УДК 536.629.7

С. И. Воронков, Л. Я. Кашпоров, Д. З. Сафанеев

ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ДАТЧИКАМИ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ НА ПОВЕРХНОСТИ

Предложен новый алгоритм обработки результатов прямых измерений, позволяющий изменить требования к конструкции датчика. Разработана автоматизированная система измерения импульсных тепловых потоков в процессах воспламенения и горения конденсированных веществ.

Успехи в исследовании процессов импульсного выделения тепла в первую очередь определяются совершенствованием приборно-методического обеспечения средств измерений быстроизменяющихся тепловых потоков. Наиболее часто для таких измерений применяют двухслойные датчики, состоящие из нагреваемого потоком чувствительного элемента (термопары или термометра сопротивления), расположенного на толстой подложке с известными теплофизическими свойствами.

В зависимости от толщины чувствительного элемента имеются датчики измерения поверхностной температуры и датчики калориметрического типа.

При толщине чувствительного элемента [1]

$$h < h^* - 0{,}01\sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2 \Delta t}/c_1\rho_1, \qquad (1)$$

где Δt — дискретность измерений температуры во времени; λ_j, c_j, ρ_j — теплопроводность, теплоемкость и плотность материала чувствительного элемента ($j=1$) и подложки ($j=2$), температура поверхности чувствительного элемента T_1 отличается не более чем на 1 % от температуры поверхности подложки T_s в отсутствии чувствительного элемента. Следовательно, влиянием чувствительного элемента на нагрев подложки можно пренебречь. В этом случае предполагается, что чувствительный элемент измеряет T_s, а поглощенный чувствительным элементом поток q равен интенсивности теплоотвода в подложку [2]

$$q_{-}t_k = \frac{2\sum\limits_{i=1}^{k}(T_s(t_i) - T_s(t_{i-1}))(\sqrt{k-i+1} - \sqrt{k-i})}{\sqrt{\pi\lambda_2 c_2 \rho_2 \Delta t}}. \qquad (2)$$

Как следует из (1), толщина платинового чувствительного элемента на кварцевой подложке при $\Delta t = 0{,}1$ мс должна быть порядка 0,1 мкм. Технология изготовления датчиков с таким тонким чувствительным элементом достаточно сложна, что определяет их высокую стоимость. Из-за эрозии чувствительного элемента при нагреве (материал подложки — тепло- и электроизолятор, поэтому при измерениях на поверхности датчика достигаются высокие температуры) датчик выдерживает не более нескольких опытов [1] и требует специальной калибровки перед каждым опытом [3—5], так как термо-ЭДС тонкой пленочной термопары и температурная зависимость электросопротивления металлической пленки не совпадают с установленными для толстых проводников.

Толщина чувствительного элемента калориметрического датчика $h \gg h_{**} = \sqrt{a_1 t^{**}}$ [1] (a_1 — температуропроводность материала чувствительного элемента, t^{**} — общая продолжительность измерений), поэтому пренебрегают теплоотводом в подложку ($q_{-}=0$) и находят тепловой поток $q = q_a$ (q_a — тепловой поток в адиабатических условиях на поверхности контакта с подложкой) по скорости изменения средней температуры чувствительного элемента $\langle T_1(t)\rangle$ (именно эта температура регистрируется при измерении термо-ЭДС или сопротивления):

$$q_a(t_k) = c_1\rho_1 h \frac{\langle T_1(t_{k+1})\rangle - \langle T_1(t_{k-1})\rangle}{2\Delta t}. \tag{3}$$

Калориметрические датчики с $h = 50$ мкм [6] используются при измерении очень коротких ($t^{**} < 50$ мкс) импульсов тепла высокой интенсивности ($q > 10^6$ Вт/м^2). При измерении тепловых потоков длительностью >1 мс необходимо использовать датчики с $h \sim 1$ мм, что приводит к резкому увеличению погрешности измерений из-за малой амплитуды полезного сигнала.

