

МАРКИН А.Д., ИЛЮЩЕНКО В.И., ДАНИЛЬЧЕНКО Т.А. (ДонНТУ)

ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ КАК ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛООБМЕНА

Рассмотрены проблемы общего характера, возникающие при формулировке задачи идентификации как обратной задачи теплообмена.

Первичные измерители температуры и датчики тепловых потоков (ДТП) выдают некоторую исходную информацию о поле температур (возможно, и градиентов) исследуемого объема и условиях его теплообмена с окружающей средой. Эта информация, как правило, носит неполный характер, предопределяя те параметры тепломассообмена, которые необходимо найти при обработке экспериментальных данных. В зависимости от степени исходной информативности и, соответственно, неизвестных параметров теплообмена формулируемые задачи можно разделить на несколько групп. В дальнейшем будем придерживаться укрупненной классификации, приведенной в работах Коздобы Л.А. [1] и Алифанова О.М. [2], понимая под прямыми задачами (ПЗ) — задачу определения температурного поля исследуемого объема по известным математической модели процесса и краевым условиям.

Если в постановке ПЗ не определен какой-либо из параметров теплообмена и для его определения используется некоторая дополнительная информация о поле температур исследуемого объема, то такие задачи будем называть обратными. При неизвестных условиях теплообмена — граничными обратными задачами (ОЗ), при неизвестных теплофизических характеристиках — коэффициентными ОЗ, при необходимости определения (уточнения) математической модели — индуктивными ОЗ, при неизвестном начальном поле температур — ретроспективными ОЗ и при неизвестной геометрии исследуемого объема — геометрическими ОЗ.

Практически все теплотехнологические процессы (ТПП) металлургического производства в качестве существенных составляющих включают процессы тепломассообмена и гидроаэродинамики. Во многих случаях указанные процессы являются лимитирующим звеном при разработке новых ТПП и совершенствовании существующих. Этим определяется все большее внимание, уделяемое анализу этих процессов. В основе комплексного исследования ТПП лежит системный анализ, возникший на стыке наук — кибернетики, теории информации, теории сложных систем и т.д. Используя идеи блочного принципа построения математической модели тепломассообменных процессов, происходящих при ТПП в металлургии, общую структуру математической модели можно представить в виде некоторой схемы (рис. 1). Степень детализации каждого из блоков может быть различна и определяется качественными и количественными характеристиками входной и выходной информации.

Анализ всей представленной на схеме совокупности уравнений тепломассообмена с учетом ограничений, накладываемых условиями конкретного производства технологического оборудования и т.д., задача крайне сложная даже при использовании современной вычислительной техники. Эта сложность в основном определяется не возможностями ЭВМ, а чрезвычайным усложнением математического описания каждого блока при его детальной проработке. Как правило, в такой детализации математического описания всех блоков нет необходимости. Возникающая при этом задача согласования погрешностей задания входной информации, точности математического описания отдельных блоков с необходимой точностью получения выходной информации носит крайне важный характер и должна решаться в каждом конкретном случае. Представля-

ется перспективным применение идей Д. Сполдинга и С. Патанкара для унификации описания процессов теплообмена с помощью некоторого обобщенного уравнения. В этом случае становится возможной разработка единой процедуры алгоритмизации всей совокупности уравнений, что существенно упрощает получение решения на ЭВМ. Обобщенное уравнение теплообмена имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \bar{\Phi}) + \text{div}(\rho \bar{u} \Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \Phi) + S, \quad (1)$$

