Министерство образования Российской Федерации Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Кафедра физической химии

О. С. Алехин, Ю. И. Климентьева, Д. В. Королев, К. А. Суворов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В КРИТИЧЕСКОМ СЕЧЕНИИ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ

Методические указания

Санкт-Петербург 2001 УДК 662.613.12

Алехин О. С., Климентьева Ю. И., Королев Д. В., Суворов К. А. Определение теплофизических параметров в критическом сечении волны горения: Методические указания. СПб., СПбГТИ(ТУ), 2001. — 18 с.

В методических указаниях описан расчет теплофизических параметров в критическом сечении волны горения и методика получения зависимости этих параметров от рецептурно-технологических факторов в рамках энтальпийного подхода к теории горения. Изложение материала пояснено примерами расчетов.

Методические указания предназначены для студентов III—VI курсов кафедры высокоэнергетических процессов. Могут быть полезны студентам, аспирантам, преподавателям и научным сотрудникам, специализирующимся в области теории горения и разработки пиротехнических составов.

Илл. 5, библиограф. 10 назв.

Рецензент: В. И. Зарембо, д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой аналитической химии СПбГТИ(ТУ)

Утверждены на заседании методической комиссии химическо-го отделения ____.01.

Рекомендованы к изданию РИСо СПбГТИ(ТУ)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОСНОВЫ ЭНТАЛЬПИЙНОГО ПОДХОДА К ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ	5
2. СТРУКТУРА ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В СООТВЕТСТВИИ С ЭНТАЛЬПИЙНЫМ ПОДХОДОМ	7
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРИТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ОТ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ	9
3.1. Определение зависимости теплоемкости и плотности от температуры	9
3.2. Определение влияния степени уплотнения на теплофизические параметры волны горения	12
3.3. Определение влияния дисперсности компонентов на теплофизические параметры волны горения	15
ЛИТЕРАТУРА	17

ВВЕДЕНИЕ

Для анализа процесса горения применяются разные подходы. В одном случае считается, что процесс горения определяется прогревом горючей смеси до критической температуры, а тепловыделение рассматривается как внешний источник тепла. В другом — скорость горения определяется скоростью химических реакций при T_{max} , а физические особенности горючей системы не принимаются во внимание. В обоих подходах основной переменной является температура.

В последние годы успешно развивается научное направление, в рамках которого считается, что более естественной переменой для этих процессов является энтальпия h [1-5]. Использование энергетической характеристики —энтальпии — позволяет учесть химизм процесса в переменой h и получить простейшее и общее решение задачи о скорости стационарного горения. Важнейшим результатом энтальпийного подхода к анализу горения является установление существования критического сечения волны стационарного горения. Параметры этого сечения — максимальная энтальпия h_m и тепловой поток *q*_{*m*} — могут быть определены из экспериментальных данных. Для этого используются зависимости скорости горения от начальной температуры T_{μ} или внешнего теплового потока q_{μ} при различных сочетаниях рецептурно-технологических факторов. Используя значения h_m и q_m , можно построить физически обоснованные зависимости скорости горения от температуры, давления и рецептурно-технологических факторов.

Математический аппарат энтальпийного подхода не сложен. Несмотря на полуэмпирический характер получаемых зависимостей, анализ последних позволяет получать очень важную информацию о фазовых превращениях в волне горения и ее структуре. Более того, благодаря энтальпийному подходу, появляется возможность оценивать кинетические параметры реакции горения.

В работы описана методика определения зависимости теплофизических параметров волны горения h_m и q_m от рецептурнотехнологических параметров.

1. ОСНОВЫ ЭНТАЛЬПИЙНОГО ПОДХОДА К ТЕОРИИ ГОРЕНИЯ

В рамках энтальпийного подхода [1—5] предполагается существования критического сечения волны горения. При этом подходе скорость стационарного горения в любом сечении волны горения определяется соотношением двух тепловых параметров — теплового потока и энтальпии. Уникальность критического сечения волны горения состоит в том, что тепловые параметры — максимальная энтальпия h_m и тепловой поток q_m — в этом сечении не зависят от начальной температуры и легко могут быть определены из экспериментальных зависимостей

$$(u\rho)^{-1} = f[h(T_{H})] = \frac{h_{m}}{q_{m}} - \frac{1}{q_{m}}h(T) = a + b \cdot h(T).$$

На основании значений h_m и q_m можно строить обобщенные зависимости скорости горения от температуры, давления и рецептурнотехнологических факторов (пористости Π , диаметра частиц d и соотношения компонентов α) в виде

$$u\rho = \frac{q_m(P,\Pi,d_i,\alpha_i)}{h_m(P,\Pi,d_i,\alpha_i) - h(T_n,P,\alpha_i)}$$

и прогнозировать характеристики процесса горения в реальных условиях и возможности их регулирования в требуемом направлении.

