

9. Гостинцев Ю. А., Копылов Н. П., Рыжов А. М. и др. Конвективный перенос продуктов сгорания в атмосфере над большими пожарами // Изв. АН СССР. МЖГ.— 1990.— № 4.— С. 47—52.
10. Хргиан А. Х. Физика атмосферы.— Л.: Гидрометеоиздат, 1978.— 654 с.
11. Вульфсон Н. И., Левин Л. М. Исследование распространения струи метеорона в облачной среде применительно к активным воздействиям // Физика облаков и активных воздействий: Труды ИПГ.— М., 1981.— Вып. 46.— С. 50—68.
12. Yang K. T., Lloyd J. B., Kanury A. M. et al. Modeling of turbulent buoyant flows in aircraft cabins // Combust. Sci. and Technol.— 1984.— 39.— P. 107—118.
13. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости.— М.: Энергоиздат, 1984.— 152 с.
14. Ebert C. H. V. The Meteorological factor in the hamburg fire storm // Weatherwise.— 1963.— 16, N 2.— P. 70—75.
15. Penner J. E., Molenkamp C. R. Predicting the consequences of nuclear war: precipitation scavenging of smoke // Aerosol. Sci. and Technol.— 1989.— 10, N 1.— P. 51—62.

г. Москва

Поступила в редакцию 30/V 1990,
после доработки — 1/IV 1991

УДК 536.4 + 541.12

А. М. Гришин, С. П. Синуцын, И. В. Акимова

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ СУШКИ И ПИРОЛИЗА ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

На основании термогравиметрических измерений в инертной среде и простейшей кинетической схемы получены термокинетические постоянные сушки и пиролиза типичных лесных горючих материалов. Показана адекватность модели эксперименту. Выявлены материалы, для которых могут быть использованы единые значения кинетических постоянных. Предлагаются методики использования полученных значений в общей математической модели лесных пожаров.

Наиболее общая математическая модель лесных пожаров [1] содержит уравнения химической кинетики, описывающие сушку и пиролиз лесных горючих материалов (ЛГМ). В качестве элементов банка исходных данных модели здесь выступают: состав ЛГМ, предэкспоненты и энергии активации процессов сушки и пиролиза, кинетические схемы реакций. Для оценочных расчетов достаточно грубого описания кинетики и использования постоянных для некоторых распространенных ЛГМ [2—7]. Попытки более точного описания воспламенения ЛГМ и распространения пожара наталкиваются на нехватку информации и отсутствие алгоритма использования полученных постоянных в реальных условиях. Известные данные [2—7] носят отрывочный, несистемный характер и зачастую противоречат друг другу, так как получены в различных условиях и не соответствуют общей математической модели [1].

В данной работе в отличие от [2—7] проведены эксперименты с соблюдением следующих требований:

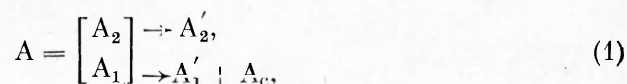
- а) опыты выполнены на общепринятой установке термического анализа — дериватографе;
- б) делаются повторные опыты для статистической оценки доверительных интервалов и получения выборочных математических ожиданий термогравиметрических кривых;
- в) так как общая модель [1] описывает отдельно окислительные реакции, то эксперименты проводятся в инертной среде.

Результаты обработаны по методике [8], получены термокинетические постоянные для наиболее типичных лесных горючих материалов и дан их сравнительный анализ.

Методика проведения экспериментов и обработки данных

Опыты проводились на дериватографе фирмы MOM (Венгрия). Метод динамической термогравиметрии и методика экспериментов носят общеизвестный характер и подробно описаны, например, в [9]. В качестве объекта исследования использован перечень ЛГМ, приведенный в [10]: хвоя и листва деревьев, лишайники и мхи, травы, кустарники. Учитывая результаты работы [6], начальная масса образцов не превышала $0,14 \cdot 10^{-3}$ кг и не оказывала существенного влияния на термогравиметрическую кривую. Темп нагрева для опытов равен 0,083 К/с.