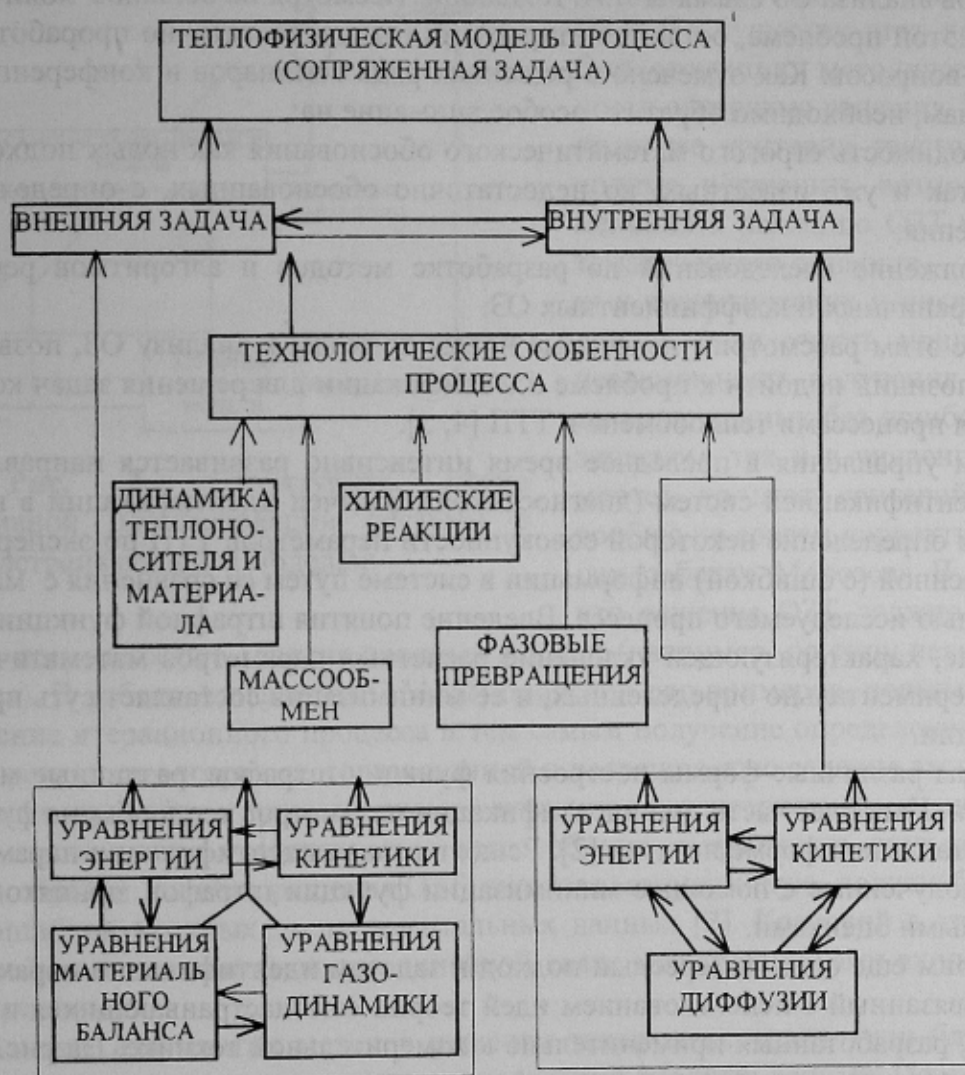


Рис. 1. Структура математической модели теплообмена в теплотехнологических процессах

где Γ — коэффициент диффузии; S — источниковый член.

Конкретный вид Γ и S зависит от физического смысла переменной Φ (например, если $\Phi \equiv T$ — температура, то $\Gamma \equiv \lambda$ — теплопроводность).

Система уравнений (1) доопределяется законом сохранения массы (уравнением неразрывности):

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \bar{u}) = 0. \quad (2)$$

Совокупность уравнений такого типа, определяющих перенос энергии, массы, количества движения и т. д., совместно с краевыми условиями и определяют математическую модель исследуемых теплообменных процессов. Во многих случаях решение ОЗ является единственной возможностью получения информации об исследуемом ТТП. При этом обычные трудности решения задач математической физики, связанные с нестационарностью, нелинейностью, многомерностью и т.д. усугубляются, как правило, некорректной математической постановкой ОЗ. Детальная классификация, оценка точности, сходимости решения и определение границ применения различных существующих методов анализа ОЗ сделаны Л.А. Коздобой. Несмотря на большое количество публикаций по этой проблеме, остаются открытыми (или недостаточно проработанными) целый ряд вопросов. Как отмечено в решениях ряда семинаров и конференций по обратным задачам, необходимо обратить особое внимание на:

1) необходимость строгого математического обоснования как новых подходов к решению ОЗ, так и уже известных, но недостаточно обоснованных, с определением границ применения;

2) продолжение исследований по разработке методов и алгоритмов решения многомерных граничных и коэффициентных ОЗ.

