следует отметить, что во многих случаях параметром, определяющим ТП, является тепловая нагрузка на тот или иной конструктивный элемент. Например, различные охлаждаемые элементы, в основе расчета которых — тепловая нагрузка на систему охлаждения. Получение информации о тепловой нагрузке на исследуемый объект позволяет учесть ее неравномерность в рабочем пространстве агрегата, определить и проанализировать изменение ряда других параметров, определяющих теплообмен: локального и интегрального коэффициента теплоотдачи, приведенной степени черноты системы тел, участвующих в теплообмене и др. Анализ практики исследований ТП черной металлургии показал фактическое отсутствие как аппаратного, так и методического обеспечения проблемы контроля тепловых нагрузок особенно в условиях высокоинтенсивных тепловых процессов и позволил сформулировать вопросы, которые явились предметом исследований, положенных в основу настоящей диссертации.

Это прежде всего относится :

— к разработке эффективных методов идентификации теплотехнологических процессов для неоднородных пространственных систем с переменными коэффициентами переноса в условиях сложного радиационно-конвективного теплообмена в промышленных печах,

— к разработке методов, средств контроля и управления тепло-

технологическими процессами в "реальном" времени.

- к разработке методов алгоритмизации для ЭВМ нелинейных математических моделей теплообменных процессов, распространенных в черной металлургии.

2. ИНТЕГРО-ИТЕРАЦИОННЫЕ РАЗНОСТНЫЕ СХЕМЫ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ.

Первый этап анализа тепломассообмена в технологических системах черной металлургии позволяет выделить основные процессы, особенности их технологической реализации и динамической взаимосвязи, а также выделить наиболее характерные структуры математической модели тепломассообмена в ТТП. Не менее важным представляется выделение характерных структур и их детальное исследование на втором этапе анализа процессов тепломассообмена в ТТП черной металлургии - этапе выбора метода решения и алгоритмизации взаимосвязанных задач тепломассообмена применительно к вычислительным машинам. В практике исследования нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами (особенно многомерных) приходится часто сталкиваться с появлением неустойчивости или плохой сходимости получаемого решения при использовании хорошо исследованных на линейных задачах разностных схем. Это становится особенно важным при исследовании некорректно поставленных задач, к которым в большинстве и относятся задачи идентификации характеристик тепловых процессов /см. многочисленные работы Самарского А.А., Коздобы Л.А., Алифанова О.М. и др./. Применяемая в том или ином виде регуляризация некорректно поставленных задач дает возможность решать условно-корректную задачу, которая приближенно описывает исходную постановку. В этом случае искомое решение определяется решением одной или нескольких прямых задач (ПЗ), получаемых с помощью любых известных методов. Широко используются для этой цели разностные схемы предполагают различные варианты учета нелинейности в математической постановке задач. Наибольшее распространение получили варианты с расчетом нелинейных функций по предыдущему временному слою, с итерационным пересчетом нелинейных функций на текущем временном слое и нахождением неявно заданных функций каким-либо специальным методом (например, итерационным методом Ньютона).

Применение первого варианта без потери точности получаемого решения возможно при слабых нелинейностях, второй вариант (наиболее часто используемый на практике) при существенных нелинейностях приводит к большому числу итераций, уменьшению шага по временной координате и, как следствие, увеличению необходимого на реализацию задачи машинного времени. Третий вариант используется значительно реже - практически только в задачах с внешней нелинейностью (например, на границах - теплообмен излучением). В задачах с внутренней нелинейностью его применение достаточно сложно и приводит к громоздким алгоритмам. Учитывая отмеченные особенности использования известных методов для исследования нелинейных задач математической физики, в диссертации рассмотрены основные принципы построения нового семейства интегро-итерационных разностных схем, позволяющих в ряде практических случаев ускорить сходимость итерационного процесса и расширить диапазон получения устойчивого решения.

В основе построения нового семейства разностных схем-интегро-дифференциальное уравнение /43/

$$A u(\tau) + \frac{1}{\Delta\tau} \int_{\tau_1}^{\tau_2} [f^{[n-1]} - f] d\tau = f^{[n-1]}(u, \tau), \quad (1)$$

позволяющее организовать поиск приближенного решения уравнения типа

$$A u(\tau) = f(u, \tau), \quad (2)$$

где A - дифференциальный оператор;

$u(\tau)$ - функция состояния некоторого процесса, описываемого уравнением (2);

$f(u, \tau)$ - нелинейная функция, в общем случае может содержать и интегро-дифференциальные операторы от других переменных;

τ - переменная, например, время;

$[n-1]$ - характеризует значение функции (оператора) на предыдущей итерации.

Исследование характеристик любого итерационного процесса долж-

но включать как минимум анализ сходимости процесса и анализ сходимости приближенного решения к точному. Сходимость итерационного процесса, реализующего (I), подтверждена доказанной в общем случае в работе теоремой. Анализ сходимости приближенного решения, полученного с помощью интегро- итерационного уравнения, к точному и его качественная оценка выполнены в сравнении с методом последовательных приближений (МПП) и методом осреднения функциональных поправок (МОФП) /решения, полученные с помощью МПП и МОФП, взяты у Соколова Ю. Д./ Результаты проведенного анализа показали, что метод организации итерационного процесса в соответствии с (I) имеет более широкий диапазон применения по сравнению с МОФП при одинаковом порядке точности получаемых решений в интегрируемых случаях, а по сравнению с универсальным МПП имеет более быструю сходимость получаемого решения к точному.

Организация интегро- итерационного процесса с помощью разностных уравнений потребовала введения дополнительного параметра σ_2 . В этом случае семейство разностных схем метода операторной коррекции (МОК) имеет вид /для уравнения (2) одномерного по пространству/

$$\hat{y}_j = \frac{y_j}{j} + \frac{h_\tau}{h_x} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2) \left[\hat{\Lambda}_{j+1/2}^{*(n-1)} + \hat{\Lambda}_{j-1/2}^{*(n-1)} \right] + (1 - \sigma_1) \left[\hat{\Lambda}_{j+1/2}^* - \hat{\Lambda}_{j-1/2}^* \right] + \sigma_2 \left[\hat{\Lambda}_{j+1/2}^* - \hat{\Lambda}_{j-1/2}^* \right] \right\}, \quad (3)$$

где h_x, h_τ - параметры сетки по пространству и времени,

\hat{y}_j, y_j - значения искомой функции в узле j на текущем и преддущем временном слое,

σ_1, σ_2 - весовые множители,

$\hat{\Lambda}, \Lambda$ - правая часть уравнения (2) на текущем и преддущем временном слое, $\Lambda^* = f(\Delta x)$.

Частные случаи уравнения (3), характеризующего МОК, приводят к известным схемам

1. $\sigma_1 = \sigma_2$ - обычная двухслойная разностная схема;
2. $\sigma_2 = \sigma_1 = 0$ - обычная явная разностная схема;

схемы МОК получаем в случае

3. $\sigma_1 \neq \sigma_2$; $\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_2 \neq 0$ - неявные разностные схемы,

4. $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_2 = 0$ - явные разностные схемы.

Для явных схем, реализующих интегро - итерационный процесс (I), характерно ослабление условия устойчивости. На примере линейного случая имеем

$$h_{\tau} < \frac{h_x^2}{2a(1-\sigma_1)}, \quad \sigma_1 \neq 1, \quad a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Рассмотрим возможный вариант применения МОК к построению итерационных схем для многомерного уравнения типа

$$u_{\tau} = \sum_{\alpha=1}^p \Lambda_{\alpha} \cdot, \quad (4)$$

где $\Lambda_{\alpha} = \frac{\partial}{\partial x_{\alpha}} \left[k_{\alpha} \frac{\partial u}{\partial x_{\alpha}} \right]; \quad x_1, x_2, x_3, \dots, x_p.$

В этом случае применение метода операторной коррекции для построения экономичных разностных схем требует введения $2p$ весовых коэффициентов. Так, для локально - одномерной итерационной схемы ω_{α} должна удовлетворять системе уравнений

$$\frac{\hat{\omega}_{\alpha} - \omega_{\alpha}}{h_{\tau}} = \hat{\Lambda}_{\alpha}^*, \quad \alpha = 1, 2, 3, \dots, p; \quad (5)$$

где $\hat{\Lambda}_{\alpha}^* = (\sigma_{\alpha} - \sigma_{2p-\alpha+1}) \hat{\Lambda}_{\alpha}^{[n-1]} + (1-\sigma_{\alpha}) \Lambda_{\alpha} + \sigma_{2p-\alpha+1} \hat{\Lambda}_{\alpha}$ (6)

с начальными условиями

$$\omega_1 = \hat{y}, \quad \omega_2 = \hat{\omega}_1, \quad \omega_3 = \hat{\omega}_2, \dots, \hat{y} = \hat{\omega}_p$$

Сходимость интегро - итерационного процесса /в соответствии с (1)/ проверялась на примерах интегрирования уравнений I-го порядка, причем характеристики получаемого решения сравнивались с решениями, получаемыми с помощью метода Рунге (МР) и МП.

Выбор дифференциального уравнения первого порядка обусловлен

тем, что все нестационарные уравнения переноса можно представить в этом виде, разрешая их относительно первой производной по времени.

Результаты численного анализа уравнения показали, что сходимость решений, получаемых интегро - итерационным методом, носит монотонный характер как в смысле практической сходимости, так и сходимости к точному решению и имеет лучшие характеристики по сравнению с МП и МП (частично результаты см. рис. 1 и 2).

Предложенный и исследованный в диссертации интегро-итерационный процесс позволил разработать новый класс двухпараметрических разностных схем повышенной устойчивости для решения нелинейных задач теплофизики.

