

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В МНОГОФАЗНЫХ РЕАГИРУЮЩИХ СРЕДАХ И ТЕОРИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ**А.М. Гришин, А.Я. Кузин***Томский государственный университет, Томск, Россия*

Известно, что лес представляет собой многоярусную многофазную реагирующую среду [1], степь является одноярусной реагирующей средой [2], а торф – пористое реагирующее твердое тело [3]. Прямые задачи теории природных пожаров формулируются следующим образом: известны размеры контрольного объема, даны значения параметров состояния среды на его границах и в начальный момент времени. Требуется определить положение фронта горения, а также поля температур и концентраций компонентов продуктов горения в любой момент времени внутри контрольного объема. При решении прямых задач используются коэффициенты теплопроводности и диффузии, а также порядки, энергии активации, предэкспоненциальные множители реакций горения и массовые скорости фазовых переходов. Эти параметры заранее неизвестны, и для их определения используются методы решения обратных задач кинетической теории газов и математической физики. При этом берутся экспериментальные данные по полям скоростей, температур и концентраций и на основе метода регуляризации академика А.Н. Тихонова [4] решаются обратные задачи по определению искомым коэффициентов переноса и термокинетических постоянных (ТКП).

В данной работе приводятся методики и конкретные решения некоторых обратных кинетических задач теории природных пожаров. В частности, на основе экспериментальных данных предложена методика определения скорости сушки растительных горючих материалов (РГМ) [5–7]. Наряду с методиками решения обратных задач на основе метода регуляризации академика А.Н. Тихонова [4] обсуждается метод определения параметров сушки РГМ в изотермических условиях. Кроме того рассматривается задача об определении термокинетических постоянных гетерогенных химических реакций. Утверждается, что только с использованием методик решения обратных задач теплофизики и химической кинетики можно создать достаточно точные базы данных для математических моделей природных пожаров и на этой основе получать численные решения прямых задач теории этих пожаров. Обсуждаются некоторые проблемные вопросы теории обратных задач теплофизики реагирующих сред.

Классификация обратных задач механики реагирующих сред. Круг обратных задач механики реагирующих сред достаточно широк и многообразен ввиду широты и многообразия математических постановок прямых задач механики реагирующих сред. Кроме того, каждая прямая задача механики реагирующих сред в пределах принятой структуры математической модели может быть сопоставлена с некоторой обратной задачей.

Можно выделить следующие типы обратных задач:

- 1) ретроспективные задачи теплопроводности, или задачи с обратным временем, – нахождение распределений температуры в предыдущие моменты времени (установление предыстории данного теплового состояния);

- 2) граничные обратные задачи – восстановление условий на границе тела (температура и тепловой поток на поверхности, коэффициент теплоотдачи и т.п.). К этому типу можно отнести также задачи, связанные с продолжением решения уравнения теплопроводности от некоторой границы, где одновременно заданы температура и тепловой поток;
- 3) коэффициентные обратные задачи – определение коэффициентов уравнения переноса тепла;
- 4) геометрические обратные задачи, состоящие в нахождении геометрических характеристик нагреваемого тела, например, закона движения теплообменной границы по результатам изменений температуры внутри тела;
- 5) обратные задачи химической кинетики – определение термокинетических постоянных гетерогенных и гомогенных химических реакций;
- 6) обратные задачи теории сушки природных горючих материалов;
- 7) обратные задачи теории катастроф, когда по последствиям природной, техногенной или социальной катастрофы устанавливают ее причину [8, 9].

Возможны комбинированные постановки обратных задач, когда одновременно определяются причинные характеристики разных типов, например, может быть комбинация граничной и ретроспективной обратных задач, граничной и коэффициентной обратных задач, граничной и геометрической обратных задач и т.д.

В общем случае обратные задачи в зависимости от используемой модели процесса и вида области изменения независимых переменных делятся на одномерные и многомерные, линейные и нелинейные, с фиксированными и подвижными границами, односвязные многосвязные. Задача определения какой-либо причинной характеристики может быть переопределена, т.е. задано не одно, а несколько дополнительных условий.