В связи с этим рассмотрим некоторые новые подходы к анализу ОЗ, позволяющие с единых позиций подойти к проблеме идентификации для решения задач контроля и управления процессами теплообмена в ТТП [4, 5].

В теории управления в последнее время интенсивно развивается направление, связанное с идентификацией систем (диагностикой). Задачей идентификации в нашем случае является определение некоторой совокупности параметров ТТП по экспериментально определенной (с ошибкой) информации в системе путем ее сравнения с математической моделью исследуемого процесса. Введение понятия штрафной функции в той или иной форме, характеризующей отклонение расчетных параметров математической модели от экспериментально определенных, и ее минимизация составляет суть процесса идентификации.

Возможны различные формы построения функции штрафов, различные методы ее минимизации. Наиболее часто при идентификации параметров теплообмена функция штрафов представлена в форме невязки [2]. Решения задач идентификации параметров теплообмена, полученные с помощью минимизации функции штрафов, принято называть оптимальными оценками.

Рассмотрим еще один интересный подход к задачам идентификации параметров теплообмена, связанный с использованием идей теории самонастраивающихся и адаптивных систем, разработанных применительно к измерительной технике. На рис. 2 показана структурная схема адаптивной идентификации системы с самонастраивающейся моделью. В адаптивных системах происходит сравнение измеренной реакции системы на некоторое входное воздействие (экспериментальных данных) с расчетными параметрами системы и формирование функции штрафа (например, в форме невязки). Алгоритм адаптации самонастраивающейся модели должен обеспечить окончание итерационного процесса по заданному критерию. Суммируя вышеизложенное, цель настоящей работы можно представить в следующей формулировке: на базе идей системно-структурного анализа и теории самонастраивающихся систем разработать единый подход к идентификации теплообменных процессов металлургического производства, позволяющий дать оптимальную оценку параметров нелинейных многомерных математических моделей, контроль и управление ТТП [4] в реальном времени.

Выбор оптимального по многим показателям (иногда взаимоисключающим) метода решения некоторой задачи теплообмена (обратной или прямой) является крайне сложной и, вероятно, на современном этапе недостижимой задачей.

Представляются наиболее наглядными критерии, предложенные в работах Бека [6], для оценки методов решения обратной задачи теплопроводности (ОЗТ). Предложенные 16 критериев подробно прокомментированы в работе [1], в которой подчеркивается, что три критерия из шестнадцати имеют наиболее существенное значение. Ос-

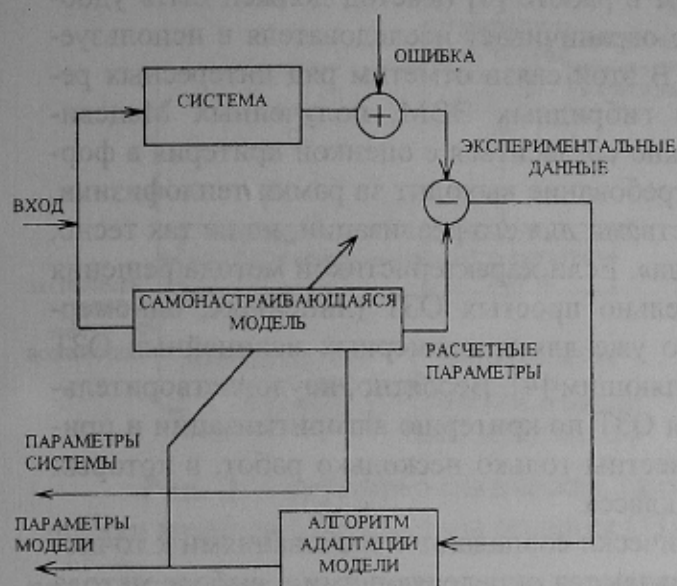


Рис. 2. Структурная схема адаптивной идентификации системы с самонастраивающейся моделью

тановимся несколько подробнее на этих критериях и сделаем некоторые замечания по их существу [4, 7].