Известны попытки измерения тепловых потоков длительностью 3—10 мс датчиками, занимающими промежуточное положение между первым и вторым типами датчиков, с чувствительным элементом толщиной $\sim$10 мкм [2, 7]. При этом пренебрегают изменением энтальпии чувствительного элемента, и расчет теплового потока проводят по соотношению (2). Так, в [2] отмечалось, что использование микротермопар с $h = 10$ мкм приводило к высоким погрешностям измерений из-за их высокой тепловой инерционности при измерении потоков длительностью $\sim$3 мс.

В [7] при измерении тепловых потоков длительностью до 10 мс от пламени пиротехнического воспламенителя использовался датчик с ленточной хромель-константановой термопарой инерционностью 10 мкс (толщина $\sim$7 мкм), расположенной на торце стержня из стали SS304 ($\lambda_2 = 14{,}5$ Вт/(м·К), $c_2 = 505$ Дж/(кг·К), $\rho_2 = 7900$ кг/м^3 [8]). Погрешность восстановления теплового потока в работе [7] не оценивалась.

Применение датчиков теплового потока промежуточного типа ограничено отсутствием достаточно простого алгоритма обработки результатов прямых измерений, учитывающего как затраты тепла на нагрев чувствительного элемента, так и теплоотвод в подложку, и отсутствием анализа погрешности восстановления потока при использовании соотношений (2) и (3). Настоящая работа показывает возможность измерения тепловых потоков датчиками промежуточного типа в процессах воспламенения и горения с приемлемой точностью.

Оценим погрешность восстановления теплового потока при обработке измерений без учета изменения энтальпии чувствительного элемента. Для этого графическую зависимость $q_-(t)$, представленную на рис. 4 работы [7], аппроксимируем по методу наименьших квадратов функциональной зависимостью

$$q(t) = t^b \exp(a - ct), \tag{4}$$

где $a = 4{,}9718$; $b = 1{,}3308$; $c = 1{,}1635$; $[q]$ в МВт/м^2; $[t]$ в мс, и для моментов времени $t_k = \Delta t k$ при $\Delta t = 0{,}05$ мс численным решением задачи теплопроводности найдем температуру поверхности стального стержня. Полученные значения T вычислены с относительной погрешностью $\leqslant 0{,}3$ % и соответствовали измеренным в работе [7], но представленным графически.

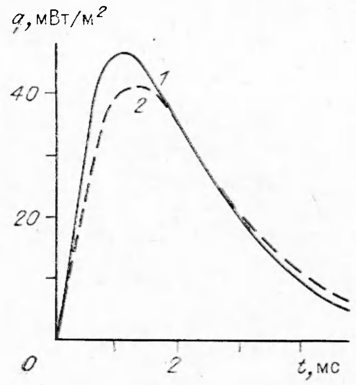
Для восстановления теплового потока, обеспечивающего экспериментально «измеренное» изменение температуры поверхности стального стержня, решим обратную задачу теплопроводности [1]

$$0 \leqslant x \leqslant h:\ c_1\rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \tag{5}$$

$$x \geqslant h:\ c_2\rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \tag{6}$$

с начальным условием $t = 0$: $T_1 = T_2 = 0$
и граничными условиями

$$x = 0:\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = q(t),$$



Сопоставление результатов обработки зависимости $\langle T_1(t)\rangle$.

1 — численное решение обратной задачи; *2* — приближенное решение по уравнению (1).

$$x = h: \ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = q_-(t), \ T_1(h) = T_2(h),$$

$$x \to \infty: \qquad T_2 = 0.$$

В моменты времени $t_i = \Delta t i$ $(i = 1, 2, 3, \ldots, N)$ известны значения среднеинтегральной (по глубине) температуры чувствительного элемента $\langle T_1 \rangle_i$.