На основе энтальпийной теории в результате несложного эксперимента и последующей математической обработки экспериментальных данных могут быть получены кинетические параметры реакции горения.

Для многих конденсированных горючих систем критическое сечение волны горения соответствует температуре плавления или кипения одного из компонентов. Это позволяет прогнозировать процесс горения неисследованных систем по известным теплофизическим свойствам компонентов. С другой стороны, эта закономерность открывает возможность определения теплофизических свойств веществ при высоких значениях температуры и давления на основании экспе риментальных исследований скорости горения.

При постоянном давлении скорость горения может изменяться не только в результате изменения начальной температуры, но и в результате облучения горящего образца от внешнего источника тепловым потоком q_{gh} . В этом случае тепловой поток в критическом сечении волны горения определяется выражением

$$q_m = q_{m_0} + \xi q_{\scriptscriptstyle \mathcal{BH}},\tag{1}$$

где q_{mo} — тепловой поток в критическом сечении волны горения в отсутствие облучения; ξ — доля внешнего теплового потока, достигающего критического сечения волны горения.

По экспериментальным оценкам, например, при горении пороха Н потери светового потока на поглощение в продуктах сгорания и отражение от поверхности горения составляют 25...30% и $\xi =$ 0,7...0,75. Обычно исследования скорости горения под действием облучения проводят при $T_{\rm H} = 293$ К, когда $h(T_{\rm H}) = 0$. Поэтому уравнение (1) в этом случае преобразуется в

$$u\rho = \frac{q_{m_0}}{h_m} + \frac{\xi}{h_m}q_{_{GH}}.$$

В соответствии с этим уравнением принимается, что скорость горения линейно зависит от внешнего теплового потока $q_{\rm BH}$. Наклон прямой определяет значение максимальной энтальпии $h_{\rm m}/\xi$, а отсекаемое на оси абсцисс значение теплового потока определяет значение $q_{\rm m0}/\xi$.

На основе энтальпийного подхода процессы горения могут пополнить арсенал экспериментальных исследований процессов теплообмена ввиду прямой зависимости скорости горения от теплообмена с окружающей средой.

Таким образом, экспериментальное определение скорости горения, являющееся, по сути, прецизионным теплофизическим экспериментом, в сочетании с анализом температурного профиля может служить основой новых методов исследования теплофизических свойств веществ и процессов теплообмена.

2. СТРУКТУРА ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ В СООТВЕТСТВИИ С ЭНТАЛЬПИЙНЫМ ПОДХОДОМ

В рамках энтальпийного подхода [1—5] научно обоснована зависимость массовой скорости горения пиротехнических систем от теплофизических параметров в критическом сечении волны горения:

$$u\rho = \frac{q[x(T)]}{h[T(x)] - h(T_{H})},$$

где *и* — линейная скорость горения, м/с;

 ρ — плотность пиротехнического состава, кг/м³;

h — энтальпия, кДж/кг;

q — тепловой поток, кВт/м²;

х — координата рассматриваемого сечения волны горения, м;

T(x) — температура в точке x, К;

*Т*_н — начальная температура, К.

Следует отметить, что протекание химических реакций двояким образом влияет на скорость стационарного горения: через тепловой поток q[x(T)], представляющий собой часть общего тепловыделения от протекания химических реакций при высоких температурах, достигающую сечения волны горения T(x), и через энтальпию h[T(x)], включающую в себя тепловыделение от протекания химических реакций в прогретом слое горючей системы.