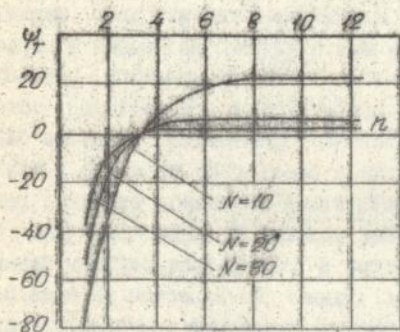
Результаты численного исследования непосредственно разностных уравнений (3), реализующих интегро- итерационный процесс, подтвердили, что они имеют лучшие характеристики по сравнению с традиционными неявными (рис.3) и явными схемами (рис.4). При этом для неявных схем существенно уменьшается необходимое количество итераций для получения решения одинаковой точности, а для явных - критический шаг по времени, обеспечивающий получение устойчивого решения, увеличивается примерно в 1,6 раза.

3. РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

При выборе методов анализа обратных задач теплообмена, построенных на регуляризации их решения, придерживаясь сделанных в работе выводов, следует отдать предпочтение тем, которые в наибольшей степени используют методы решения прямых задач (ПЗ). Это тем более важно, что в существующем математическом обеспечении ЭВМ решения многих ПЗ представлены в форме стандартных программ. Практическая реализация такого подхода существенно уменьшает время на подготовку и отладку программ для ЭВМ.

При моделировании теплотехнологических процессов (в частности, в черной металлургии: затвердевание слитка в изложнице, нагрев и регламентированное охлаждение слябов и сортового проката и т.д.) по-прежнему является необходимостью решения ОБТ в многомерной постановке с учетом ее нелинейного характера.

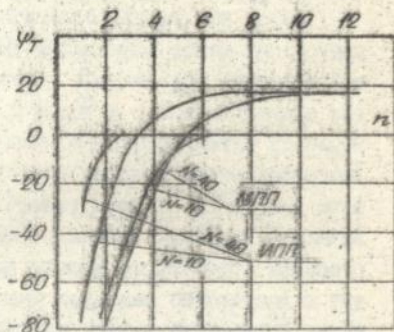
Точность интегро-итерационного процесса



n - количество итераций
 N - количество узлов сетки

Рис. 1.

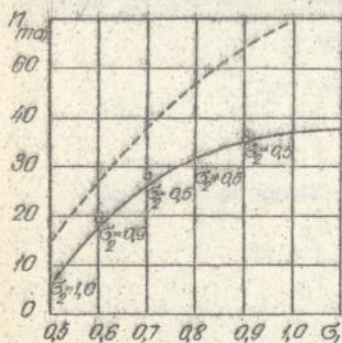
Сравнение характеристик метода последовательных приближений и интегро-итерационного процесса



n - количество итераций
 N - количество узлов сетки

Рис. 2.

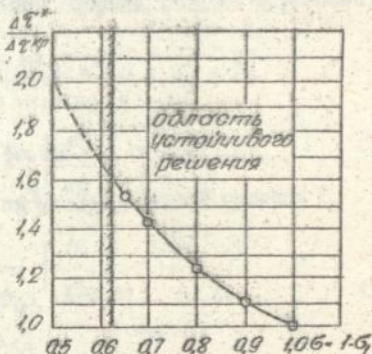
Зависимость максимального количества итераций от параметра σ_1



--- σ_1, σ_2 однопараметрические схемы
 — двухпараметрические схемы с оптимальным сочетанием

Рис. 3.

Зависимость $\Delta \tau^* / \Delta \tau^{KP}$ от σ



$\Delta \tau^*$ - двухпараметрические схемы (дискретизация)
 $\Delta \tau^{KP}$ традиционные явные схемы

Рис. 4.

Анализ метода возмущений показал возможность его применения к решению многомерных нелинейных обратных задач и получению достаточно простых алгоритмов применительно к ЭВМ.

Метод возмущений относится к асимптотическим методам. Широкое применение метод возмущений (метод малого параметра) нашел в небесной механике при анализе задачи "многих тел". Возможность применения асимптотических методов к различным задачам нелинейного теплопереноса анализируется во многих работах. Достаточно обширная библиография этого вопроса представлена в работах Коздобы Л.А., Чумикова В.Л. и др. В этих работах убедительно показано, что идея разложения искомого решения и краевых условий в формальный ряд по степеням некоторого малого параметра в большинстве случаев приводит к достаточно надежным решениям. Однако не известна ни одна попытка применения метода малого параметра к решению обратной граничной задачи теплопроводности. Учитывая достоинства метода возмущений и особенно возможность эффективной алгоритмизации решения применительно к ЭВМ, в диссертации [8, 9, 12, 13] рассмотрена возможность его применения к решению нелинейных многомерных обратных задач нестационарной теплопроводности. В диссертации разработаны теоретические аспекты введения малого параметра в математическую постановку нелинейной ОЗТ и в общем виде получена рекуррентная система дифференциальных уравнений, последовательное решение которых дает возможность найти систему функций $t_0, t_1, t_2, \dots, t_m$, определяющих решение ОЗТ

$$\rho c \frac{\partial t_0}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t_0) + q_v;$$

$$t_0(\eta, 0) = \phi_1(\eta), \quad \eta \in D;$$

$$t_0(\omega, \tau) = \phi_2(\omega, \tau), \quad \omega \in \Gamma_{II};$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial t_0}{\partial x} \right|_{\Gamma_{II}} = \phi_2(\omega, \tau) - \int_{\Gamma_{II}} q_v dx;$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial t_0}{\partial y} \right|_{\Gamma_{II}} = \phi_2(\omega, \tau) - \int_{\Gamma_{II}} q_v dy;$$

$$-\lambda \frac{\partial t_0}{\partial n} \Big|_{\Gamma_H} = \Phi_2(\omega, \tau) - \int_{\Gamma_H} q_v dz; \quad (7)$$

$$\rho c \frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t_m) + q_v;$$

$$t_m(\eta, 0) = 0, \quad \eta \in D;$$

$$t_m(\omega, \tau) = 0, \quad \omega \in \Gamma_H;$$

$$-\lambda \frac{\partial t_m}{\partial x} \Big|_{\Gamma_H} = \int_{\Gamma_H} \left[\rho c \frac{\partial t_{m-1}}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial t_{m-1}}{\partial y} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial t_{m-1}}{\partial z} \right] \right] dx;$$

$$-\lambda \frac{\partial t_m}{\partial y} \Big|_{\Gamma_H} = \int_{\Gamma_H} \left[\rho c \frac{\partial t_{m-1}}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial t_{m-1}}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial t_{m-1}}{\partial z} \right] \right] dy;$$

$$-\lambda \frac{\partial t_m}{\partial z} \Big|_{\Gamma_H} = \int_{\Gamma_H} \left[\rho c \frac{\partial t_{m-1}}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial t_{m-1}}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial t_{m-1}}{\partial y} \right] \right] dz;$$

В постановке задачи исследуемый объем определен в области трехмерного пространства D и ограничен теплообменной поверхностью Γ начальное распределение температур

$$t(\eta, 0) = \phi_1(\eta), \quad \eta \in D \quad (8)$$

условия теплообмена на переопределенной границе (заданы 2 условия):

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{\Gamma_H} = \Phi_2(\omega, \tau), \quad \omega \in \Gamma_H \in \Gamma;$$

$$t \Big|_{\Gamma_H} = \Phi_2(\omega, \tau), \quad \tau \geq 0 \quad (9)$$

идентификации подлежат условия на неопределенной границе Γ_H

$$(\Gamma_H + \Gamma_H) = \Gamma$$

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{\Gamma_H}(\omega, \tau) \quad \text{или} \quad t \Big|_{\Gamma_H}(\omega, \tau) \quad (10)$$

Нахождение указанной системы функций не встречает принципиальных трудностей, поскольку для нахождения любой функции t_m необходимо решить обычную ПЗ.

Можно сразу отметить удобство предлагаемого подхода к анализу ОЗТ любой пространственной мерности, поскольку для последовательного вычисления системы функций t_m достаточно иметь один алгоритм или программу для ЭВМ решения ПЗ и несколько раз их использовать с соответствующей корректировкой условий однозначности. Такие программы для ЭВМ, в которых поиск решения задачи сводится к многократному обращению к одному и тому же блоку (алгоритму), являются наиболее рациональными с точки зрения их организации, отладки и возможной корректировки при решении различных практических задач.

Рассмотрен ряд методических задач, позволивших исследовать численными методами практическую сходимость получаемого решения, оценить погрешность при возмущении входных данных и границы его применения.

Численный анализ показал линейную связь между возмущением входных данных и погрешностью идентифицируемых параметров.

Кроме достаточно универсального метода возмущений в диссертации рассмотрена возможность улучшения регуляризации вариационной постановки ОЗТ. Математическая запись вариационной постановки ОЗ известна (см. работы Коздобы Л.А., Алифанова О.М. и др.) и требует численной минимизации некоторого функционала

$$\int_0^{\tau_m} (Aq_0 - b_0)^2 d\tau \leq \delta^2 \quad (II)$$

для нахождения решения ОЗТ в постановке

$$Aq_0 = b_0, \quad (I2)$$

где A - линейный непрерывный оператор;

$q_0(\tau)$ - искомая характеристика тепловой модели;

b_0 - измеренные с погрешностью характеристики тепловой модели.