Необходимо отметить некорректность постановки обратной задачи восстановления теплового потока. Для существования и единственности решения обратной задачи теплопроводности в общем случае необходимо, чтобы функции $\langle T_1(t)\rangle$ и $q(t)$ были бесконечно дифференцируемы, причем n-е производные $q(t)$ по времени возрастали медленнее, чем $2n!$ [9]. Поскольку значения $\langle T_1(t)\rangle$ известны только в ограниченном числе точек N, предполагается равенство нулю производных при $n > N$. Следовательно, решая обратную задачу, можно восстановить достаточно гладкую функцию $q(t)$.

Скорость выделения тепла в процессах воспламенения и горения монотонно возрастает от нуля до некоторого максимального значения, а затем убывает. Это позволяет надеяться на то, что функция $q(t)$ в достаточной степени гладкая для получения решения обратной задачи теплопроводности.

При распространении ударных волн тепловой поток изменяется ступенчато [1], а в процессах соприкосновения двух твердых тел с разной температурой при $t = 0$ возрастает до бесконечности, а затем убывает. Поэтому решение обратной задачи теплопроводности существует лишь при $t > 0$, и наибольшие погрешности восстановления теплового потока будут наблюдаться при формальном распространении решения на отрезке времени от 0 до Δt. Кроме существования и единственности решения часто возникает вопрос об устойчивости обратного решения, который не рассматривался в данной работе.

На рисунке представлена зависимость $q(t)$, полученная методом численного решения обратной задачи с вычислением коэффициентов чувствительности. Возможность применения и погрешности, обусловленные применением разностных схем при решении обратных задач теплопроводности, исследованы достаточно подробно [10, 11], поэтому здесь не рассматриваются. Полученное решение удовлетворительно аппроксимируется уравнением (4) с коэффициентами $a = 5{,}01088$, $b = 1{,}3798$, $c = 1{,}1960$. Учет затрат тепла на нагрев чувствительного элемента приводит к увеличению амплитуды теплового потока на 15 % и уменьшает время достижения максимума потока на 20 %. Расхождение было бы значительно большим для датчика с подложкой из теплоизолятора.

Численное решение обратной задачи имеет один недостаток, существенно ограничивающий его применение. Для обеспечения восстановления теплового потока с относительной погрешностью 1—3 % необходим достаточно большой объем вычислений. В рассмотренном примере при использовании явной схемы прогонки второго порядка точности решение задачи на языке Турбо-Бейсик на ПЭВМ IBM PC/AT требует не менее 1 ч. Большой объем вычислений делает необходимым поиск приближенных методов обработки экспериментальных данных.

Известно [12], что при воздействии на пластину толщиной h постоянного теплового потока q через некоторое характерное время t_x ($\mathrm{Fo}=a_1t_x/h^2>0{,}5$) профиль температур в пластине описывается с относительной погрешностью не более 1 % квадратичной зависимостью

$$T_1(x)=\langle T_1\rangle+(q-q_-)x^2/(2\lambda_1h)-qx/\lambda_1+(2q+q_-)h/(6\lambda_1).$$

В этом случае $\partial^2T_1/\partial x^2=\mathrm{const}=(q+q_-)/(\lambda_1h)$, и уравнение (5) может быть преобразовано к виду

$$c_1\rho_1h\frac{d\langle T_1\rangle}{dt}=q(t)-q_-(t), \tag{7}$$

причем температура поверхности подложки T_s ниже средней температуры чувствительного элемента $\langle T_1\rangle$:

$$T_s(t)=\langle T_1(t)\rangle-h(q+2q_-)/(6\lambda_1). \tag{8}$$

Решение системы (6)—(8) имеет две асимптоты: $h=0$ — датчик измерения температуры поверхности и $q_-(t)=0$ — датчик калориметрического типа. При $h\neq0$ и $q_-\neq0$

$$q(t)=q_a(t)+q_-(t), \tag{9}$$

где $q_a(t)$ вычисляется по соотношению (3), а $q_-(t)$ — по уравнению (2) с учетом поправки (8).