Предварительный анализ термогравиметрических кривых показал, что можно достаточно точно разделить две области интенсивного изменения массы образцов — низкотемпературную, отождествляемую с сушкой, и высокотемпературную — пиролиз сухого ЛГМ ($T > 380$ К). В связи с этим методика обработки результатов опытов для каждого образца строилась на кинетической схеме двух суммарных независимых реакций



где A , A_2 , A_1 , A'_2 , A'_1 , A_c — символы исходного вещества, влаги, абсолютно сухого вещества, паров воды, газообразных и конденсированных продуктов пиролиза.

Уравнения формальной химической кинетики для реакций (1) имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{dm_1}{dt} &= -m_1 k_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \\ \frac{dm_2}{dt} &= -m_2 k_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \\ \frac{dm_3}{dt} &= \alpha m_1 k_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь t — время; T — температура образца; R — универсальная газовая постоянная; k_i , E_i ($i = 1, 2$) — предэкспоненты и энергии активации пиролиза и сушки; m_i ($i = 1-3$) — массы абсолютно сухого ЛГМ, воды и конденсированного продукта пиролиза; α — коксовое число.

Отметим, что выражения (2) записаны в предположении, что реакции имеют первый порядок, а константы скорости следуют закону Аррениуса. В отличие от [4] не учитывается множитель $T^{-1/2}$, как незначимый (из-за большой погрешности, обусловленной сложной структурой образцов, биологической неоднородностью). Второе уравнение (2) может быть выражено через влагосодержание W :

$$\frac{dW}{dt} = -W k_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad W = \frac{m_2}{m_{1H}}, \quad (3)$$

где m_{1H} — начальная масса абсолютно сухого элемента ЛГМ.

Учитывая, что с хорошей точностью масса образцов может быть вычислена по формуле из [11]

$$p = gV \sum_{i=1}^3 m_i \quad (4)$$

(g — ускорение свободного падения, V — объем, занимаемый образцом), получим

$$\frac{dp}{dt} = -(p - p_i) k_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right), \quad i = 1, 2, \quad (5)$$

$$p_2 = gV m_{1H}, \quad p_1 = \alpha p_2.$$

Как видно из (5), обработку результатов экспериментов для сушки и пиролиза можно проводить по единой методике. При этом обратная

кинетическая задача формулируется следующим образом: определить кинетические постоянные k_i , E_i , входящие в (5), из условия наилучшего совпадения теоретических и экспериментальных термогравиметрических кривых.

Критерий согласования, как и в [11], — «взвешенная» квадратичная невязка

$$\delta = \sum_{j=1}^N w_j (p_j^a - p_j)^2, \quad (6)$$

где p_j — решение (5), являющееся функцией k_i , E_i при $t = t_j$; p_j^a — экспериментальное значение массы образца; w_j — статистический вес; N — число точек-узлов, включенных в обрабатываемый массив данных.

Величина $\delta = D_a$ в точке минимума есть мера адекватности теоретических и экспериментальных данных и при $w_j = 1/N$ и p_j^a , определенных как математическое ожидание экспериментальных значений, совпадает с дисперсией адекватности [12]. При проведении расчетов w_j , как и в [11], выбирались из условия обратной пропорциональной зависимости от погрешности определения массы образца в j -м узле и условия нормировки $\sum_{j=1}^N w_j = 1$.

Отметим также, что при статистическом анализе термогравиметрических кривых использовались обычные предположения о нормальном законе распределения случайных величин, однородности их дисперсий, а для построения доверительных интервалов t — критерий Стьюдента [12].

Кинетические постоянные сушки ЛГМ

С целью сравнения формально-кинетических параметров перейдем в (5) к новым переменным

$$y = \frac{p - p_2}{p_H - p_2}, \quad x = T, \quad (7)$$

в которых уже не учитывается начальное влагосодержание образцов, что позволяет применять полученные результаты к различным метеоусловиям с учетом различной влажности.