Детальный анализ существования, единственности и устойчивости обратных задач теплообмена дан в работах О.М. Алифанова с соавторами (см., например, [10]).

Универсальный алгоритм решения комплексной обратной задачи. Для повышения точности расчетов в механике реагирующих сред в настоящее время используются все более сложные постановки задач. Усложнение идет, как правило, в направлении более полного и детального учета структуры и многообразия физико-химических превращений, использования сопряженных, а также двух- и трехмерных постановок задач. Однако решение этих задач сдерживается отсутствием или недостатком информации о теплофизических коэффициентах, термокинетических постоянных гетерогенных и гомогенных химических реакций, потоков тепла и массы на поверхности реагирующего тела. Для определения указанных характеристик целесообразно применять методы решения обратных задач, поскольку они повышают достоверность, точность и информативность исследований.

Наиболее предпочтительной представляется следующая схема исследования сложных обратных задач [11]: 1) на основе анализа физико-химической модели процессов записывается наиболее полная математическая модель; 2) с использованием теории размерностей и подобия выявляются наиболее существенные факторы и с учетом затрат времени исследователя и ПЭВМ записывается оптимальная, компромиссная математическая модель; 3) производится поиск имеющихся литературных данных, планируются и проводятся лабораторные опыты на образцах исследуемых материалов в условиях, по возможности близких к натурным с целью определения неизвестных характеристик и получения информации для оценки адекватности математической модели; 4) ставятся и решаются соответствующие частные обратные задачи; 5)

решается прямая задача с использованием полученных коэффициентов переноса и термокинетических постоянных; полученное решение сравнивается с натурными и модельными экспериментальными данными.

Решение прямой и обратной кинетической задач процесса сушки ЛГМ. Изучение процесса сушки горючих материалов имеет большое теоретическое и практическое значение. Считается, что вода может быть связана с материалом химически, физико-химически и физико-механически. При этом наибольшей энергией связи обладает химически связанная вода, которая при сушке не удаляется. В работе [1] на основе анализа характерных времен многостадийного процесса испарения показано, что для лесных горючих материалов (ЛГМ) (хвоинок и тонких хвоинок) выполняются неравенства

$$t_{ev} \gg t_t, \quad t_{ev} \gg t_f, \quad t_{ev} \gg t_d, \quad t_{ev} \gg t_e. \quad (1)$$

На основании этого утверждается, что стадией, лимитирующей испарение воды из ЛГМ, является десорбция. Для ее математического описания используется аналог формулы, выражающей закон Герца–Кнудсена

$$(p\nu)_w = \frac{AM(P_* - P)}{\sqrt{2\pi MRT}}, \quad P_* = P_0 \exp\left(-\frac{L}{RT}\right). \quad (2)$$

Поэтому, используя формально-кинетический подход, считается, что испарение воды из некоторого фиксированного элемента ЛГМ с массой m описывается следующей математической моделью:

$$\frac{dm}{dt} = -\frac{kP_*(m - m_\infty)(1 - \varphi)}{\sqrt{T}}, \quad (3)$$

$$m|_{t=t_{in}} = m_{in}. \quad (4)$$

Иногда математическую модель (3), (4) записывают через влагосодержание $W(t) = \Delta m / m_{dr}$, $\Delta m = m - m_{dr}$.

Нахождение массы или влагосодержания образца по известным начальному условию и параметрам модели составляет цель прямой кинетической задачи (ПКЗ). Цель обратной кинетической задачи (ОКЗ) состоит в определении кинетических характеристик kP_0 , L по известным начальному условию, остальным параметрам модели и массе или влагосодержанию образца. Решение ОКЗ в отличие от ПКЗ представляет определенные математические трудности вследствие ее некорректности. Некорректность проявляется, как правило, в отсутствии устойчивости либо единственности решения при одновременном определении двух и более кинетических параметров. Поэтому актуальной задачей является разработка численного алгоритма, позволяющего получить устойчивое решение ОКЗ с приемлемой для практики точностью.