Процедура вычислений теплового потока может быть представлена следующим образом. Первоначально в предположении $T_s=\langle T_1\rangle$ проводится оценка $q_-(t)$ по (2), а по уравнениям (3), (9) оцениваются величины $q_a(t)$ и $q(t)$. Затем уточняется температура поверхности подложки и повторяются вычисления по (2) и (9). Обычно после вторичного уточнения величина T_s становится постоянной и может быть использована для расчета $q_-(t)$ и $q(t)$. Реализация этого алгоритма позволяет восстанавливать тепловой поток с относительной погрешностью $\leqslant3$ % при значительно меньшем объеме вычислений, чем при численном решении обратной задачи.

Табл. 1 иллюстрирует точность приближенного решения обратной задачи. Сначала численным методом с относительной погрешностью 0,1 % получено решение прямой задачи о нагреве чувствительного элемента толщиной 60 мкм с $\lambda_1=20$ Вт/(м · К), $c_1=455$ Дж/(кг · К), $\rho_1=8600$ кг/м^3 на керамической подложке с $\lambda_2=0{,}50$ Вт/(м · К), $c_2=1000$ Дж/(кг · К), $\rho_2=1900$ кг/м^3 тепловым потоком $q(t)$, найденным в результате аппроксимации экспериментальных данных работы [7], и рассчитаны значения $\langle T_1\rangle$ в моменты времени $t_i=\Delta ti$ при $\Delta t=0{,}05$ мс. Затем по предложенному алгоритму решена обратная задача.

Как видно из табл. 1, относительная погрешность восстановления теплового потока не превышает 3 %, хотя в рассмотренном случае использован относительно толстый чувствительный элемент на подложке с низкой тепловой активностью. Если при обработке экспериментальных данных пренебречь изменением энтальпии чувствительного элемента, то расчетные значения теплового потока составят 10—20 % от истинного значения, а если пренебречь теплоотводом в подложку, то максимальная амплитуда потока уменьшится на ~10 %, и после пятой миллисекунды расчетное значение потока станет отрицательным.

Предложенный алгоритм позволяет восстанавливать тепловой поток и при его ступенчатом изменении. В этом случае наибольшая погрешность восстановления получается при $i=1$, но она не превышает 5 %, а затем быстро убывает.

При проведении экспериментальных исследований температура чувствительного элемента измеряется с систематической и случайной погрешностями. Особенность решения обратных задач теплопроводности со-

Таблица 1

t_i, мс	$q(t_i)$, МВт/м²	Прямая задача			Обратная задача
		$<T_1>_i$, К	$T_{1,i}$ ($x=0$), К	$q_{-,i}$, МВт/м²	q_i, МВт/м²
0,1	5,60	1,04	4,43	0,02	5,64
0,2	12,92	4,95	14,76	0,23	12,77
0,3	20,06	11,88	28,80	0,63	19,86
0,4	26,47	21,55	45,28	1,15	26,34
0,5	31,96	33,56	63,38	1,74	31,88
0,6	36,47	47,78	82,49	2,36	36,44
0,7	40,02	62,88	102,12	2,97	40,04
0,8	42,70	79,37	122,00	3,56	42,74
1,0	45,73	114,27	161,17	4,63	45,83
1,5	44,00	201,08	248,31	6,40	44,17
2,0	35,99	273,56	313,59	7,03	36,15
2,5	26,93	326,46	357,49	6,92	27,06
3,0	19,04	361,49	384,34	6,43	19,14
3,5	12,95	382,62	398,95	5,80	13,01
4,0	8,56	393,93	405,33	5,16	8,58
5,0	3,52	398,72	404,48	4,07	3,53

стоит в том, что случайная погрешность измерения температуры в момент времени t_k вызывает отклик в величине теплового потока при $i > k - 1$. Важно, чтобы погрешность δq_i быстро уменьшалась во времени. Табл. 2 иллюстрирует устойчивость предложенного алгоритма к случайной погрешности измерения температуры $\delta T = 5$ К в момент времени t_k, $h = 50$ мкм. Видно, что при $i > k + 3$ $\delta q_i < 0{,}01 \delta q_{k-1}$.