Для сравнительного анализа разобьем все виды ЛГМ на группы в соответствии с [10] и построим термогравиметрические кривые в координатах (7). Результаты показаны на рис. 1. С учетом доверительных интервалов, обозначенных вертикальными отрезками, с вероятностью 0,75 можно считать идентичными процессы сушки у хвои, мха Шребера и

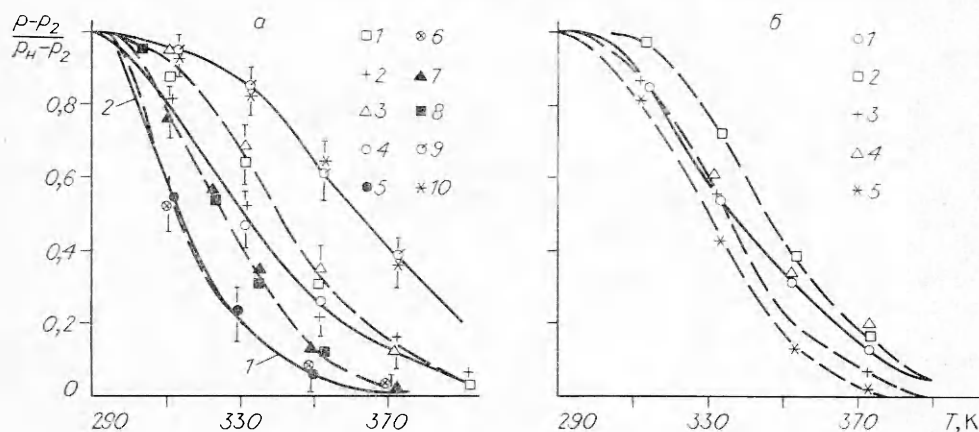


Рис. 1. Относительная убыль массы при сушке мхов, лишайников, хвои, листвы (а) и трав и кустарников (б).

а — 1 — мох Шребера, 2 — лишайник Cladonia, 3 — мох сфагнум, 4 — сбор лишайников, 5 — сосна, 6 — кедр, 7 — пихта, 8 — ель, 9 — береза, 10 — сльховник; б — 1 — вейник, 2 — шивша, 3 — брусника, 4 — багульник, 5 — осока.

Т а б л и ц а 1

Кинетические постоянные сушки ЛГМ

ЛГМ	$k_2, \text{с}^{-1}$	$E_2/R, \text{К}$	$D_a \cdot 10^{14}, \text{кг}^2$	$K_2, \text{с}^{-1}$
Мох Шребера	0,12	1581	1,6	$0,9 \cdot 10^{-3}$
Мох сфагнум	152	3752	2,32	$0,14 \cdot 10^{-2}$
Лишайник	25,6	3144	4,2	$0,15 \cdot 10^{-2}$
Хвоя ели, сосны, кедра	1,88	2720	6,1	$0,94 \cdot 10^{-3}$
Хвоя пихты, лиственницы	$3,2 \cdot 10^4$	5293	6,5	$0,24 \cdot 10^{-2}$
Багульник	$4,21 \cdot 10^2$	4182	5,5	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Осока	$1,46 \cdot 10^4$	5106	3,0	$0,2 \cdot 10^{-2}$
Вейник	$2,02 \cdot 10^4$	5348	1,9	$0,13 \cdot 10^{-2}$
Шикша	$1,45 \cdot 10^5$	6115	3,0	$0,87 \cdot 10^{-3}$
Брусника	$1,53 \cdot 10^6$	6698	4,4	$0,15 \cdot 10^{-2}$
Листья березы	$4,42 \cdot 10^5$	6711	16,6	$0,42 \cdot 10^{-3}$
Рододендрон	$1,1 \cdot 10^2$	3727	5,8	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Опад в хвойном лесу	$3,84 \cdot 10^2$	4094	15,0	$0,12 \cdot 10^{-2}$

сфагнума, листьев березы и ольховника. Это обстоятельство несколько упрощает использование кинетических постоянных сушки различных ЛГМ в математической модели, но все же остается довольно большой набор отличающихся друг от друга кинетических постоянных.