Будем определять искомые кинетические характеристики из условия согласования экспериментальных и расчетных (по математической модели (3), (4)) значений массы образца исследуемого материала для различных моментов времени t . Для определения кинетических характеристик процесса сушки образец из исследуемого материала выдерживается при различных температурах стабилизации T_s до равновесного

состояния, при котором его масса перестает изменяться $m = m_\infty$. При этом одна и та же температура стабилизации может достигаться при различных относительных влажностях окружающего воздуха φ .

Аналитическое решение задачи (3), (4) имеет вид:

$$\ln \frac{m_{in} - m_\infty}{m - m_\infty} = \frac{kP_0 \exp(-\frac{L}{RT})(1 - \varphi)t}{\sqrt{T}}. \quad (5)$$

Искомые кинетические характеристики kP_0 и L определяем из условия минимума функционала

$$I(B, L) = \int_{t_{in}}^{t_{fin}} \sum_{i=1}^N (F_1^i - B \exp(-\frac{L}{RT_{si}}) F_2^i)^2 dt, \quad (6)$$

представляющего среднеквадратичное отклонение невязки уравнения (5) на рассматриваемом временном интервале $[t_{in}, t_{fin}]$, при подстановке в него экспериментальных зависимостей $m_i^{exp}(t)$, полученных для i температур стабилизации T_{si} . ($i = \overline{1, N}$), где

$$F_1^i(m_i, m_{ini}, m_{\infty i}) = \ln \frac{m_{ini} - m_{\infty i}}{m_i - m_{\infty i}}; \quad F_2^i(m_i, m_{\infty i}, \varphi_i, T_{si}, t) = \frac{(1 - \varphi_i)t}{\sqrt{T_{si}}}, \quad B = kP_0.$$

Анализ предлагаемого алгоритма показывает, что для получения единственного решения рассматриваемой ОКЗ необходимо использовать как минимум две температуры стабилизации.

Используя необходимые условия экстремума функции $I(B, L)$ из (6), имеем:

$$\partial I / \partial B = 0, \quad \partial I / \partial L = 0. \quad (7)$$

В результате выполнения (7) предэкспоненциальный множитель B определяется из алгебраического соотношения

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N \exp(-\frac{L}{RT_{si}}) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} F_1^i F_2^i dt}{[\sum_{i=1}^N \exp(-\frac{2L}{RT_{si}}) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} (F_2^i)^2 dt]}, \quad (8)$$

а теплота испарения моля связанной с веществом воды L – из трансцендентного уравнения

$$\sum_{i=1}^N T_{si}^{-1} \exp(-\frac{L}{RT_{si}}) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} F_1^i F_2^i dt - B \sum_{i=1}^N T_{si}^{-1} \exp(-\frac{2L}{RT_{si}}) \int_{t_{in}}^{t_{fin}} (F_2^i)^2 dt = 0. \quad (9)$$

Интегралы в (8), (9) вычисляются по формуле Симпсона, а трансцендентное уравнение (9) ввиду немонотонной зависимости $I(L)$ целесообразно решать методом хорд, либо методом деления отрезка пополам. Для интерполяции и аппроксимации расчетных и

экспериментальных данных используются интерполирующие и аппроксимирующие кубические сплайны. При необходимости заданные с ошибкой экспериментальные зависимости $m_i^{\text{exp}}(t)$ сглаживаются с помощью эффективного метода регуляризации А. Н. Тихонова. Оценка устойчивости предлагаемого алгоритма, а также единственности и точности найденного решения осуществляется путем сравнения расчетных $m_i(t)$ и возмущенных экспериментальных $m_i^{\text{exp}}(t)$ зависимостей массы образца от времени. При этом $m_i(t)$ определяются по соотношению (5) с найденными из решения ОКЗ кинетическими характеристиками B, L .