Таким образом, предложенный алгоритм обработки экспериментальных данных существенно изменяет технические требования к конструкции датчика. В нем могут быть использованы относительно толстый чувствительный элемент (например, ленточная термопара толщиной 50—100 мкм) и диэлектрическая подложка. Регистрацию сигнала с датчика целесообразно вести на цифровой прибор, сопряженный с ЭВМ (например, осциллограф С9-8, связанный по каналу общего пользования с ПЭВМ «Нейрон»).

При использовании цифровых приборов измеряемой амплитуде сигнала присваиваются дискретные значения. Так, для осциллографа С9-8 при чувствительности 50 мВ дискретность составляет 0,2 мВ. Если в датчике теплового потока чувствительный элемент — хромель-алюмелевая термопара, то дискретность в измерении температуры составит $\Delta T = 5$ К. Без наводок в измерительной цепи это приведет к погрешности восстановления теплового потока δq, которая для датчика калориметрического типа может быть оценена из соотношения [9]

$$\delta q = 0{,}707 c_1 \rho_1 h \Delta T / (2\Delta t). \qquad (10)$$

В случае $h = 60$ мкм при $\Delta t = 0{,}05$ мс погрешность составит 8,4 МВт/м². Для датчиков измерения температуры поверхности и датчиков промежуточного типа величина погрешности не может быть вычислена аналитически, так как в расчете теплового потока используются значения температур, измеренные ранее, и погрешность восстановления теплового потока уменьшается. Она может быть установлена следующим образом: полученные в

Таблица 2

t_i, мс	$<T_1>_i$, К	q_i, МВт/м²	Q_i, кДж/м²
0,05	0	0,00	0,00
0,10	0	10,01	0,25
0,15	5	0,67	0,52
0,20	0	—9,79	0,29
0,25	0	—0,35	0,04
0,30	0	—0,11	0,02
0,35	0	—0,06	0,02
0,04	0	—0,04	0,02

Таблица 3

Δt, мс	ΔT, К	n	δq, МВт/м	$\delta q_{\text{отн}}$, %
0,05	0,01—0,4 *	1	0,11 *	0,86 *
	5	1	4,87	36
	2	1	1,80	17
	5	5	2,53	28
	2	5	0,72	9,6
0,1	0,01—0,4 *	1	0,14 *	0.85 *
	5	1	2,24	18,9
	2	1	0.90	7,1
	5	10	1,11	15
	2	10	0,32	4,4

* Соответствует суммарной погрешности решения прямой и обратной задач.

результате обработки экспериментальных данных значения $q(t_i)$ аппроксимируют некоторой функцией $f(t)$, характер которой определяется особенностями физико-химических процессов выделения тепла, затем, решая прямую задачу о нагреве чувствительного элемента, находящегося на подложке, определяют расчетные значения $\langle T_1 \rangle_i$ в моменты времени t_i. Этим температурам присваивают дискретные значения и, решая обратную задачу, находят

$$\delta q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (q(t_i) - f(t_i))^2}{N-1}}. \tag{11}$$

В табл. 3 приведены результаты вычислений δq для рассмотренного ранее случая. Погрешность восстановления теплового потока тем меньше, чем больше Δt и меньше ΔT, при этом она примерно в 2 раза меньше, чем дает оценка по уравнению (10). Следует отметить, что данное утверждение справедливо, если Δt значительно меньше характерного времени изменения теплового потока.

Уменьшить погрешность восстановления теплового потока можно несколькими способами: 1) увеличить, насколько это возможно, шаг по времени; 2) уменьшить ΔT; 3) уменьшить или сократить Δt, но температуру в момент t_i вычислять по результатам нескольких измерений.

Первый способ может применяться при измерении медленноменяющихся потоков, когда имеется возможность увеличения Δt. Для быстроизменяющихся потоков он не приемлем.