Минимизация этого функционала равносильна решению уравнения Фредгольма I-го рода некорректной задачи математической физики. Анализ этого вопроса в работах Алифанова О.М. показал, что для уравнения типа (II) достаточно в практических задачах наложить ограничения на первую производную искомой функции. Для этого доста-

точно минимизировать функционал

$$\min_{q_0} I = \min_{q_0} \int_0^{\tau_m} q_0'^2 dt, \quad q_0' = \frac{\partial q_0}{\partial \tau}; \quad (13)$$

Совокупность уравнений (11) и (13) можно рассматривать как задачу на условный экстремум. Воспользовавшись методом множителей Лагранжа, получим функцию

$$\Phi = q_0'^2 + \mu (Aq_0 - b_0)^2, \quad (14)$$

которая должна удовлетворять уравнению Эйлера

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial q_0'} \right] - \frac{\partial \Phi}{\partial q_0} = 0, \quad (15)$$

где μ - неопределенный множитель.

Решение системы (11) и (13) дает возможность определить $q_0(\tau)$ и μ . Эта задача эквивалентна минимизации следующего функционала

$$\min_{q_0} I = \min_{q_0} \int_0^{\tau_m} \left\{ q_0'^2 + \mu (Aq_0 - b_0)^2 \right\} dt \quad (16)$$

При этом для определения μ используется уравнение (11). В теории регуляризации некорректно поставленных задач чаще используется параметр регуляризации $\alpha = \frac{1}{\mu}$. Алгоритм решения уравнений (11, 16) является регуляризирующим для исходной некорректной задачи.

Полученная в работе аналитическая связь между граничными условиями для текущего временного слоя и подстановка этого выражения в уравнение Эйлера сводит задачу минимизации функционала к решению обыкновенного дифференциального уравнения

$$\alpha q_0'' - \varphi_1 q_0' - \varphi_2 = 0, \quad (17)$$

где α - параметр регуляризации;

φ_1 и φ_2 - определяются коэффициентами уравнения теплопроводности, параметрами выбранного разностного шаблона, начальными и граничными условиями.

Анализ уравнения (17) показывает, что ограничения на класс допустимых функций типа (13) фактически соответствуют постановке допол-

нительного граничного условия. Кроме обычного численного анализа точности и устойчивости решения возмущению входной информации в работе сделано сравнение результатов с данными Б.Блекуэла на тождественном методическом примере: для плоской теплоизолированной стенки единичной толщины восстанавливалась единичная тепловая нагрузка по известной температуре в средней плоскости. Результаты, представленные в таблице I, показали как функциональную способность предлагаемого метода регуляризации, так и лучшие характеристики его сходимости.

Таблица I.

$F_0 = \frac{a\tau}{b^2}$	t (задана (x=0,5))	q Блекуэл (x=0)	q диссерт (x=0)
0,08	0,040	0,80391	0,906
0,16	0,118	1,2224	1,10
0,24	0,198	0,97454	0,988
0,32	0,278	1,0003	1,0001
0,40	0,358	1,0001	1,00
0,48	0,438	1,0000	1,00
0,56	0,518	1,0000	1,00

В заключение этого раздела отметим, что разработанные в диссертации новые методы регуляризации ОБТ соответствуют критериям, предложенным в работах J.V.Бек (устойчивости решения, возможности алгоритмизации, погрешности экспериментальных данных и т.д.).

4. ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОБМЕНА В ПРИМЯШИВНЫХ АГРЕГАТАХ.

Разработанные методы диагностики позволили решить ряд практически важных проблем применительно к теплотехнологическим агрегатам черной металлургии

А. Диагностика состояния футеровки металлоприемника доменной печи

Проблема диагностики состояния футеровки в районе горна и лещади доменной печи становится особенно актуальной при дальнейшей интенсификации технологического процесса. Применение новых материалов типа углеродистых и высокоглиноземистых огнеупоров не исключило случаи ухода чугуна через кладку в этом районе. В настоящее время

не существует общепринятой методики оценки состояния футеровки доменной печи. Попытки использования статистических данных для регламентации кампании, оценка состояния футеровки по величине перепада температур в системе охлаждения и др. не привели к надежным результатам. В связи с этим перспективным представляется направление, разработанное совместно с Украинским филиалом института "Черметавтоматика", которое включает ЭВМ в качестве необходимого элемента системы диагностики футеровки доменной печи. Источниками информации являются блоки футеровки, каждый из которых имеет 6 термопар, расположенных в радиальном направлении блока (минимальное количество термопар—2, рис.5).

Идентификация поля температур в блоке по показаниям термопар с помощью методов, изложенных в главе 3, дает возможность диагностировать положение подвижной границы футеровочного блока в рабочем пространстве доменной печи при наличии на ней условий теплообмена (температурных или радиационно- конвективных). Использование температуры, установившейся в конце разогрева печи, в качестве определяющей движение рабочей границы блока существенно упрощает задачу и дает возможность получить надежную информацию о состоянии блока (анализ радиационно- конвективных граничных условий показал, что недостаточная определенность используемых параметров: свойств блока и расплава, коэффициентов переноса и тд., не приводит к уменьшению погрешности получаемых результатов).

Мониторная информация оператора по диагностике разгара одного из футеровочных блоков доменной печи металлургического завода г. Нижний Тагил представлена на рис 6. /показания термопар и кривая разгара/.

Б. Асимметрия нагрева.

Исследования неравномерности теплообмена в различных теплотехнологических процессах проводятся на большинстве металлургических заводов, поскольку наличие информации об асимметрии нагрева дает возможность более рационально подойти к организации ремонтных и предупредительных работ, к планированию возможной реконструкции рабочего пространства печей и топливосжигающих устройств.

Известно, что использование формул для расчета коэффициента несимметричности теплообмена (μ), базирующихся на аппроксимации поля температур некоторым полиномом, имеет определенные ограничения (возможность появления отрицательных значений μ в некоторых диапа-

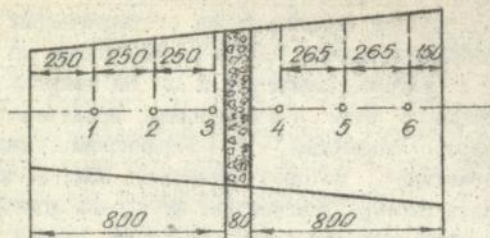


Рис. 5. Футеровочный блок и схема заделки термопар

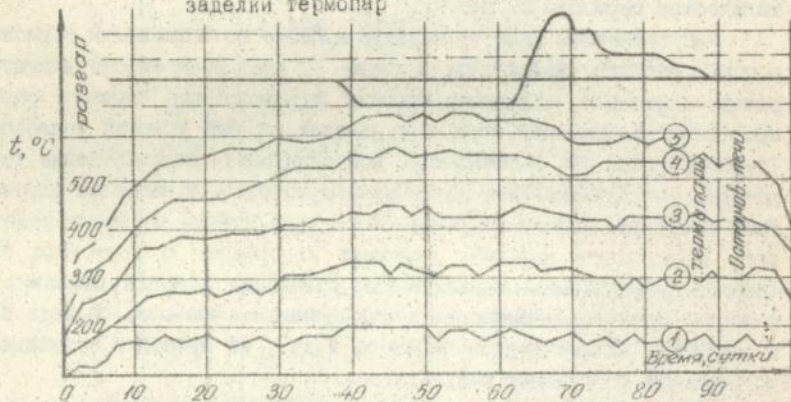


Рис. 6. Нижний Тагил, кампания 14.06.91-27.09.91; показания термопар и разгар футеровочного блока.

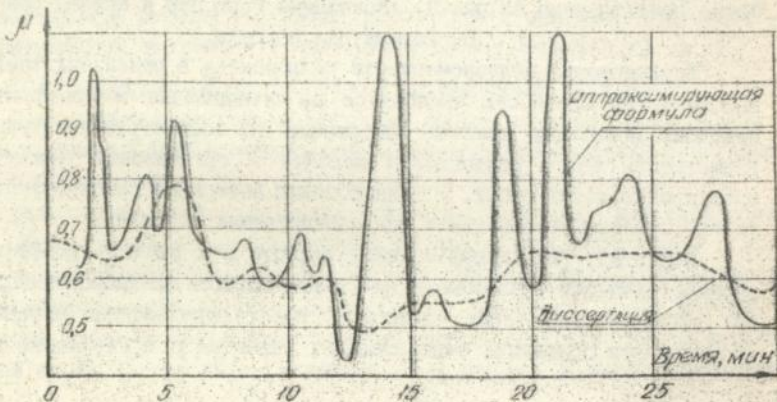


Рис. 7. Прходная роликовая печь, стан 3600, Азовсталь.

зонах значений измеряемых температур, появление зон "нечувствительности" формул, особенно участков перехода от одностороннего нагрева к двухстороннему и тд).

Оценить различные методические подходы (традиционные и предложенный в диссертации) можно с помощью обработки результатов исследования несимметричности теплообмена в проходной роликовой печи стана 3600 металлургического комбината "Азовсталь", представленной на рис.7.

На рис. 8, 9, 10 представлена обработка экспериментальных данных для 3-х методических печей листопрокатного цеха Донецкого металлургического завода, имеющих существенно различные характеристики

печь № 1: 8 месяцев после ремонта, термоизоляция глиссажных труб отсутствует; производительность 36,7т/час и 39т/час;

печь № 2: 0,3 месяца после ремонта, термоизоляция новая; производительность 36,7т/час и 40т/час;

печь № 3: 3 месяца после ремонта, термоизоляция сохранилась частично, производительность 28,6т/час и 36,6т/час.

Анализ динамики коэффициента несимметричности позволил сделать целый ряд выводов и получить конкретные рекомендации по улучшению работы методических печей ЛПЦ.

Из основных:

печь №1. - теплообмен в рабочем пространстве неудовлетворителен. Из-за отсутствия термоизоляции глиссажных труб почти по всему тракту печи $\mu > 0,8$, а в районе окна торцевой выдачи $\mu > 1$ - заметен подсос воздуха.