Анализ экспериментальных данных, полученных В.И. Жуковской из Института леса и древесины им. В.Н. Сукачева СО АН СССР, показал, что процесс сушки некоторых ЛГМ (опад хвои, лишайника, мох Шребера, опад Вейника) происходит в две стадии. Причем первая стадия процесса высыхания идет с некоторой примерно постоянной скоростью с длительностью, значительно меньшей времени всего процесса. В этом случае кинетические постоянные B, L первой стадии находятся из выражений

$$L = \frac{RT_{s1}T_{s2}}{T_{s1} - T_{s2}} \ln \frac{F_1^1 F_2^2}{F_1^2 F_2^1}, \quad (10)$$

$$B = \frac{F_1^1}{F_2^1} \exp\left(\frac{L}{RT_{s1}}\right),$$

которые получаются в результате решения системы уравнений, полученной при записи решения ПКЗ (5) для двух температур стабилизации в момент смены стадий t_1 . Для второй стадии режима сушки используется вышеизложенная методика, согласно которой кинетические характеристики B, L определяются из (8), (9), в которых положено: $t_{\text{fin}} = t_1$, $m_{\text{in1}} = m_1(t_1)$, $m_{\text{in2}} = m_2(t_1)$.

В работе [5] вышеизложенная методика определения кинетических характеристик процесса сушки горючих материалов была численно апробирована на модельном и реальных ЛГМ. При апробации методики на модельном ЛГМ вначале была решена ПКЗ при значениях параметров: $T_{s1} = 273 \text{ K}$, $T_{s2} = 293 \text{ K}$, $\varphi_1 = \varphi_2 = 0.4$, $W_{\text{in1}} = W_{\text{in2}} = 0.25$, $W_{\infty 1} = 0.15$, $W_{\infty 2} = 0.113$; для первой стадии – $B_1 = 1.3 \cdot 10^2 \text{ c}^{-1} \cdot \text{K}^{1/2}$, $L_1 = 29000 \text{ Дж/моль}$; для второй стадии – $B_2 = 2.8 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1} \cdot \text{K}^{1/2}$, $L_2 = 43000 \text{ Дж/моль}$. Рассчитанные зависимости влагосодержания от времени показаны на рис. 1 сплошными кривыми а. Полученные таким образом зависимости влагосодержания от времени использовались затем в качестве исходных “экспериментальных” данных при решении ОКЗ.

Поскольку любые экспериментальные значения задаются с неминуемой погрешностью, исследовалось влияние этой погрешности на решение ОКЗ. Для этого на “экспериментальные” данные влагосодержания накладывались возмущения, распределенные по равномерному закону (кривые г на рис. 1) с текущей относительной погрешностью 3 %. В результате решения ОКЗ были получены следующие значения кинетических характеристик второй стадии: $B_2 = 2.222 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1} \cdot \text{K}^{1/2}$, $L_2 = 42707 \text{ Дж/моль}$. Погрешности определения B_2 и L_2 составила 20.6 % и 0,7 % соответственно. С полученными значениями кинетических характеристик была решена ПКЗ и определены расчетные зависимости влагосодержания от времени (кривые б на рис. 1). Максимальное отличие исходных невозмущенных и расчетных значений влагосодержания не превысило 2.5 %, что меньше погрешности исходных

экспериментальных данных. Таким образом, численная апробация предложенного алгоритма показала, что он является устойчивым, а погрешность определения кинетических характеристик оказалась пропорциональной погрешности исходных экспериментальных данных. Кривые 1 и 2 на рис. 1 относятся к двум различным температурам стабилизации.