Второй метод наиболее эффективен, когда амплитуда шумов в измерительной цепи значительно ниже дискретности регистрации сигнала. В этом случае достаточно использовать предварительное усиление сигнала, либо повысить разрядность АЦП. Если же амплитуда шумов сравнима с дискретностью сигнала, целесообразно использовать третий способ. В этом случае уменьшают Δt в n раз, но при этом в расчете используют значения температур, полученные с прежним шагом по времени в результате усреднения n измерений, уменьшая в $\sqrt{n}$ раз погрешность восстановления теплового потока.

Наибольший эффект дает разумное сочетание всех трех способов. Например, если перейти в рассмотренном примере от $\Delta t = 0{,}05$ мс, $\Delta T = 5$ К, $n = 1$ к $\Delta t = 0{,}1$ мс, $\Delta T = 2$ К, $n = 10$, то погрешность восстановления теплового потока уменьшится на порядок (см. табл. 3).

Проведенный анализ позволил разработать конструкцию датчика и создать автоматизированную систему измерения импульсных потоков тепла в процессах зажигания и горения с регистрацией на осциллографы С9-8 и обработкой информации на ПЭВМ «Нейрон».

Осциллограф С9-8 записывает 2048 точек в случае использования одного канала регистрации (1024 точек при использовании двух каналов регистрации) с дискретностью по времени от 50 нс до 20 с. При измерении тепловых потоков осциллограф запускается с опережением по крайней мере в 148 точек (124 точки для двух каналов), что позволяет минимизировать погрешность регистрации начального уровня входного сигнала. Если в эксперименте необходимо оценить погрешность восстановления теплового потока, обусловленную алгоритмом обработки результатов и высокочастотными шумами в измерительной цепи, то опережение запуска увеличивают на 100—200 точек. По расчетным значениям теплового потока для этого отрезка времени, когда истинное значение потока равно нулю, по соотношению (11) оценивают δq.

В процессе первичной обработки результатов прямых измерений после вычисления амплитуды начального сигнала проводится усреднение амплитуды по десяти точкам и вычисляется изменение амплитуды входного сигнала относительно начального уровня в 190 точках (для двух каналов регистрации — по 90 точек на канал), при этом дискретность по времени увеличивается в 10 раз, но уменьшается погрешность изменения температуры чувствительного элемента.

После первичной обработки результатов измерений вводится дополнительная информация (тип термопары, ее толщина и начальная температура, теплофизические свойства чувствительного элемента и подложки жестко «зашиты» в программу обработки) и проводится вычисление теплового потока и энергетической экспозиции. Кроме того, предусмотрена возможность вычисления температуры поверхности с известными теплофизическими свойствами.

При использовании автоматизированной системы погрешности измерений теплового потока с учетом шумов измерительной цепи устанавливаются достаточно просто: после подключения датчиков теплового потока и настройки осциллографа проводится опыт, в котором поверхность датчиков защищена от внешнего воздействия специальным экраном, после чего обрабатывается полученная информация. Интенсивность воздействия на датчики в опыте равна нулю, что позволяет оценивать составляющие погрешностей.

Практика измерений тепловых потоков показала, что даже при измерении тепловых потоков от инициаторов-капсюлей накольного типа «Жавело», имеющих характерное время изменения потока ~1 мс (дискретность регистрации термо-ЭДС 5 мкс), суммарная погрешность восстановления потока составляет 0,5—1 МВт/м^2.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Эртель Ч.** Измерения в гиперзвуковых ударных трубах. Физика быстропротекающих процессов/Пер. под ред. Н. Ф. Златина.— М.: Мир, 1971.— Т. 3.— С. 103—208.
2. **Денисаев А. А., Дубовик А. В., Боболев В. К.** Исследование закономерностей диссипативного разогрева в пастообразном ВВ при ударе // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация: Материалы VI Всесоюз. семинара по горению и взрыву.— Черноголовка, 1980.— С. 39—43.
3. **Линевег Ф.** Измерение температур в технике: Справочник/Пер. с нем.— М., 1980.— 544 с.
4. **Михеев В. Ф., Хлевной С. С., Худяков А. В.** Тонкопленочный термометр сопротивления для регистрации температуры на поверхности пороха при быстром нагреве // ФГВ.— 1966.— 2, № 2.— С. 44—51.
5. **Поляков Ю. А., Митькина Е. А.** Тонкопленочный термометр сопротивления // Приборы и техника эксперимента.— 1961.— № 4.— С. 140—142.
6. **Rose P. H.** Development of the calorimeter heat transfer gauge for use in shock tubes // Rev. Sci. Instr.— 1958.— 29.— P. 557.
7. **Evans N. A., Durand N. A.** Heat transfer characteristics of igniter output plumes // Proc. 14th Int. Pyrotechnics Seminar. Chennal Island (UK) 18—22 Sept., 1989.— P. 173—183.
8. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники: Справочник.— М.: Атомиздат, 1968.— 484 с.