печь № 2. - зависимости μ для двух производительностей близки по своему характеру. Однако, также можно отметить недостаточную мощность горелок в нижней зоне при производительности 40т/час и неудовлетворительную установку и эксплуатацию горелок в районе 6-й зоны.

печь № 3. - для малой производительности 28,6т/час получен довольно показательный результат ($\mu \sim 0,6$), подтверждающий общий вывод о недостаточной мощности горелок для всех печей при увеличении производительности. В районе томильной зоны заметно влияние подсоса воздуха, приводящее к увеличению μ . Решение вопроса - герметизация окна торцевой выдачи. (Отметим, что для ряда зон обработка информации традиционными методами приводила к отрицательным значениям μ).



Рис. 8. Печь № 1, — производительность 36,7 т/ч;
 --- 39 т/ч.



Рис. 9. Печь № 2, — производительность 36,7 т/ч;
 --- 40 т/ч.

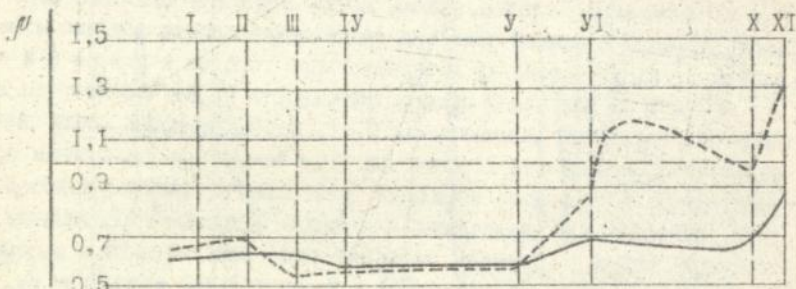


Рис. 10. Печь № 3, — производительность 28,6 т/ч;
 --- 36,5 т/ч.

В. Теплообмен в печи с шагающими балками для

термообработки заготовок, литых на МНЛЗ

Разработанные методы идентификации дают возможность не только оценить параметры исследуемого процесса по результатам проведенных экспериментальных исследований, но и на стадии проектирования теплотехнологических агрегатов выбрать режим эксплуатации и сформулировать требования к проведению исследований в период наиболее ответственного режима - режима наладки.

Печь с шагающими балками для термообработки заготовок, литых на машине непрерывного литья (МНЛЗ), предназначена для термообработки заготовок из высококачественных сталей (шарикоподшипниковой для ШШ и конструкционных легированных - КЛС).

Температура металла на входе в печь $700 - 800^{\circ}\text{C}$. В камере предварительного охлаждения заготовки ускоренно охлаждаются до температуры $450 - 500^{\circ}\text{C}$ и нагреваются в камере нагрева до $780 - 830^{\circ}\text{C}$. При этой температуре обеспечивается и выдержка в следующей камере. Режим регламентированного охлаждения является наиболее сложным по обеспечению, поскольку ограничение по максимальной скорости охлаждения ($50^{\circ}\text{C}/\text{час}$) одновременно является определяющим для всего темпа работы печи. В камере регламентированного охлаждения заготовки охлаждаются до 650°C . В последней камере - камере струйного охлаждения - режим не регламентирован. Температура на выходе из печи $300 - 400^{\circ}\text{C}$. Подчеркнем, что лимитирующим звеном при определении технологической скорости металла в печи является процесс теплообмена в камере регламентированного охлаждения. Именно получение скорости охлаждения, близкой к $50^{\circ}\text{C}/\text{час}$, должно обеспечить, с одной стороны, необходимое качество металла, с другой - проектную производительность печи.

Для определения тепловой нагрузки на заготовку была создана многоканальная автономная система регистрации показаний термомпар. Контрольная заготовка с зачеканенными термомпарами вместе с системой регистрации проходила всю длину печи ($\sim 85\text{м}$) с практически непрерывным опросом датчиков, который обеспечивался электронным коммутатором. На стадии планирования эксперимента для используемой заготовки сечением $200 \times 400\text{мм}$ было выбрано необходимое количество термомпар, позволяющее идентифицировать поле температур с погрешностью, согласованной с погрешностью задания входных данных (7 термомпар для чет-

Схема движения электродов ЭШП в режиме "ПЛЮС" и динамика поля температур в зонах регламентированного охлаждения

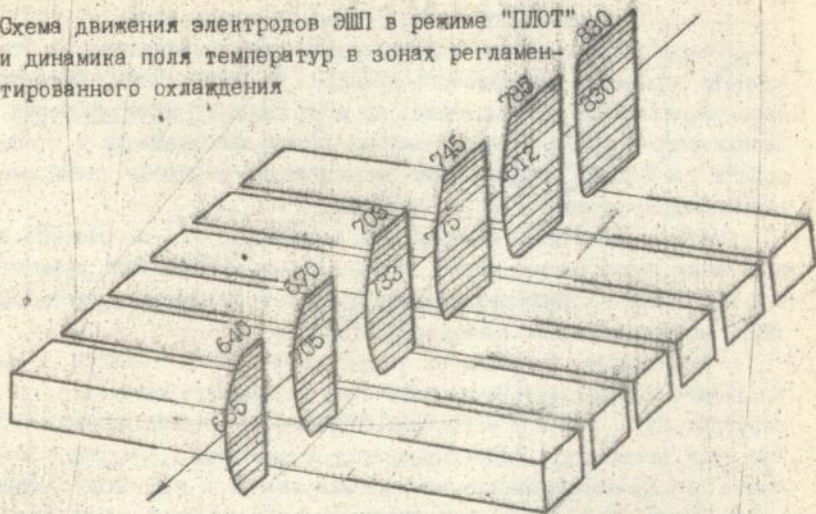


Рис. II.

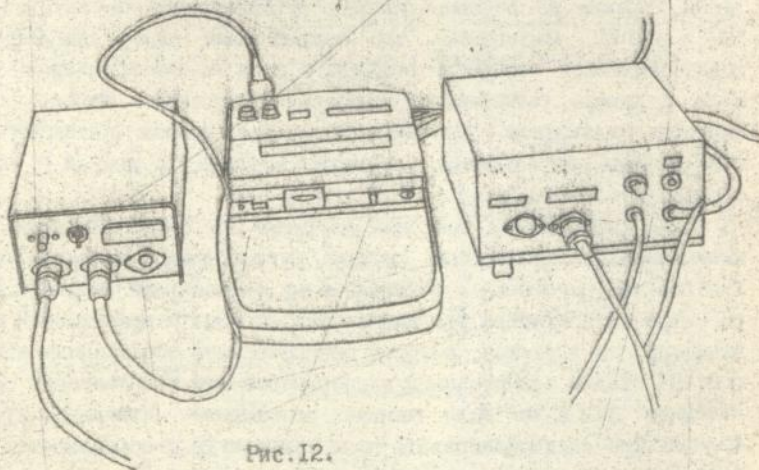


Рис. 12.

верти заготовки).

Определение тепловой нагрузки на заготовку дает возможность рассчитать эффективные температуры в зонах камеры регламентированного охлаждения, соответствующие проектной скорости охлаждения ($50^{\circ}\text{C}/\text{час}$). Реализовать на практике эффективные температуры в зонах, соответствующие $t = 50^{\circ}\text{C}/\text{час}$, крайне сложно и, вероятно, нецелесообразно, учитывая, что в этих зонах регулировка подачи воздуха в охлаждаемые трубы не автоматическая, а ручная. В связи с этим изменение характеристик заготовок при входе в камеру регламентированного охлаждения (температуры заготовок подачи в режиме "плота" или в интервальном режиме и т.д.) требовало бы ручной перенастройки всей системы охлаждения в этих зонах. В связи с этим для периода наладки рекомендованы постоянные эффективные температуры в зонах регламентированного охлаждения, не зависящие от характеристик заготовок на входе в камеру. В качестве свободного параметра в этом случае должна выступать горизонтальная скорость движения заготовок, которая легко регулируется. Пример расчета динамики поля температур заготовки в рекомендованном режиме приведен на рис. II.

Отметим в заключение, что созданная многоканальная автономная система регистрации температур и разработанное методическое обеспечение, позволяющее обработку экспериментальных данных на многомерных моделях, позволили исследовать динамику поля температур по всему тракту печи (85 м) и на стадии наладки определить рациональные тепловые режимы в зонах камеры регламентированного охлаждения для этого периода. В схему КИПа введены каналы контроля температур воздуха на выходе из охлаждаемых труб каждой из зон камеры регламентированного охлаждения. Расчитанный вариант обеспечения заданной скорости охлаждения ($50^{\circ}\text{C}/\text{час}$) получил экспериментальное подтверждение.

5. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СРЕДСТВ ТЕПЛОВОЙ ДИАГНОСТИКИ

Проблема идентификации параметров теплотехнологических процессов включает, как один из наиболее существенных, вопрос теоретического анализа, разработки и создания средств тепловой диагностики, отвечающих по своим динамическим характеристикам современным требованиям повышения эффективности металлургического производства.

В связи с этим актуальной проблемой является разработка прос-

тых, достаточно точных, алгоритмов идентификации с определенными границами их применимости, позволяющих качественный анализ и синтез систем тепловой диагностики: определение передаточных функций, функциональных уравнений отдельных элементов системы и т.д. Границы применимости этих алгоритмов определяются естественными факторами: незначительной толщиной теплопреобразователя, используемых для целей тепловой диагностики, и их свойствами, позволяющими пренебречь зависимостью от температуры в эксплуатационных диапазонах.