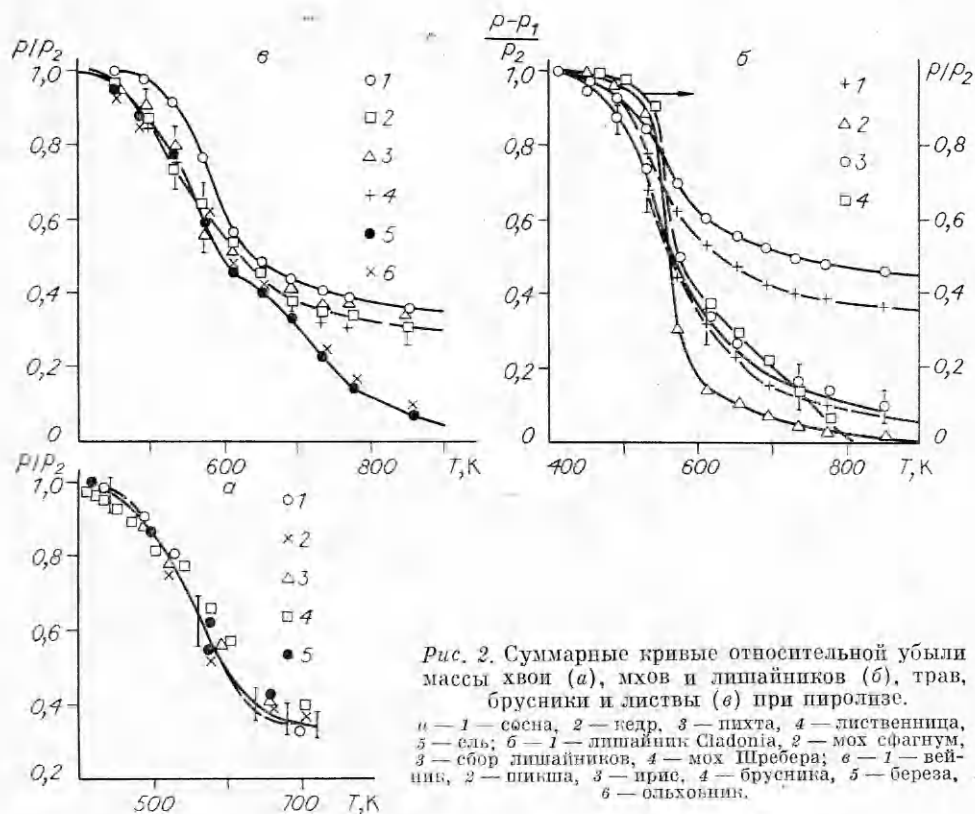
Решения обратных задач для различных ЛГМ сведены в табл. 1. Там же указана дисперсия адекватности D_a и значения констант скорости сушки при температуре образца 323 К.

Анализируя табл. 1, отметим, что значение K_2 существенно различно у листьев березы. Для остальных ЛГМ $K_2 = 0,87 \cdot 10^{-3} \div 0,24 \cdot 10^{-2}$, хотя величины $k_2, E_2/R$ отличаются друг от друга. При решении обратной задачи выявилась сильная корреляция между $k_2, E_2/R$ для любого ЛГМ (типичная ситуация и для других веществ [12]). Например, для хвой пихты и лиственницы при $D_a = 6,5 \cdot 10^{-14} \text{ кг}^2$ имеем $E_2/R = 5293 \text{ К}$, а при $D_a = 16,4 \cdot 10^{-14} \text{ кг}^2$ $E_2/R = 2700 \text{ К}$. Поскольку оба значения D_a лежат в пределах дисперсии воспроизводимости результатов экспериментов, можно сделать вывод о принципиальной возможности практически важной последующей работы: при заранее заданном одинаковом E_2/R найти такие величины k_2 (различные для разных ЛГМ), которые определяли бы сушку ЛГМ с точностью воспроизводимости экспериментальных данных. Успешное решение этого вопроса позволило бы упростить уравнения химической кинетики в общей математической модели и позволило бы по величинам предэкспоненциальных множителей проводить сравнительную экспресс-оценку скоростей высушивания различных ЛГМ.

Кинетические постоянные пиролиза ЛГМ

Кинетическая схема и модель пиролиза отличаются от сушки наличием коксового числа α (5). В отличие от влагосодержания, этот параметр относится к кинетическим, т. е. определяется структурой и составом ЛГМ. С методической стороны это означает, что для получения достоверной информации об α эксперименты обязательно должны проводиться в инертной среде. В противном случае пиролиз дополняется окислением продуктов и значения α оказываются сильно заниженными (в 2—3 раза) [5, 7, 4].

На рис. 2 изображены термогравиметрические кривые ЛГМ в координатах $y = p/p_2$ или $y = (p - p_1)/p_2$. Для хвой ели, сосны, кедра, пихты, лиственницы можно с вероятностью 0,75 полагать кинетику пиролиза идентичной и использовать один набор кинетических постоянных. Аналогичный результат получен для лишайников и мха Шребера, но здесь существенно различие в коксовых числах. Для термогравиметрических кривых различных трав и кустарников такого упрощения получить не удается.