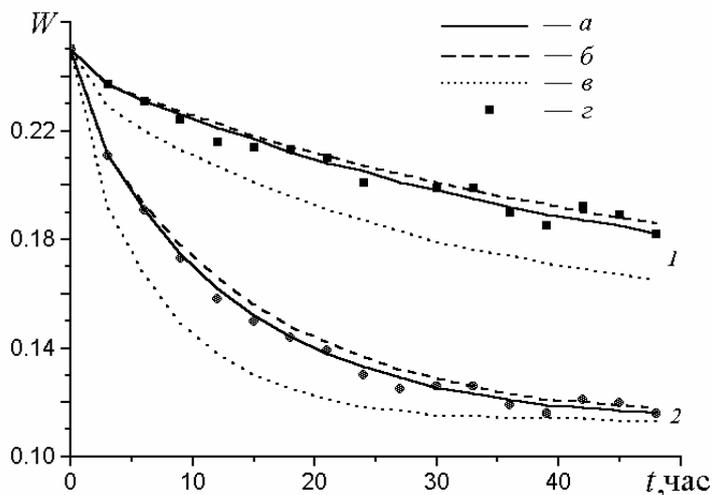


Рис. 1. Зависимость влагосодержания от времени: а, б, г – исходные невозмущенные (а, б) и возмущенные (г) “экспериментальные” данные; в – расчетные зависимости, показывающие влияние погрешности определения кинетических характеристик на влагосодержание

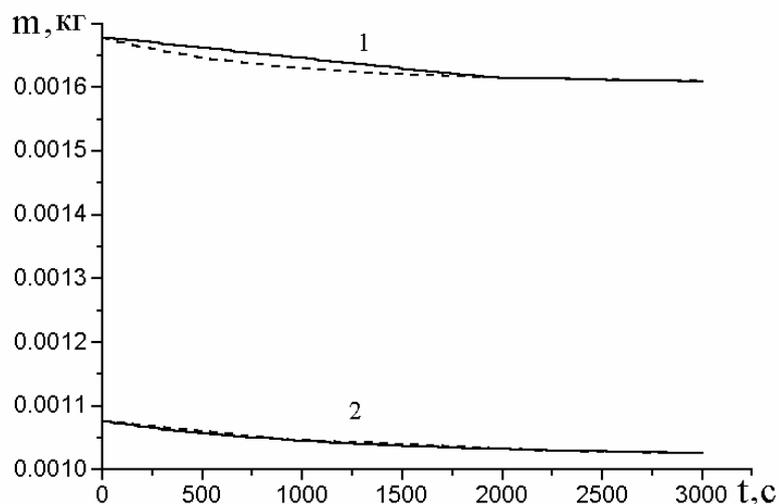


Рис. 2. Зависимость массы торфа от времени: $T_{s1} = 331$ К, $\varphi_1 = 84\%$,
 $T_{s2} = 363$ К, $\varphi_2 = 82\%$

Исследование влияния относительной влажности окружающей среды на влагосодержание показало, что ее необходимо учитывать при решении прямых и обратных кинетических задач. На рис. 1 кривые а получены для относительной влажности окружающей среды $\varphi = 0,4$, а кривые в – при $\varphi = 0$. Видно, что максимальное отличие в значениях влагосодержания достигает 20 %.

Используя экспериментальные данные В.И. Жуковской, по вышеизложенному алгоритму были получены кинетические характеристики двухстадийного процесса сушки лишайника, мха Шребера, опада хвои, опада Вейника [5]. Расчетные и экспериментальные зависимости хорошо согласуются, что говорит об удовлетворительной точности полученных кинетических характеристик сушки исследуемых ЛГМ.

Далее, используя экспериментальные данные, полученные в лаборатории теории лесных пожаров механико-математического факультета Томского госуниверситета профессором А.Н. Головановым, по вышеизложенному алгоритму решения ОКЗ были получены кинетические характеристики процесса сушки торфа. На рис. 2 показаны типичные зависимости массы образцов от времени для двух различных температур стабилизации и относительных влажностей воздуха. Полученные значения ТКП для данного опыта: $B_1 = 3.091 \cdot c^{-1} \cdot K^{1/2}$, $L_1 = 9594$ Дж/моль. Сравнение теоретических (штриховые) и экспериментальных (сплошные линии) зависимостей массы образцов от времени показало их удовлетворительное согласие, что косвенно подтверждает их достоверность. Тем не менее значительный разброс в значениях кинетических характеристик, полученных на основании данных различных опытов, говорит о сложности механизма процесса сушки торфа, что требует дальнейшего более детального физического и математического моделирования этого процесса и увеличения объема экспериментальных данных.