В основе разработанного метода анализа динамических характеристик средств тепловой диагностики - новая форма решения уравнения Бурье, полученная при сделанных выше ограничениях, и при допущении, что функция, определяющая граничные условия 1-го или 2-го рода на теплообменных поверхностях, имеет бесконечное число производных по времени. Решение имеет вид

$$\begin{aligned}
 at(x, \tau) = & \sum_{l=0}^L \frac{x^{2l+2}}{(2l+2)! a^l} t_0^{(l+1)} - \sum_{l=1}^{\infty} \frac{x^{2l+3}}{a^l (2l+3)!} t_0^{(l+1)} + \\
 & + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{x^{k+2}}{(k+2)(k+1)} B_k + C_1 x + C_2. \quad (18)
 \end{aligned}$$

где C_1 и C_2 определяются двумя граничными условиями, а коэффициенты B_k - решением системы алгебраических уравнений

$$\begin{cases}
 t_b' = \sum_{l=0}^L A_{2l} b^{2l} + \sum_{l=0}^{\infty} A_{2l+1} b^{2l+1} + \sum_{j=0}^{\infty} B_k b^k; \\
 -\frac{1}{\lambda} q_b = \sum_{l=1}^L 2l A_{2l} b^{2l-1} + \sum_{l=1}^{\infty} (2l+1) A_{2l+1} b^{2l} + \sum_{j=0}^{\infty} k B_k b^{k-1}; \\
 \frac{1}{a} t_b' = \sum_{l=2}^L 2l(2l-1) A_{2l} b^{2l-2} + \sum_{l=2}^{\infty} 2l(2l+1) A_{2l+1} b^{2l-1} + \\
 + \sum_{j=0}^{\infty} k(k-1) B_k b^{k-2}; \quad (19)
 \end{cases}$$

Решение (18) носит виброксилирующий характер и в зависимости от исходной обусловленности задачи может изменять свою структуру.

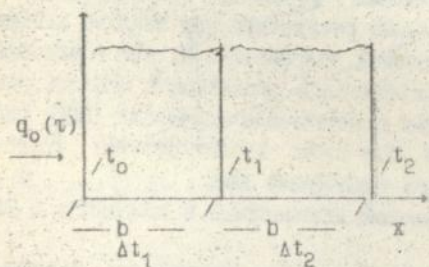
Полученное решение в форме его частных случаев прошло всестороннюю проверку на точность и устойчивость для многочисленных ва-

риантов граничных условий и позволили получить функциональные уравнения различных схем термопреобразователей. Эти уравнения явились теоретической базой для синтеза семейства устройств, позволяющих корректировать динамические характеристики рассматриваемых термопреобразователей. Для примера:

Приемник тепловых потоков типа "тандем".

Используя решение в форме (18), получим уравнение идентификации тепловых нагрузок на датчик с последовательным расположением термопар, выдающих электрический сигнал, пропорциональный перепадам температур на своих поверхностях (рис.13)

Схема ЧЭ типа "тандем" /24/
$$q_0 = \frac{\lambda}{b} \left[2\Delta t_1 - \frac{1}{2} (\Delta t_1 + \Delta t_2) \right] + \frac{1}{3} \rho c b \Delta t_2$$



$$t_0 = t_{0 \text{ начальный}} + \frac{a}{b^2} \int_0^\tau (\Delta t_1 - \Delta t_2) d\zeta + \frac{1}{3} \Delta t_1 + \frac{2}{3} \Delta t_2$$

рис.13

Схема ЧЭ типа "балансмер"

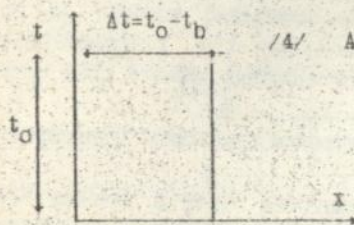


рис.14

/4/ А.
$$q_0 = \frac{\lambda}{b} (t_0 - t_b) + \frac{2\lambda}{b} (2t_0 + t_b) - \frac{24a\lambda}{b^3} \int_0^\tau \left[(2t_0 + t_b) \exp\left[\frac{12a\zeta}{b^2} (t_0 - t_b) \right] \right] d\zeta$$

/23/ Б.
$$q_0 = \frac{\lambda}{b} \Delta t + \frac{\rho c b}{6} (-\Delta t + 3t_0),$$

где $\Delta t = \frac{\partial}{\partial \tau} (t_0 - t_b)$.

Следствием полученного решения явилась аппроксимация граничных условий повышенной точности ($x=0$, выражение для второй границы - ана-

ЛОГИЧНО).

$$q_0 = \lambda_{1+1/2} \frac{\hat{t}_1 - \hat{t}_2}{h_x} + \frac{\rho c_p}{5} \left[2 \frac{\hat{t}_1 - t_1}{h_r} + \frac{\hat{t}_2 - t_2}{h_r} \right] h_x, \quad (20)$$

где t_1 и t_2 — температура на границах элемента;

q_0 — плотность теплового потока на границе элемента.

Относительная погрешность предлагаемой аппроксимации граничных условий примерно в 3 раза меньше при сравнении с данными Коздобы Л.А.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПРОМЫШЛЕННЫХ АГРЕГАТАХ

С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ

КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Структура новой формы решения уравнения теплопроводности позволила получить качественно новые результаты при анализе динамических характеристик средств тепловой диагностики и, как следствие, их функциональные уравнения. Практической реализацией явилась разработка и создание базового блока динамической коррекции (БДК — рис. 15), позволяющего существенно улучшить характеристики средств тепловой диагностики градиентного типа (рис. 16).

Разработанные средства тепловой диагностики в комплексе с БДК были использованы:

— для управления режимом охлаждения агломерата (комбинат им. Ильича)

Использование БДК, существенно улучшающего динамические характеристики термопреобразователей, позволило вывести их из непосредственного контакта с возвратом (рис. 17). У применявшихся ранее бронированных термопар из-за абразивного эффекта срок службы не превышал 10 дней.

— для контроля за теплотехнологическим процессом "дрессировки" листа (комбинат им. Ильича);

Необходимость температурного контроля листа в течение всего процесса "дрессировки" определяется достаточно жесткими предъявляемыми требованиями, связанными с качеством конечного продукта. Загрязнения поверхности холоднокатанного листа при отжиге превращаются в трудноудаляемый осадок. Поэтому лист перед отжигом проходит последовательную обработку в травильных агрегатах (химическое и электролитическое обезжиривание) при температуре не

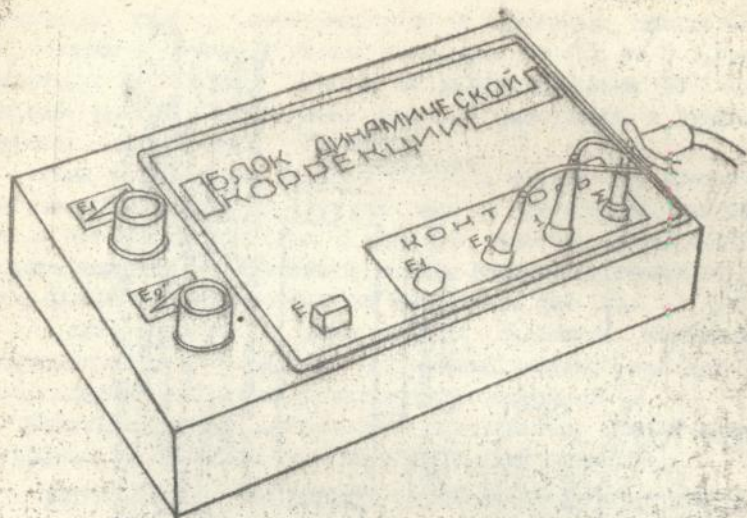


Рис. 15. БДК

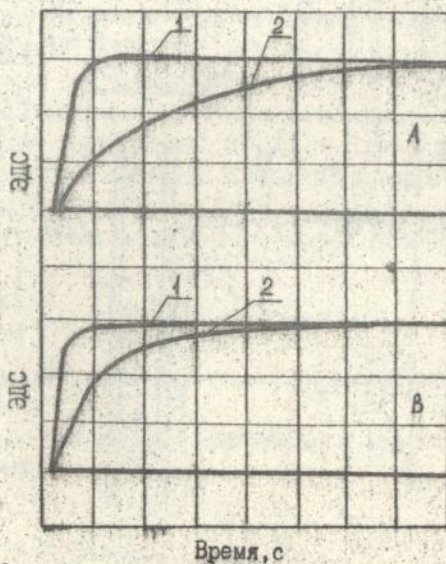


Рис. 16 . Переходные характеристики:
 1- ВДК+термопреобразователь; 2-термопреобразователь;
 А-время установления 1 с, В- 0,5 с.