При пиролизе листьев березы, ольховника отмечается многостадийность процесса. Так, на рис. 2, в видна смена стадий при $T = 600$ К (в эксперименте при такой температуре начинается выделение продуктов пиролиза в жидко-капельном состоянии). Константа скорости пиролиза K_1 получена при $T = 573$ К и примерно равна константе скорости сушки при $T = 323$ К (табл. 2). Анализируя данные табл. 2, учитывая сильную корреляцию между k_1 , E_1/R , можно, как и для сушки, попытаться определить новые значения k_1 при условии единой величины E_1 (исключение — мох сфагнум, для которого кинетические параметры резко отличаются от остальных ЛГМ).

Выражения для термокинетических параметров сушки и пиролиза в слое ЛГМ

Выше рассмотрены сушка и пиролиз отдельных образцов древесины и элементов ЛГМ. В реальных лесных биогеоценозах при пожарах происходит сушка и пиролиз совокупности элементов ЛГМ, которые составляют своеобразную многофазовую среду. Поэтому непосредственно использовать выражение для массовых скоростей процессов (2) в такой сплошной гетерогенной среде, как лесной биогеоценоз, нельзя. Сделаем следующие допущения:

- а) процессы сушки и пиролиза ЛГМ протекают в лесном биогеоценозе при лесных пожарах независимо друг от друга;
- б) пиролиз идет независимо от окисления газообразных горючих продуктов пиролиза во фронте пожара;
- в) темпы нагрева ЛГМ, которые реализуются в лабораторных экспериментах, позволяют получать термокинетические постоянные, удовлетворительно описывающие реальный процесс пиролиза во фронте лесного пожара.

Каждое из этих допущений не бесспорно. В частности, первое справедливо для термически тонких элементов ЛГМ (хвоинок), но уже не

Таблица 2

Кинетические постоянные пиролиза ЛГМ

ЛГМ	k_1, c^{-1}	$E_1/R, K$	α	$D_a \cdot 10^{12}, \text{кг}^2$	K_1, c^{-1}
Ель, сосна, кедр, пихта, лиственница	3,2	4 402	0,33	0,43	$0,147 \cdot 10^{-2}$
Лишайники, мох Шребера	154	4 300	0,2—0,4	0,55—3	$0,85 \cdot 10^{-1}$
Мох сфагнум	$0,99 \cdot 10^6$	11 260	0,32	7,9	$0,29 \cdot 10^{-2}$
Вейник	79,6	6 506	0,43	3,7	$0,93 \cdot 10^{-3}$
Брусника	0,39	3 440	0,38	1,4	$0,96 \cdot 10^{-3}$
Береза	0,06	2 310	0,17	1,9	$0,1 \cdot 10^{-2}$
Багульник	0,577	3 811	0,39	0,85	$0,75 \cdot 10^{-3}$
Осока	40,5	5 932	0,42	2,8	$0,13 \cdot 10^{-2}$
Опад в хвойном лесу	1,54	4 320	0,36	1,7	$0,82 \cdot 10^{-3}$
Рододендрон	0,156	3 040	0,42	0,44	$0,77 \cdot 10^{-3}$

выполняется для веточек диаметром 7 мм. В этом случае в приповерхностных слоях вещества веточки может начинаться пиролиз, а в окрестности оси симметрии может происходить сушка.

Второе допущение перестает быть справедливым, если тепловыделение от гомогенных химических реакций в газовой фазе сильно повышает тепловой поток из несущей газовой фазы в элемент ЛГМ и, следовательно, повышает темп нагрева. Последнее допущение самое спорное, но без него на данном этапе исследования не обойтись. Его можно устранить путем создания новых дериватографов или устройств, их заменяющих, и создания соответствующих новых методик исследования пиролиза, что представляет собой самостоятельную сложную научную проблему.