Определение термокинетических постоянных гетерогенных и газофазных химических реакций. Прямой термокинетической задачей (ПТКЗ) гетерогенно-гомогенного воспламенения называется численное решение сопряженной задачи тепломассообмена, заключающейся в определении полей искомых функций и их потоковых величин на границе газовой и конденсированной фаз, а также макрохарактеристик воспламенения (времени и предела воспламенения) при заданных начальных и граничных условиях в зависимости от ТКП гетерогенных и гомогенных химических реакций: энергии активации E , теплового эффекта q , предэкспонента k_0 и порядка реакции ν . Обратная термокинетическая задача (ОТКЗ) гетерогенно-гомогенного воспламенения состоит в нахождении интенсивности гетерогенных (гомогенных) источников (стоков) тепла, которая на рассматриваемом временном интервале обеспечивает минимум среднеквадратичному отклонению экспериментальных и расчетных температур или невязки уравнения баланса энергии на границе раздела газовой и конденсированной фаз

$$q_w^g + q_w^{get} + q_w^R + q_w^{etc} = q_w^s \quad (11)$$

Здесь q_w^g , q_w^{get} , q_w^R , q_w^s , q_w^{etc} – плотности тепловых потоков из газовой фазы (q_w^g) и за счет гетерогенных химических реакций (q_w^{get}) на границе, плотность радиационного теплового потока (q_w^R), плотность теплового потока в твердое тело (q_w^s) и прочие плотности теплового потока (q_w^{etc}) соответственно. При аналитическом решении ПТКЗ с использованием, например, для твердого тела преобразования Лапласа, а для газовой фазы известного метода Мексина зависимость плотности теплового потока от гетерогенных либо гомогенных источников будет явной. Это существенно упрощает решение ОТКЗ, поскольку в ряде случаев его удастся получить в явном виде и доказать существование и единственность. Поскольку функциональная зависимость скорости химической реакции от температуры, как правило, определяется законом Аррениуса, то решение ОТКЗ фактически сводится к определению эффективных ТКП E_i , q_i , k_{oi} , ν_i .

При невозможности получения аналитического решения ПТКЗ эффективные ТКП можно определить численно, минимизируя среднеквадратичные отклонения экспериментальных и расчетных температур или невязки уравнения баланса энергии на границе раздела сред одним из эффективных градиентных методов. В отличие от известного метода «спрямления» для применения вышеизложенных способов достаточно иметь как минимум одну осциллограмму температуры поверхности от времени, что существенно сокращает экспериментальную и теоретическую части работы, поскольку в методе «спрямления» необходимо получать и проверять аналитическую формулу для времени воспламенения и проводить большое количество опытов для экспериментального определения этого времени. Тем не менее, к достоинствам метода «спрямления», несмотря на его трудоемкость, следует отнести высокую надежность.

Методология комплексного исследования теплофизических и термокинетических характеристик реагирующих композиционных материалов. Для повышения достоверности, информативности и экономичности исследований по определению теплофизических и термокинетических характеристик реагирующих композиционных материалов условия проведения экспериментов должны быть близки к эксплуатационным по температуре и темпу нагрева и базироваться на методах решения обратных задач. Вследствие некорректности обратных задач для получения устойчивых решений требуются специальные итерационные регуляризирующие алгоритмы. Единственность решений обратных задач для сложных математических моделей достигается за счет использования физически обоснованных нулевых приближений, в качестве которых могут использоваться, например, аналитические и приближенные решения таких задач для простых математических моделей исследуемых физико-химических процессов [12-14].