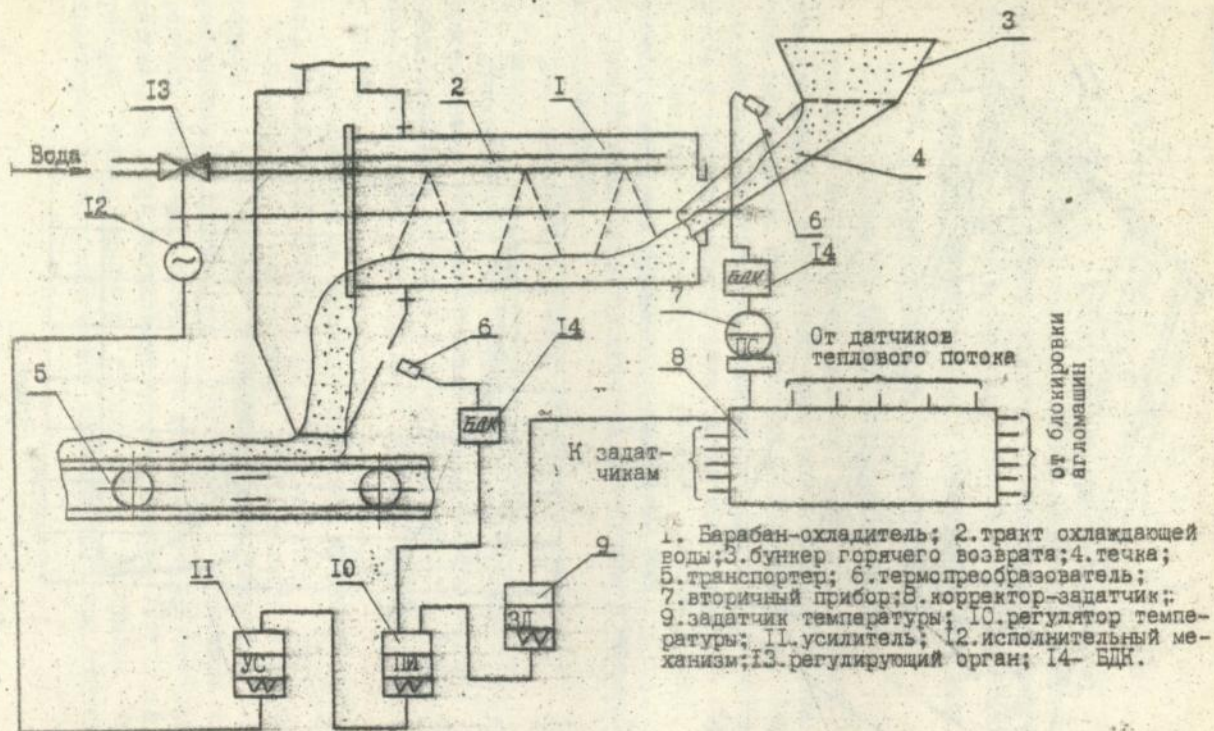


Рис. 17.

выше 30°C. Отоженный металл для придания ему необходимых механических свойств, штампуемости и т.д. подвергают "дрессировке", т.е. обжатию в прокатных валках в пределах от 0,5 до 5 %, причем, температура листа перед обжатием не должна превышать 45°C (схема контроля - рис.19, первая схема контроля температуры в травильных агрегатах - аналогична).

- для исследования тепловых нагрузок на рабочих, выполняющих наиболее теплонапряженные трудные операции при обслуживании мартеновских печей различных садок и клингов, позволивших разработать и внедрить комплекс мероприятий по защите рабочих от теплового излучения; (результаты исследований на номограмме - рис.18).

- для контроля и управления с заданными динамическими характеристиками (не более 3с) имитаторами инфракрасного излучения при проведении комплексных тепловакуумных испытаний.

Способы коррекции динамических характеристик средств тепловой диагностики градиентного типа признаны изобретениями.

7. НЕСТАЦИОНАРНАЯ ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

МЕТАЛЛИЧЕСКИХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Вопрос диагностики теплофизических свойств как исследуемых материалов, так и непосредственно средств измерения, является одним из наиболее сложных во всей проблеме идентификации теплофизических процессов. Во многих случаях именно точность задания теплофизических свойств и определяет погрешность конечных результатов.

В диссертации рассмотрены три подхода к определению ТФХ. Первый связан с минимизацией некоторого функционала по искомым величинам (вариационная постановка). Второй - с трансформацией уравнения теплопроводности и привязке его к некоторой характерной точке x^* (например, в которой измеряемая температура изменяется в наибольшем интервале). Тогда необходимо интегрировать уравнение

$$\frac{\partial \lambda^*}{\partial \tau} A_1^* + \lambda^* A_2^* + A_3^* = 0, \quad (21)$$

где $*$ показывает, что все параметры уравнения определены в точке с координатами x^* , y^* , z^* , A_1^* , A_2^* , A_3^* - определяются полем температур и рассчитываются по результатам эксперимента.

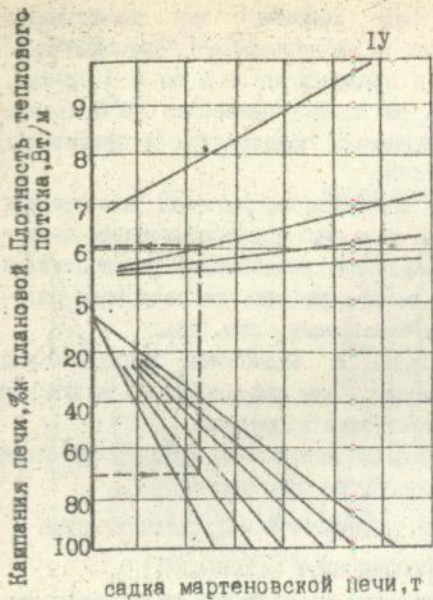


Рис. 18. Зависимость плотности теплового потока для групп трудовых операций (I-IV) от кампании и садки мартеновской печи; пунктиром показан пример определения тепловой нагрузки.

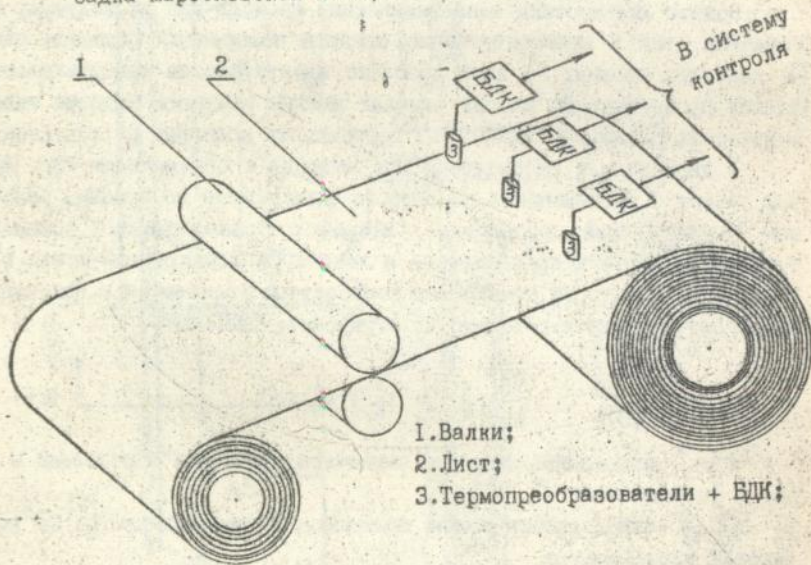


Рис. 19. Контроль качества при "дрессировке" листа.

В третьем подходе используются идеи, изложенные в главе 5 и позволившие получить новую форму решения уравнения Фурье. В этом случае удается получить аналитическое решение

$$\lambda(\bar{t}) = \frac{q_b b}{\Delta t} + \frac{\rho c b}{4 \Delta t} (t'_0 + t'_b) - \frac{1}{2 \Delta t} \int_0^b q_v b \, dx, \quad (22)$$

$$\text{где } \bar{t} = \frac{t_0 + t_b}{2}$$

Совместный анализ (22) с точным решением, полученным Карслоу и Егером применительно к импульсному нагреву, приводит к решению

$$a = \frac{A b^2}{\pi^2 \cdot \tau_{1/n}} - \frac{1}{2 \rho c \Delta t} \int_0^b q_v b \, dx, \quad (23)$$

где $\tau_{1/n}$ - время, соответствующее $1/n$ времени достижения максимума температуры;

A - численный коэффициент, соответствующий $\tau_{1/n}$.

Для $\tau_{1/2}$ численное значение $A = 1,37$ и при отсутствии тепловых потерь уравнение (23) тождественно известному (Parker, W - Oxford; Иович Л. и др. - Институт ядерных исследований, Белград).

Второе слагаемое полученного уравнения выступает в роли корректора всего выражения и может рассматриваться как некоторая функция температуры для образца с определенными ρc и b . Эта функция определяется на стадии обработки экспериментальных данных как согласующая с минимальной погрешностью теоретическую и экспериментальную переходные характеристики.

Изложенная методика была использована для определения эффективной теплопроводности ЧЭ типа гипертермопары толщиной 1,78 мм и размерами 10×10 мм. Переходные характеристики, определяющие температурную реакцию ЧЭ на лазерный энергетический импульс, сняты с экрана осциллографа и представлены на рис.20. На рис.21 представлена обработка экспериментальных результатов в соответствии с уравнением 23.

Применительно к обычным (не импульсным) режимам коэффициент теплопроводности определится /25/

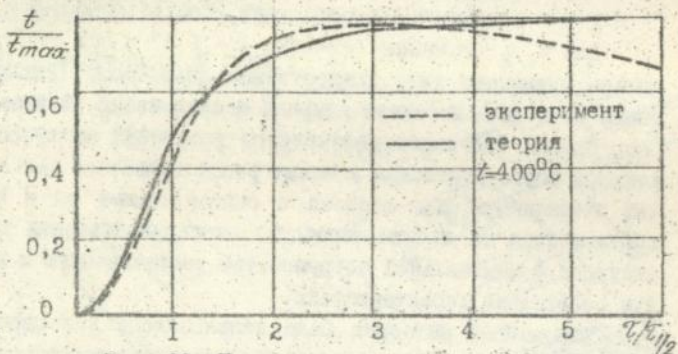
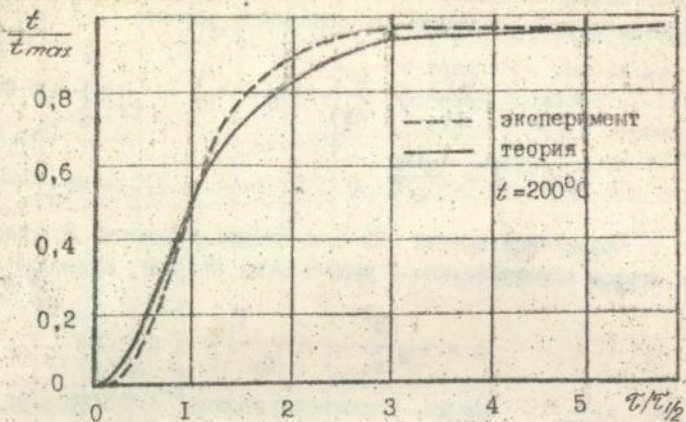


Рис. 20. Переходные характеристики.