1. Точные исходные данные должны приводить к точным решениям ОЗТ. По существу этот критерий требует отсутствия методической погрешности алгоритма решения. Применяя на практике критерии такого рода, необходимо исключить возможность применения к решению ОЗТ мощного математического аппарата — приближенных аналитических и численных методов. А если учесть принципиальную невозможность получения экспериментальных данных без ошибок (как в физическом, так и в численном эксперименте), то этот критерий становится вообще не совсем корректным. Во многих работах Морозова В.А. показано, что решение ОЗТ должно быть согласо-

совано с погрешностью задания входных данных (например, по типу невязки в форме равенства). В работе Алифанова О.М. [2] приведен ряд примеров, показывающих, что ограничение итерационного процесса и тем самым получение определенной методической погрешности алгоритма, согласованной с погрешностью задания экспериментальных данных, приводит к существенному улучшению характеристик решения ОЗТ.

В связи с этим представляется целесообразным трактовать этот критерий следующим образом: ошибка решения ОЗТ, включая методическую, должна быть согласована с ошибкой входных экспериментальных данных [7]. Критерий в этой формулировке требует в идеальном случае линейной связи между ошибками входных в ОЗТ и выходных данных.

Однако, для многих методов решения такая зависимость (или близкая к ней) реализуется только в малом диапазоне возмущений входных данных. Поэтому одной из задач предварительного анализа и является поиск области применения исследуемого метода.

2. Погрешность экспериментальных данных не должна сказываться на характеристиках метода решения ОЗТ. Это требование, как отмечено в работах [6], одно из самых важных и требует тонкой оценки исходных данных, возможности их сглаживания и т. д. Учитывая важность этого требования для получения решения практических ОЗТ, следует на стадии исследования характеристик алгоритма предусмотреть процедуру оценки его качества по этому критерию.

3. Требование устойчивости метода при малых временных интервалах исследования ОЗТ также относится к числу наиболее существенных [5, 6]. Так же, как и в предыдущем случае, оценка качества алгоритма по этому критерию (фактически определение границ применения) должна быть предусмотрена на стадии исследования его характеристик.

4. Необходимо добавить к этим существенным критериям еще один, во многом определяющий возможность получения решения сложных ОЗТ (нелинейных, многомерных и т.д.) с использованием современных средств вычислительной техники. Таким критерием можно считать простоту алгоритмизации применительно к ЭВМ. Этот критерий несколько шире предложенного Беком в работе [6] («метод должен быть удобным для программирования»), поскольку не ограничивает исследователя в используемой вычислительной технике только ЭВМ. В этой связи отметим ряд интересных результатов решения ОЗТ на аналоговых и гибридных ЭВМ, полученных Мацевичем Ю.М., Коздобой Л.А. и др. Вряд ли можно согласиться с оценкой критерия в формулировке Бека, данной в работе [1]: «Это требование выходит за рамки теплофизики, как метод решения, конечно, связан со средствами для его реализации, но не так тесно, чтобы предопределять дееспособность метода». Если характеристикой метода решения по критерию алгоритмизации для относительно простых ОЗТ (линейных, одномерных...) действительно можно пренебречь, то уже для многомерных нелинейных ОЗТ этот критерий становится во многом определяющим [4]. Вероятно, неудовлетворительные оценки существующих методов решения ОЗТ по критерию алгоритмизации и привели к тому, что к настоящему моменту известны только несколько работ, в которых представлены примеры решения задач этого класса.