В работе предлагается следующая схема комплексного исследования теплофизических свойств и кинетических характеристик реакции термодеструкции [13]. Выделяются две стадии режима нестационарного нагрева композиционных материалов: до термодеструкции и после ее начала. До термодеструкции исследуемый материал можно рассматривать как инертное вещество и определять теплопроводность λ , теплоемкость c и тепловую активность $\varepsilon = \sqrt{\lambda \rho c}$ по температурным полям при известных параметрах газового потока с использованием известных аналитических решений [14] (здесь ρ – плотность материала). Одновременно по известным значениям температуры газового потока T_e , температуры поверхности $T_w(t)$ и коэффициента тепловой активности ε чувствительного элемента датчика теплового потока из решения обратной задачи определяется коэффициент теплоотдачи α . Методы решения граничных обратных задач позволяют находить этот коэффициент и в случае, если температура задана не на границе, а в некоторой внутренней точке чувствительного элемента [6]. Поскольку с увеличением темпа нагрева начало термодеструкции сдвигается в область более высоких температур, то, проводя эксперименты при различных темпах нагрева образцов, удастся установить влияние этого фактора на теплофизические характеристики (ТФХ) вещества.

Вторая стадия режима нестационарного нагрева – деструкция полимерного связующего. Для изучения этой стадии используется прием расщепления по физическим и химическим процессам с помощью метода стабилизированных состояний. ТФХ можно определить как по методикам, применяемым на стадии инертного нагрева, так и из решения коэффициентной обратной задачи с выполнением условий, обеспечивающих их единственность. Устойчивость решения достигается за счет итерационной регуляризации, параметром которой является номер итерации в

используемом методе минимизации (метод скорейшего спуска, метод сопряженных градиентов и т.д.), согласованный с уровнем погрешности экспериментальных данных. С учетом экспериментальных зависимостей плотности материала $\rho(t)$ при различных температурах стабилизации из уравнения химической кинетики методом спрямления определяются кинетические характеристики термодеструкции (энергия активации E , предэкспонент k_0 , порядок реакции ν). С помощью другой приближенной методики, основанной на теории релаксационных процессов в разлагающихся материалах [13], находятся ТКП E , qk_0 , ν . Из сопоставления результатов расчетов по этим двум методикам определяется тепловой эффект реакции термодеструкции Q . Применение вышеупомянутых методик для различных темпов нагрева позволяет учесть его влияние на теплофизические параметры. Это выгодно отличает данный подход от методик, основанных на экспериментальных данных, полученных на дериватографе в изотермических условиях при сравнительно невысоких темпах нагрева.

Полученные таким образом приближенные значения искомым характеристик используются в качестве нулевых приближений в полной математической модели $A_h(w)u = f_\delta$, учитывающей все перечисленные выше физические и химические процессы в материале при одностороннем нагреве в потоке газа. Здесь w , u – некоторая совокупность определяемых величин; A_h – разностный оператор; f_δ – исходные экспериментальные данные, заданные с погрешностью δ . Если мера адекватности, определяемая как $\eta_\delta(A) = \sup_{f_\delta \in F_0} \inf_{u \in U} \|A_h u - f_\delta\|$, где $F_0 \in F$ – некоторое множество

возможных состояний исследуемых процессов, которое должно быть описано данной математической моделью, больше предельно допустимой погрешности моделирования, то параметры идентифицируемой математической модели необходимо уточнять с помощью с помощью методов решения коэффициентных обратных задач и обратных задач химической кинетики. На участке инертного нагрева $[0, t_{\text{dest}}]$ уточняются теплофизические, а на участке $[t_{\text{dest}}, t_{\text{fin}}]$ – кинетические характеристики. Влияние темпа нагрева на определяемые параметры учитывается за счет зависимости их от плотности либо глубины превращения материала. Единственность решения комплексной обратной задачи обеспечивается физическими обоснованными нулевыми приближениями из аналитических решений простейших задач теплообмена и термодеструкции, полученных методом расщепления по физическим процессам и методом стабилизированных состояний.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта «П 042242» Программы Федерального Агентства по Образованию и гранта РФФИ № 05-01-00201-а.