На рис. 1 и рис. 2 схематически показаны зависимости T(x) и h[T(x)] в волне стационарного горения. Энтальпия слоя горючей системы достигает максимального значения h_m при температуре T_m . При дальнейшем продвижении вверх по кривой T(x) тепловыделение от протекания химических реакций в слое за фиксированное время t^* начинает преобладать над затратами тепла на нагрев реагента и продуктов реакции. В результате этого зависимость h(T) проходит через нулевое значение при $T=T_s$, затем становится отрицательной, проходя через минимальное значение h_{min} , соответствующее максимуму тепло

выделения при температуре T_h и в пределе при $\eta \rightarrow 1$ становится рав-



Ťн

 $T^*T_m T_s$

T_h

Рис. 1. Характеристические температуры волны горения

Рис. 2. Схематическая зависимость энтальпии реакционноспособной системы от температуры: 1 — тепловыделение от протекания химических реакций ($h_{xим}$); 2 — энтальпия инертной системы; 3 — энтальпии реакционноспособной системы *h*=*h*_{ин}-*h*_{хим}

Таким образом, в волне стационарного горения можно выделить пять характерных температур: начальную Т_н, максимума теплопоглощения T_m, адиабатического сечения волны горения T_s, максимума тепловыделения T_h и максимальную температуру горения T_г. Изменение начальной температуры Т_н приводит к соответствующему изменению температур T_s и T_r , температуры T_m и T_h при этом остаются неизменными.

T_r T

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРИТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ОТ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Методика обработки данных при анализе процессов горения в рамках энтальпийного подхода не изложена четко в какой-то одной работе, а описана в многочисленных источниках [1—5]. Во многих случаях тонкости и нюансы, использованные в расчетах, остались за рамками изложения материалов [1—5]. За основу описанной ниже методики взяты идеи и последовательность расчетов из [5]. Контрольные расчеты по предлагаемой методике сделаны на примере смеси Mg+NaNO₃.

3.1. Определение зависимости теплоемкости и плотности от температуры

В рамках энтальпийного подхода обработка экспериментальных данных имеет свои особенности:

- Экспериментальные данные по зависимости скорости горения от температуры довольно часто содержат сведения при температурах ниже 273 К.
- 2. При обработке экспериментальных данных за начало отсчета энтальпии принято считать температуру T_н=293,15 К. Большинство же справочных данных, как правило, содержат сведения о теплофизических параметрах веществ и их изменении в области температур свыше 298,15 К [6—8].

Указанные обстоятельства требуют получения зависимостей теплоемкости и плотности веществ в диапазоне температур от 100 К и выше.

Для получения уравнений зависимостей $C_p = F(T)$ и $\rho = F(T)$ используются экспериментальные данные [9], полученные при температурах от 100 до 800 К (табл. 1).

Таблица 1

тк	Маг	НИЙ	Нитрат натрия		
1, K	<i>С_p</i> , Дж/(кг·К)	$ ho$, кг/м 3	C_p , Дж/(кг·К)	$ ho$, кг/м 3	
100	648	1763	600	2281	
120	729	1761	660	2281	
150	837	1758	770	2279	
200	936	1752	870	2275	
250	992	1746	955	2267	
300	1025	1739	1040	2255	
350	1051	1732	1170	2235	
400	1076	1725	1260	2208	
450	1099	1718	1390	2173	
500	1122	1711	1600	2131	
550	1144	1703	2600		
600	1166	1696			
650	1188	1689			
700	1210	1681			
800	1260	1665			

Теплофизические свойства магния и нитрата натрия [9]

Экспериментальные данные (табл. 1) аппроксимируются в пакете статистической обработки данных STATGRAPHICS Plus for Windows 3 [10] уравнениями вида

$$C_{p}(T) = a + bT^{2} + cT^{1} + dT + eT^{2} + fT^{3} + gT^{4},$$

$$\rho = a + bT + cT^{2}.$$
(2)
(3)

В результате статистической обработки с помощью модуля нелинейной регрессии пакета STATGRAPHICS получаются аппроксимационные уравнения, например:

для магния в диапазоне температур 100...800 К $C_p(T) = 3448,91 - 1,01863 \cdot 10^7 \cdot T^2 + 0,306045 \cdot 10^6 \cdot T^{-1} - 9,35601T + +0,0194323T^2 - 1,92443 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 0,751744 \cdot 10^{-8} \cdot T^4;$ $\rho(T) = 1775,29 - 0,112412T - 3,20995 \cdot 10^{-5} \cdot T^2;$ для нитрата натрия в диапазоне температур 100...500 К $C_p(T) = 27796,3 - 7,61545 \cdot 10^7 \cdot T^2 + 2,3277 \cdot 10^6 \cdot T^{-1} - 151,123T +$ +0,489173 T^2 -76,1381·10⁻⁵· T^3 +47,3527·10⁻⁸· T^4 ; $\rho(T)=2254,26$ -0,360223T-120,43·10⁻⁵· T^2 .