9. **Бек Дж., Блакуэлл Б., Сент-Клэр Ч. мл.** Некорректные обратные задачи теплопроводности/Пер. с англ.— М.: Мир, 1989.— 312 с.
10. **Алифанов О. М.** Обратные задачи теплопроводности.— М.: Машиностроение, 1988.— 280 с.
11. **Коздоба Л. А., Круковский П. Г.** Методы решения обратных задач теплопереноса.— Киев: Наук. думка. 1982.— 360 с.
12. **Пехович А. И., Жидких В. М.** Расчеты теплового режима твердых тел.— Л.: Энергия, 1976.— 352 с.

г. Сергиев Посад

Поступила в редакцию 8/I 1992, после доработки — 30/IX 1992

УДК 541.126

И. Н. Дорожевец, Е. П. Костогоров

ТЕПЛОВОЙ ВЗРЫВ В СВС-СИСТЕМАХ С УЧЕТОМ ХИМИЧЕСКОГО ГАЗОВОГО ТРАНСПОРТА

На основании модели реагирования компонентов, позволяющей учитывать изменение поверхности контакта, анализируется влияние на температуру воспламенения переноса одного из компонентов к поверхности другого. Найдено, что химический газовый транспорт переводит процесс реагирования от воспламенения в центре объема к зажиганию от стенки реактора. При этом в реакторе существуют две области, разграниченные кривой равновесных концентраций соединения-переносчика транспортируемого компонента. В одной из областей образуется и накапливается соединение-переносчик, в другой выделяется этот компонент на свободной поверхности другого. Замкнутость пространства реактора и диффузия из одной области в другую позволяют создать сверхравновесные концентрации соединения-переносчика в области осаждения.

В последнее время появились работы, посвященные получению промышленных материалов в условиях теплового взрыва [1, 2]. Выбор такого способа имеет ряд преимуществ перед традиционным методом проведения синтеза соединений в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Главное из них — бо́льшая управляемость процессом реагирования компонентов, которая осуществляется регулированием подачи тепла в реакционный объем. Теоретические основы теплового взрыва в условиях программированного нагрева и использование полученных данных как методологической базы для изучения кинетики химических реакций анализируются в работе [3].

Тепловой взрыв по своей сути охватывает не только объемное реагирование при равномерном распределении температуры по реакционному объему. В зависимости от параметров процесса возможны зажигание от стенок, распространение волны горения от стенок к центру, воспламенение в центре реакционного объема при значительном повышении начальной температуры за счет теплопередачи. Для выбранной реакционной смеси переход от одного режима к другому часто удается осуществить изменением темпа нагрева или увеличением размера реакционного объема [4].

Другим способом управления режимами теплового взрыва может стать химический транспорт, способный обеспечить перенос одного из реагентов к поверхности другого. Задача о влиянии активных химических добавок на горение гетерогенных конденсированных систем рассмотрена в работе [5]. Возможность переноса была связана с образованием газообразного соединения-переносчика, «выхода» его концентрации на равновесную кривую и дальнейший распад на газ-переносчик и переносимый металл на свободной поверхности другого компонента.

Важное отличие рассматриваемого в настоящей работе теплового взрыва от горения заключается в замкнутости реакционного объема.