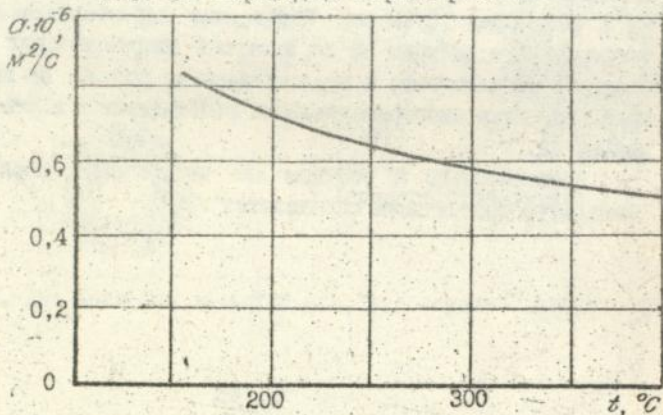


Рис. 21. Зависимость $\alpha(t)$

$$a = \frac{t_0 \frac{b^2(1-3n+2n^2)}{6n^3} + t_b \frac{b^2(n^2-1)}{6n^3}}{\frac{1}{n} [t_b - t_0(n-1)] - t_{b/n}} \quad (24)$$

Рассмотренные методы прошли всестороннюю проверку с использованием методов математического моделирования и в экспериментальных исследованиях. Их практическое применение позволило определить температурную зависимость коэффициентов теплопроводности и теплопроводности стали ШХ-15 после МНЛЗ Донецкого металлургического завода и температурную зависимость коэффициента теплопроводности рудодугольных заготовок для прямого восстановления железа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые разработаны теоретические принципы идентификации параметров теплообмена многомерных нелинейных систем методом возмущений и предложен новый подход к формированию блока адаптации математической модели к физической в вариационной постановке, который позволил провести диагностику ряда теплотехнологических процессов черной металлургии (г. Донецк, Мариуполь, Макеевка, Нижний Тагил) и получить конкретные рекомендации по улучшению режимов их работы (зависимости коэффициентов несимметричности теплообмена по длине печей, диаграммы разгара футеровки металлоприемника доменной печи др.). Разработанные методы и средства диагностики могут использоваться в металлургии цветных металлов, в строительной индустрии и т.д.

2. Впервые разработан новый класс двухпараметрических разностных схем, реализующих предложенный интегро-итерационный процесс, применительно к нелинейным нестационарным уравнениям переноса. Доказана в общем случае теорема сходимости итерационного процесса, реализующего МОК. Сравнительные численные исследования с методом последовательных приближений и методом осреднения функциональных поправок показали, что разработанный интегро-итерационный процесс имеет лучшие характеристики в смысле скорости сходимости к точному решению и диапазона применимости. Анализ традиционных однопараметрических разностных схем показал, что разработанные интегро-итерационные разностные схемы обладают лучшими характеристиками сходимости получаемого с их помощью решения. Явные интегро-итерационные разност-

стные схемы позволили в 1.6 раза увеличить шаг по времени по сравнению с обычными при сохранении характеристик точности и устойчивости. Неявные интегро-итерационные разностные схемы при одинаковой точности решения нелинейных задач переноса требуют примерно на 30% меньшее количество итераций по сравнению с обычными схемами в сочетании с методом последовательных приближений.

3. Получена новая форма решения уравнения Фурье, которая позволила теоретически обобщить и разработать новые принципы анализа средств тепловой диагностики теплотехнологических процессов. На базе новой формы решения уравнения Фурье получен ряд функциональных уравнений чувствительных элементов различных типов, позволяющих проведение эффективного анализа динамических характеристик средств тепловой диагностики, а также контроль и управление ТТП в "реальном" времени.

4. Разработано семейство корректирующих устройств, являющееся практической реализацией теоретических положений по идентификации параметров теплообмена, позволившее расширить динамический диапазон применения существующих средств тепловой диагностики, и использованное при исследованиях характеристик имитатора инфракрасных излучений при его тепловакуумных испытаниях, при контроле и управлении режимом охлаждения агломерата, при контроле и управлении процессом "дрессировки" листа, при контроле температуры листа перед травлением, при исследовании тепловых нагрузок на рабочих мартеновских цехов в районе сталевыпускного отверстия и др.

5. Разработаны новые методы нестационарной диагностики тепловых характеристик, широко апробированные на модельных задачах и многочисленных экспериментах, которые дали возможность определить: температурную зависимость коэффициентов теплопроводности и температуропроводности стали ШХ-15, температурную зависимость коэффициента теплопроводности рудоугольных заготовок, используемых при прямом восстановлении железа. Разработанные методики были также использованы при определении ТФХ в исследованиях, проводившихся на лазерной установке в Институте ядерных исследований им.Б.Кидрича, Югославия.

2

По комплексу рассмотренных разработок, методов и средств диагностики теплотехнологических процессов, практически реализующих новые теоретические положения диссертации, получено II авторских

свидетельств на изобретения. Общий экономический эффект от внедрения разработок с участием автора превышает 1.200 тыс. рублей. (в ценах 1990 г)

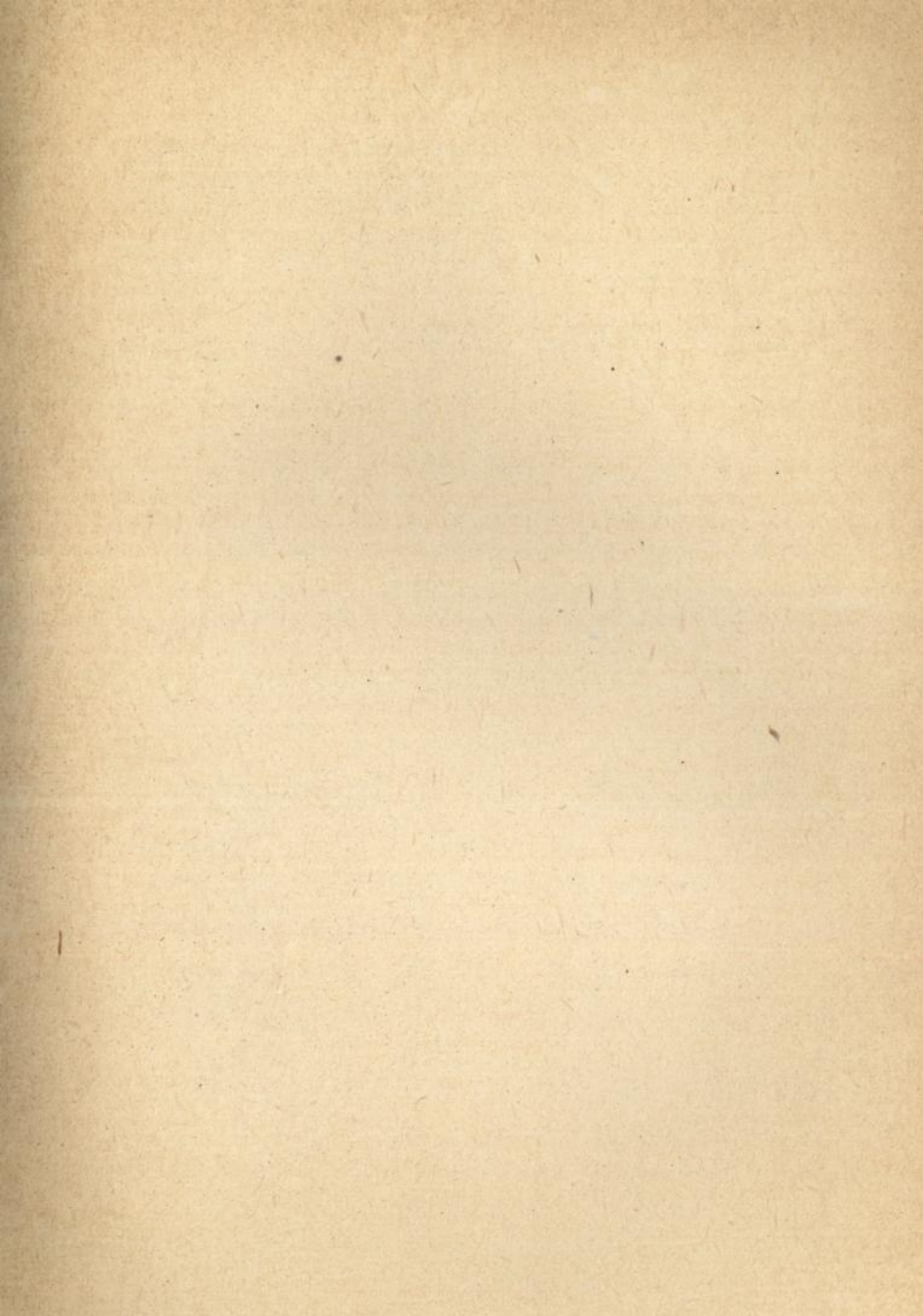
Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:

1. Маркин А.Д. Нестационарная диагностика теплотехнологических процессов черной металлургии. - Донецк, 1993. 16 с.
(Препринт / Донецкий физико-технический институт.: ДонФТИ-93-7).
2. Маркин А.Д. Разностные схемы повышенной устойчивости в анализе обратных задач теплопроводности. - В кн.: Идентификация Динамических Систем и Обратные Задачи: Сб. докл. Второй Международной Конф. Петербург, 1994.
3. Маркин А.Д., Ханна С. Об одной коэффициентной задаче для уравнения Фурье. - В кн.: Идентификация Динамических Систем и Обратные Задачи: Сб. докл. Второй Международной Конф. Петербург, 1994.
4. А.С. №368880 (СССР). Способ измерения нестационарного теплового потока и устройство для его осуществления/ А.Д.Маркин, О.А. Герашенко и др., - Оpubл. в В.И., 1982, №34.
5. Маркин А.Д., Панкратов Б.М. и др. Некоторые задачи механики, возникающие при моделировании входе метеоритного тела в атмосферу Земли. - Труды VI чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Циолковского, АН СССР, М., 1973, с.113-120.
6. Панкратов Б.М., Алифанов О.М., Иванов А.А., Маркин А.Д. Нестационарный нагрев и разрушение теплозащитных материалов. - В кн.: Теплообмен: Сб. докл. Всесоюзной конф., Минск, 1973, т. 2, с.309-320.
7. Панкратов Б.М., Алифанов О.М., Иванов А.А., Маркин А.Д. Исследование нестационарных режимов работы теплозащитных материалов. - Инж.- физ. журн., 1973, №2, с.36-42.
8. Маркин А.Д., Гушина Л.И. Некоторые результаты решения нелинейных обратных задач теплопроводности для многослойных стенок методом возмущений. - Изв. вузов. Энергетика, 1980, №7, с. 114-117.
9. Маркин А.Д., Гушина Л.И. Идентификация тепловых нагрузок методом возмущений. - В кн.: Методы и средства диагностики ГТД и их элементов: Сб. докл. Всесоюзной конф., Харьков, ХАИ, 1980, т.2, с. 15-17.
10. Маркин А.Д., Ханна С. Экспериментальный анализ динамических

- характеристик термопреобразователей. - Донецк, 1994. 22 с.
 (Препринт / Донецкий физико-технический институт.: ДонФТИ-94-6).
11. Илющенко В.И., Немцов Д.М., Маркин А.Д. Исследование теплоизлучения при выпуске стали. Гигиена и санитария, 1981, №3, с. 28-32.
12. Маркин А.Д., Пяташкин Г.Г., Гущина Л.И. Идентификация интенсивных тепловых потоков методом малого параметра. - В кн.: Метрологическое обеспечение температурных и теплофизических измерений в диапазоне высоких температур: Тез. докл. Всесоюзной конф., Харьков, 1983, с. 249-251.
13. Маркин А.Д., Пяташкин Г.Г., Минеев А.А. Идентификация параметров внешнего теплообмена при регулируемом охлаждении. - В кн.: Проблемы энергетики теплотехнологии: Тез. докл. Всесоюзной конф., М.: МЭИ, 1983, с.
14. Маркин А.Д. Математическая коррекция динамических ошибок при нестационарных тепловых измерениях. - В кн.: Динамика тепловых процессов: Тез. докл. Всесоюзной конф., Киев., 1980, с. 43.
15. Пяташкин Г.Г., Маркин А.Д., Гончаров Н.В. Исследование параметров теплообмена в технологическом процессе охлаждения. - В кн.: Интенсификация процессов химической и химикотехнологической обработки металлов: Тез. докл. научно-тех. конф. Челябинск, 1984, с. 42-43.
16. Маркин А.Д., Пяташкин Г.Г. О регуляризации решения обратной задачи теплопроводности в вариационной постановке. - Инж.-физ. журн., 1987, т. 52, № 6, с. 991-995.
17. Погорелов О.Е., Маркин А.Д. Идентификация параметров математической модели сложного теплообмена. - В кн. Теплофизика технологических процессов: Тез. докладов Всесоюзной конф., Ташкент, ТПИ, 1984, с. 51.
18. Маркин А.Д., Погорелов О.Е. Интегро-итерационные схемы для нелинейных задач теплофизики. - В кн.: Теплофизика технологических процессов: Тез. докл. Всесоюзной конференции., Ташкент, ТПИ, 1984, с. 35.
19. А.С. № 992926 (СССР). Устройство для регулирования соотношения топливо-воздух /В.И.Илющенко, Г.Г.Пяташкин, А.Д.Маркин и др. - Опубл. в Б.И., 1983, № 4.
20. А.С. № 981761 (СССР). Способ определения коэффициентов избытка воздуха /А.Д.Маркин, О.А.Герашенко и др. - Опубл. в Б.И., 1982, № 46.

21. А.С. № 992927 (СССР). Способ измерения расхода воздушной смеси /Ю.Л. Курбатов, Г.Р. Пятыхкин, А.Д. Маркин и др. - Оpubл. в Б.И., -1983, № 4
22. А.С. № 699360 (СССР). Устройство для измерения теплового излучения /А.Д. Маркин, В.И. Илющенко. - Оpubл. в Б.И., 1979, № 43.
23. А.С. № 1024751 (СССР). Способ измерения нестационарного теплового потока и устройство для его осуществления /А.Д. Маркин, - В.И. Илющенко и др. - Оpubл. в Б.И., 1983, № 23.
24. А.С. № 1045011 (СССР). Способ измерения нестационарного теплового потока /А.Д. Маркин, О.А. Герашенко и др. - Оpubл. в Б.И., -1983 № 36.
25. А.С. № 934255 (СССР). Способ определения коэффициента температуропроводности материала /А.Д. Маркин, В.И. Илющенко и др. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 21.
26. Markin A. Mathematicke metody zkoumani tepelných režimů ohřívacích pecí.- v: Tepelná technika a automatizace hutnických pecí: Třinec, 1977, s.186-196.
27. Markin A.D., Kurbatov I. 1 dr. Určování parametru asymetrie no obvodu ocelového plechu v průběhu valemce peci podle experimentálních údajů.- V: Tepelná technika a automatizace hutnických pecí: Třinec, 1977, s.217-223.
28. Markin A., Voronec D. za dr. Primena toplotnog fluksemetra za nestacionarna merenja.- Klimatizacija, grejanije, hladenje, Belgrad, 1982, № 2, s.32-37.
29. Markin A., Voronec D. Identifikacija nestacionarnog temperaturskog polja sa izoliranim davakima temperature. - Klimatizacija, grejanje, hladenje, Belgrad, 1982, № 4, s.25-27.
30. Markin A. On improving the dynamic characteristics of the thermal processes control systems.- V rad XXVI Jugoslovenska konferencija ETAN. Subotica, 1982,
31. Маркин А.Д. О нестационарных тепловых измерениях при управлении технологическими процессами.- Автоматизация на производстве в хранилищата и биотехнологичната промишленост: Пловдив, 1990, с.40-41
32. Маркин А.Д., Федорина В.Г. Интегральный анализ процесса окаливообразования.- Изв.АН СССР. Металлы, 1987, № 4, с.170-175.
33. Маркин А.Д., Илющенко В.И. Защита от теплоизлучения в мартеновских цехах.- Металлург, 1987, № 10, с.40-41.
34. Маркин А.Д., Погорелов О.Е. Приборное обеспечение исследований температурных полей металла.- В кн. "Республиканская конференция:

- теория и практика тепловой работы металлургических печей. Тезисы докладов." Днепронетровск, 1988, с.203.
35. Маркин А.Д., Яковенко А.Г., Калиушко Л.Н. и др. Исследование теплообмена в методических печах листопрокатного цеха Донецкого металлургического завода. - Библиотечный указатель ВИНТИ "Депонированные научные работы", 1989, № 7. 147с.
36. А.С. № 1325283 (СССР) Способ очистки подия нагревательных колодцев /А.Д.Маркин, А.Т.Яковенко и др. - Опубл. в Б.И., 1987, № 27.
37. А.С. № 1167220 (СССР). Нагревательный колодец /А.Д.Маркин, Г.Г.Пятышкин и др. - Опубл. в Б.И., 1985, № 26.
38. А.С. N 1800205 (СССР). Устройство для обогрева трубопроводов/ А.Д.Маркин и др. - Опубл. в Б.И., 1993, N 24.
39. А.С. N 1256345 Способ разогрева нагревательных колодцев футеровкой из необожженных диоксидабетонных панелей / А.Д.Маркин, А.Г.Яковенко, Л.Н. Калиушко и др. - Опубл. в Б.И., 1988, № 28.
40. Способ контроля температуры фурменной зоны /А.Д.Маркин и др. - Полож. решение №93-002718 от 18.03.93г.
41. Способ контроля разгара футеровки фурменной зоны доменной печи / А.Д.Маркин и др. - Полож. решение №93-002712 от 18.03.93г.
42. Маркин А.Д. О математической коррекции динамических характеристик датчиков тепловых потоков. - В кн.: Методы и средства диагностики ГТД и их элементов: Об. докл. Всесоюзной конф. Харьков, ХАИ, 1980, т.2, с.45-47.
43. Маркин А.Д., Алифанов О.М., Кудряшов С.В. Идентификация нестационарных тепловых потоков батарейными датчиками. - В кн.: Исследование систем обеспечения жизнедеятельности экипажей летательных аппаратов: Труды МАИ, М., 1978, Вып. 455, с.73-77.
44. Маркин А.Д. Об идентификации нестационарного теплового излучения градиентными датчиками. - В кн.: Метрологическое обеспечение температурных и теплофизических измерений в диапазоне высоких температур: Тез. докл. Всесоюз. конф. Харьков, 1983, с. 251-253.



AB 31.049
AB 31.049