Обозначения

$(\rho v)_w$ – массовая скорость испарения с единицы поверхности, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; P_* – давление насыщенных паров, Па; P – парциальное давление паров воды во внешней среде; Па; R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; M – молекулярный вес воды, $\text{кг}/\text{моль}$; T – абсолютная температура, К; A и P_0 , Па – постоянные множители; m – текущая масса влажного образца ЛГМ, кг; t – время, с; $\phi = P/P_*$ – относительная влажность воздуха; T_s – температура стабилизации, К; k – предэкспоненциальный множитель, $\text{К}^{1/2}/(\text{с} \cdot \text{Па})$; L – теплота испарения воды, $\text{Дж}/\text{моль}$; B – предэкспоненциальный множитель, $\text{К}^{1/2} \cdot \text{с}^{-1}$; t_{ev} – характерное время испарения, с; t_r – характерное время тепловой релаксации, с; t_f – характерное время фильтрации влаги, с; t_d – характерное время тепловлагопереноса вследствие диффузионного переноса пара, с; t_e – характерное время процессов переноса в пограничном слое у границы раздела

газовой и конденсированной фаз, с; $W(t)$ – влагосодержание образца; Δm – текущая масса влаги в образце, кг; m_{dr} – масса абсолютно сухого образца, кг. Индексы: s – стабилизация; in – начальная; ∞ – равновесная; exp – эксперимент; ev – испарение; f – фильтрация; d – диффузионный перенос; w – поверхность; e – перенос в пограничном слое у границы раздела газовой и конденсированной фаз; fin – конечная; dr – сухой; t – тепловой; destr – деструкция; g – газ; get – гетерогенная; R – радиационная; etc – прочие. Сокращения: ТКП – термокинетические постоянные; РГМ – растительные горючие материалы; ЛГМ – лесные горючие материалы; ПКЗ – прямая кинетическая задача; ОКЗ – обратная кинетическая задача; ПТКЗ – прямая термокинетическая задача; ОТКЗ – обратная термокинетическая задача; ТФХ – теплофизические характеристики.

Литература

- [1] Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
- [2] Бурасов Д. М., Гришин А. М. Математическое моделирование лесных и степных пожаров. Кемерово: Изд-во <<Практика>>, 2006. 134 с.
- [3] Гришин А. М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и новые способы борьбы с ними // Успехи механики. 2002. Т. 1, № 4. С 41–89.
- [4] Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 224 с.
- [5] Гришин А. М., Кузин А. Я., Алексеенко Е. Н.. Определение кинетических характеристик процесса сушки лесных горючих материалов // ИФЖ, 2003. Т. 76, № 5. С. 170–174.
- [6] Гришин А. М., Зинченко В. И., Кузин А. Я, Сеницын С. П., Трушников В. Н.. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 418 с.
- [7] Гришин А. М., Голованов А. Н., Русаков С. В.. Об испарении свободной и связанной с лесным горючим материалом воды в изотермических условиях // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 5. С. 175–180.
- [8] Гришин А. М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 1. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. 506 с.
- [9] Гришин А. М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 2. Кемерово: Практика, 2005. 558 с.
- [10] Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1988. 288 с.
- [11] Гришин А. М., Кузин А.Я., Сеницын С. П., Ярославцев Н.А. О решении обратных задач механики реагирующих сред // ИФЖ, 1989. Т. 56, № 3. С 459–464.
- [12] Гришин А. М., Гришин П. В., Кузин А. Я. Аналитические решения задач о прогреве и зажигании слоя торфа // Сборник избранных докладов 7-й Международной конференции «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии». Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. С. 95–107.
- [13] Исаков Г.Н., Кузин А.Я., Савельев В.Н., Ермолаев В.Ф. Определение характеристик тонкослойных теплозащитных покрытий из решения обратных задач тепло- и массопереноса // ФГВ, 2003. Т.39, № 5. С 86–97.
- [14] Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.