Остальные критерии работы [6] практически совпадают с требованиями к точности решения ОЗТ работ Коздобы Л.А. и не являются определяющими в выборе метода решения.

Установить соответствие различных методов решения ОЗТ перечисленным критериям возможно только экспериментальным путем. В соответствии с общепринятой схемой классификации экспериментов можно выделить натурные, модельные и модельно-кибернетические (машинные) эксперименты. Натурный эксперимент предполагает воздействие непосредственно на объект исследования, в модельном — средства экспериментального исследования взаимодействуют с некоторой моделью объекта (физической моделью). Фактически модельно-кибернетический эксперимент можно считать разновидностью модельного, при котором под моделью следует понимать некоторую совокупность уравнений, описывающих реакцию исследуемого объекта на экспериментальное воздействие. Такая совокупность уравнений называется математической моделью (ММ). Например, придерживаясь классификации работы [1], ММ 1-го рода включает уравнения основных процессов (движения, теплопроводности, массопереноса и т.д.) и уравнения для краевых (граничных и начальных) условий. Таким образом, под модельно-кибернетическим экспериментом можно понимать математическое моделирование, неразрывно включающее как процесс составления ММ, так и собственно процесс ее экспериментального исследования.

Задачи, которые стоят на стадии экспериментального исследования ММ и методов ее решения, можно условно разделить на две группы. К первой можно отнести задачу установления адекватности ММ исследуемому процессу, ко второй — оценку качества выбранного метода решения по перечисленным критериям. На рис. 3 показана структурно-логическая схема, позволяющая на стадии экспериментального исследования ММ и метода решения ответить на эти вопросы. Остановимся более подробно на некоторых вопросах практической реализации представленной структурно-логической схемы.

Первой задачей, решаемой после составления новой ММ, является задача установления ее адекватности исследуемому процессу. Распространены два подхода к решению этой задачи. Первый связан с постановкой натурального и машинного экспериментов и сравнением полученных результатов. Учитывая сложность (а иногда и уникальность) постановки в большинстве случаев натурального эксперимента, этот вариант непо-

средственного установления адекватности ММ используется редко. Чаще используются экспериментальные данные некоторого аналогичного объекта исследования для оценки такого рода (аналогия может быть и частичной, например: установление адекватности нелинейной ММ в линейном диапазоне изменения некоторых параметров).

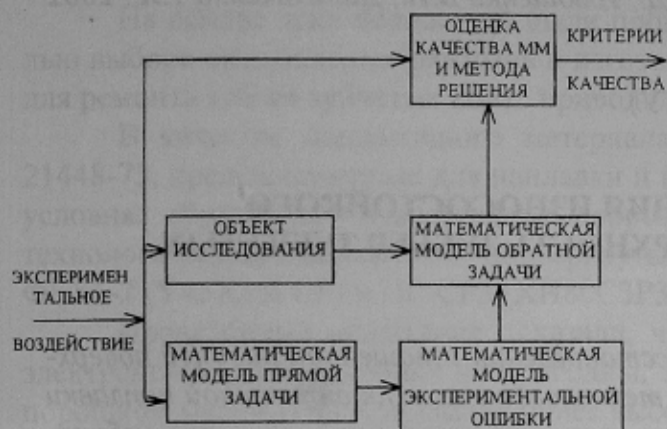


Рис. 3. Структурно-логическая схема оценки качества ММ и метода решения ОЗТ

результатов экспериментальных исследований и их обработки с использованием ММ в условиях, отличающихся от условий сравнения.

Этот же подход используется и при решении второй задачи, решаемой после составления ММ: задачи выбора метода решения и оценки его качества по выбранным критериям.

Вопрос выбора и понятия «точных» решений достаточно полно отражен в работах [1,6]. Придерживаясь той же трактовки, под «точными» решениями будем понимать как аналитические решения, полученные для некоторых частных случаев, так и численные, полученные с точностью, удовлетворяющей расчетчика. Под «точным» решением можно также понимать и экспериментальные данные, полученные непосредственно на объекте исследования.