Если полог леса содержит k типов фракций элементов ЛГМ, то вводя число элементов i -й фракции в единице объема n_i , вместо (2) будем иметь систему уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(m_{ji}n_i) &= -m_{ji}n_i k_{ji} \exp\left(-\frac{E_{ji}}{RT}\right), \quad j = 1, 2, \\ \frac{d}{dt}(m_{3i}n_i) &= \alpha_2 m_{1i} k_{1i} \exp\left(-\frac{E_{1i}}{RT}\right), \quad i = 1 \div k. \end{aligned} \quad (9)$$

Принятые допущения означают, что в пологе леса протекают совместно k параллельных реакций сушки и пиролиза. Вместо последней группы уравнений (9) можно использовать алгебраические интегралы

$$m_{3i} = \alpha_i [(m_{1i})_n - m_{1i}], \quad (10)$$

где индекс n соответствует начальному содержанию абсолютно сухого элемента ЛГМ i -го типа.

Перейдем в (9) к объемным долям, используя очевидные равенства:

$$m_{ji}n_i = \rho_{ji}\varphi_{ji}, \quad j = \overline{1, 3},$$

и просуммируем по всем фракциям ЛГМ в единице объема полога леса. Тогда

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_1\varphi_1) &= -\sum_{i=1}^k \rho_{1i}\varphi_{1i}k_{1i} \exp\left(-\frac{E_{1i}}{RT}\right), \\ \frac{d\varphi_2}{dt} &= -\sum_{i=1}^k \varphi_{2i}k_{2i} \exp\left(-\frac{E_{2i}}{RT}\right), \\ \rho_3\varphi_3 &= \sum_{i=1}^k \alpha_i [(\rho_{1i}\varphi_{1i})_n - \rho_{1i}\varphi_{1i}], \end{aligned} \quad (11)$$

$$\rho_1 \varphi_1 = \sum_{i=1}^k m_{1i} n_i, \quad \varphi_1 = \sum_{i=1}^k \varphi_{1i},$$

$$\rho_3 \varphi_3 = \sum_{i=1}^k m_{3i} n_i, \quad \varphi_3 = \sum_{i=1}^k \varphi_{3i}, \quad \varphi_2 = \sum_{i=1}^k \varphi_{2i}.$$

Здесь ρ_1, ρ_3 — средние истинные плотности абсолютно сухого ЛГМ и конденсированных продуктов пиролиза в слое, а истинная плотность воды не зависит от номера фракции.

Плотность всего слоя ЛГМ в пологе леса определяется по формуле

$$\rho_c = \sum_{j=1}^3 \rho_j \varphi_j. \quad (12)$$

Из (11) и (12) следует, что для корректного совместного описания сушки и пиролиза ЛГМ различных типов необходимо решать полную систему уравнений вида (9) с упрощением (10) из-за очевидных неравенств

$$\sum_{i=1}^k \rho_{1i} \varphi_{1i} k_{1i} \exp\left(-\frac{E_{1i}}{RT}\right) \neq \rho_1 \varphi_1 \sum_{i=1}^k k_{1i} \exp\left(-\frac{E_{1i}}{RT}\right),$$

$$\sum_{i=1}^k \varphi_{2i} k_{2i} \exp\left(-\frac{E_{2i}}{RT}\right) \neq \varphi_2 \sum_{i=1}^k k_{2i} \exp\left(-\frac{E_{2i}}{RT}\right) \quad (13)$$

даже после определения среднего коксового числа

$$\alpha = \sum_{i=1}^k \alpha_i (\rho_{1i} \varphi_{1i})_H / (\rho_1 \varphi_1)_H.$$

Из анализа (13) также следует, что дальнейшее уменьшение числа уравнений системы (9) возможно только для совокупности ЛГМ с идентичной кинетикой сушки и пиролиза, например некоторых типов хвойных ЛГМ. Такое уменьшение можно осуществить, если масса какой-либо фракции ЛГМ в единице объема слоя мала по сравнению с массой наиболее представительной фракции.

Отметим, что для использования значений кинетических постоянных в общей математической модели необходимо иметь в виду существование предельных кривых термического разложения, как для полимерных материалов [13]. Для учета этого факта представим предэкспоненты в виде

$$k_i = \begin{cases} k_{i0} + k_{i1} \frac{dT}{dt}, & \frac{dT}{dt} > 0, \\ k_{i0}, & \frac{dT}{dt} \leq 0. \end{cases} \quad (14)$$

Данные табл. 1, 2 дают информацию о связи между параметрами в (14). Для полного определения k_{i0}, k_{i1} необходима дополнительная информация, причем темп нагрева dT/dt должен соответствовать реальным условиям. Для проведения оценочных расчетов достаточно в (14) положить $k_{i0} = 0$ и определить k_{i1} по k_i и dT/dt из табл. 1, 2.