В дальнейшем при оценке разработанных методов решения ОЗТ необходимо использовать все перечисленные варианты установления адекватности ММ и оценки метода решения.

В качестве точных решений успешно используются также аналитические решения уравнения теплопроводности.

Таким образом, проведенный выше анализ проблемы диагностики высокоинтенсивных тепловых процессов черной металлургии позволил сформулировать ее как обратную задачу теплообмена с конкретизацией критериев оценки точности как математических моделей, так и методов их решения.

Список литературы

1. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. — М.: Наука, 1975. — 228 с.
2. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1979. — 216 с.
3. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. — Ленинград: Энергия, 1976. — 352 с.
4. Маркин А.Д. Нестационарная диагностика теплотехнологических процессов черной металлургии. — Донецк, 1993. — 16 с.
5. 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.-Санкт-Петербург, 1994.

6. Beck J.V. Criteria for comparison of methods of colution of the inverse heat conduction problem. — Nucl. Eng. And Des, 1979. 53. — № 1. — P. 11–22.

7. Markin A.D. On improving the dynamic characteristics of the thermal processes control systems. — Rad. XXVI Jugoslovenska konferenzija ETAN. — Subotica., 1982. — P. 71–77.

© Маркин А.Д., Илюшенко В.И., Данильченко Т.А., 2002

ОНИЩЕНКО В.П., КОРИЦКИЙ Г.Г. (ДонНТУ)

СПОСОБ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ НА ИЗНОШЕННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Предложен метод избирательного восстановления изношенной рабочей поверхности зубьев зубчатых колес с применением технологии электроконтактной наплавки износостойких порошков. Изготовлена и испытана опытная установка для избирательного ремонта зубьев зубчатых колес редукторов тяжело нагруженных машин.

Восстановление работоспособности рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес тяжело нагруженных машин занимает особое место в области ремонта деталей машин из-за сложности формы профиля и высокого уровня требований, предъявляемых к качеству поверхности. К наиболее известным методам восстановления относятся: метод ротационного деформирования, электродуговая наплавка износостойкого слоя, замена зубчатого венца, а также наплавка износостойких порошков. Наиболее предпочтительным является последний способ, так как он не связан с большими затратами энергии на пластическое деформирование зубьев, расплавление значительного объема материала, на нарезание зубьев на новом венце. Дальнейшим шагом по снижению затрат энергии при наплавке порошков на рабочую поверхность зубьев является использование электроконтактного нагрева рабочей зоны [1]. Ввиду возможности локального наращивания изношенной поверхности метод электроконтактной наплавки износостойких порошков (ЭКНП) позволяет обеспечить избирательный ремонт рабочей поверхности зуба, что сводит к минимуму последующую обработку восстановленной поверхности.

При применении метода ЭКНП можно выделить следующие основные этапы:

— нанесение на очищенную и обезжиренную ремонтируемую поверхность соответствующей композиции износостойких порошков со связующим составом, обеспечивающим удержание композиции в рабочей зоне до ее приплавки;

— создание с помощью электрода-обкатника, имеющего форму зубчатого колеса и изготовленного из бронзы, требуемых значений удельных давлений в контактной зоне;

— включение (при электроде, неподвижном относительно ремонтируемой поверхности) сварочного тока заданной силы, обеспечивающей требуемое количество энергии в импульсе;

— отключение сварочного тока после пропускания заданного числа серий из установленного числа импульсов и перемещение (с выдержкой после отключения тока) электрода в новую зону контакта на расстояние, превышающее определенное минимальное значение;

— повторение процесса ЭКНП до тех пор, пока расстояние между зонами наплавки не будут меньше ширины герцовой полоски контакта;

— нанесение нового слоя порошковой композиции и повторение вышеописанного процесса до достижения заданной полной толщины слоя, наплавляемого на ремонтируемую поверхность.