Выводы

1. Получен набор кинетических постоянных сушки и пиролиза элементов ЛГМ, описанных в [10], являющихся типичными представителями лесов таежной зоны СССР.
2. Математическая модель сушки и пиролиза ЛГМ адекватна экспериментам с постоянным темпом нагрева 0,083 К/с, проведенным в инертной среде.
3. Установлено, что для некоторых ЛГМ можно использовать одни и те же значения кинетических постоянных (см. табл. 1, 2).

4. Для расчетов процессов сушки и пиролиза в слое ЛГМ с помощью модели лесного пожара [4] предложена методика использования кинетических постоянных, полученных на единичных образцах ЛГМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров.— Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981.
2. Жуковская В. М. Вопросы лесной пирологии.— Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1970.— С. 105.
3. Исаков Г. П., Касьянов Г. С., Несмелов В. В. // Исследование процессов неустойчивого горения.— Чебоксары, 1984.— С. 45.
4. Гришин А. М., Абалтусов В. Е. и др. // Физика горения и методы ее исследования.— Чебоксары, 1981.— С. 129.
5. Исаков Г. П. // Горение и пожары в лесу. Ч. II.— Красноярск, 1979.— С. 157.
6. Кошкин В. Б., Сеницын С. П. // Механика реагирующих сред и ее приложения.— Новосибирск, 1989.— С. 49.
7. Сосновская Л. Г., Сосновский Е. П., Чоксум С. К. // Горение и пожары в лесу. Ч. II.— Красноярск, 1979.— С. 192.
8. Гришин А. М., Сеницын С. П. // Теория пиролиза композиционных полимерных материалов // ФГВ.— 1984.— 20, № 6.— С. 67.
9. Белихмаер Я. А., Смольянинова Н. М., Смольянинов С. П. Техника эксперимента: Уч. пособие.— Томск: Изд-во Том. политехи. ин-та, 1983.
10. Валендик Э. П., Сухинин А. П. и др. Исходные данные для моделирования лесных пожаров. Отчет по НИР.— Красноярск, 1988.
11. Гришин А. М., Кузин А. Я. и др. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред.— Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987.
12. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами.— М.: Мир, 1973.
13. Шленский О. Ф., Шашков А. Г., Аксенов Л. П. Теплофизика разлагающихся материалов.— М.: Энергоатомиздат, 1985.

г. Томск

Поступила в редакцию 4/II 1991

УДК 536.46 : 621.45.022

Р. В. Албегов, В. А. Виноградов, Г. Г. Жадан, С. А. Кобыжский

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ H_2 И ТЕПЛОТВОДА В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ

Приведены результаты экспериментального исследования горения H_2 и теплоотвода в кольцевом канале, имитирующем входное устройство и камеру сгорания прямоточного ВРД при сверхзвуковой скорости обтекания. Получена область устойчивой работы входного устройства и камеры сгорания при различном распределении топлива по поясам подачи. Определены уровень теплоотвода в стенки канала и эффективность горения при варьировании потока в канале.

Создание силовой установки для перспективного летательного аппарата требует решения целого комплекса задач, среди которых: 1) надежная организация воспламенения и стабилизации в камере сгорания; 2) устойчивая совместная работа воздухозаборника и камеры; 3) высокая полнота горения в камере сгорания; 4) минимальные потери полного давления по тракту; 5) минимальный теплоотвод в стенку для снижения требований к системе охлаждения; 6) эффективная работа в широком диапазоне скоростей полета и т. д.

Большинство работ по данной проблеме посвящено собственно организации рабочего процесса в канале при варьировании условий на входе: число Маха $M = 2 \div 3$, параметры торможения набегающего потока $T^* = 1000 \div 2200$ К, $p_\infty = (0,2-5) \cdot 10^5$ Па, но испытаний камеры сгорания в составе двигателя существенно меньше [1-5]. Устойчивость течения в воздухозаборнике при совместной работе с камерой зависит от места и способа подачи горючего (со стенок или с пилонов, а также от направления подачи по отношению к основному потоку), наличия элементов стабилизации горения (уступ, ниша, факел) и формы канала, которые влияют на газодинамику течения и, в частности, на распространение