Полученные уравнения позволяют рассчитывать теплоемкость магния и нитрата натрия с невязкой с экспериментальными данными, не превышающей 1 % (рис. 3).



Рис. 3. Зависимость теплоемкости нитрата натрия (1) и магния (2) от температуры: точки — эксперимент; линии — расчет

Расчет плотности при различных температурах дает невязку с экспериментальными данными в пределах 0,5% (рис. 4).



Рис. 4. Зависимость плотности нитрата натрия (1) и магния (2) от температуры: точки — эксперимент; линии — расчет

3.2. Определение влияния степени уплотнения на теплофизические параметры волны горения

На втором этапе обработки данных необходимо убедиться в независимости параметров h_m и q_m от начальной температуры. Для этого анализу подвергаются экспериментальные данные зависимости скорости горения от начальной температуры при различной пористости (табл. 2).

Таблица 2

Vu	Скорость горения, мм/с при температуре, К								
Ку	213	273	293	323	373	423	473		
0,7	10,70	11,50	12,30	13,00	14,00	16,30	18,80		
0,8	8,15	8,78	9,20	10,00	10,80	11,50	14,60		
0,98	5,16	5,77	6,14	6,28	6,82	8,49	9,20		

Влияние начальной температуры и степени уплотнения на скорость горения смеси 46,2%Mg+53,8%NaNO₃

Примечание: диаметр заряда 15 мм, оболочка бумажная, средний диаметр частиц нитрата натрия 120 мкм, средний диаметр частиц магния 130 мкм (МПФ-3)

С помощью формул

$$\rho_{cM}(T) = \frac{K_{y}}{\frac{x_{Mg}}{\rho_{Mg}(T)} + \frac{x_{NaNO_{3}}}{\rho_{NaNO_{3}}(T)}},$$

$$h(T) = H(T) - H(293,15) = \int_{293,15}^{T} \left[x_{Mg} \cdot c_{p}^{Mg}(T) + x_{NaNO_{3}} \cdot c_{p}^{NaNO_{3}}(T) \right] dT$$

рассчитываются значения плотности и изменения энтальпии смеси Mg+NaNO₃ при различных температурах. Полученные значения $\rho_{cm}(T)$ используются в дальнейшем для расчета массовой скорости горения $(u\rho)_T$.

Для каждого значения K_y методом наименьших квадратов находятся значения q_m и h_m . При этом предполагается наличие линейной зависимости

$$(u\rho)^{-1} = \frac{h_m}{q_m} - \frac{1}{q_m}h(T) = a + b \cdot h(T)$$
(4)

При наличии линейной зависимости из уравнения (4) можно получить оценочные значения q_m и h_m , используя соотношения

$$q_m = -\frac{1}{b} \tag{5}$$

$$h_m = -\frac{a}{b} \tag{6}$$

Для смеси Mg+NaNO₃ линейная зависимость наблюдается при всех значениях степени уплотнения. Об этом свидетельствуют расчетные значения коэффициента линейной корреляции, близкие к «-1» (табл. 3).

Таблица 3

Оценки значений теплофизических параметров в критическог	м сече-
нии волны горения смеси 46,2%Mg+53,8%NaNO ₃	

Ky	Коэффиц не <i>(ир)⁻¹=</i>	иенты урав- сния са+b·h(T)	циент корре- яции <i>r</i>	льная невяз- ной и экспе- пьной скоро- рения, %	q_m , KBT/M ²	<i>h</i> _m , кЛж/кг
	а	Ь	коэффии л	Максима ка расчет риментал сти го		NZZAN KI
0,70	0,05940	-9,616·10 ⁻⁵	-0,997	1,8	10399	618
0,80	0,06850	-10,74.10-5	-0,988	5,7	9307	638
0,98	0,08626	-14,56.10-5	-0,989	5,1	6869	593

Примечание: диаметр заряда 15 мм, оболочка бумажная, средний диаметр частиц нитрата натрия 120 мкм, средний диаметр частиц магния 130 мкм (МПФ-3)

Следует отметить, что указанные расчеты достаточно просто реализуются в среде электронных таблиц EXCEL. По-мнению [5], значения h_m не должны зависеть от пористости заряда (коэффициента уплотнения). Графическая интерполяция полученных зависимостей показывает (рис. 6), что прямые $(u\rho)^{-1}=a+bh(T)$ при $(u\rho)^{-1}=0$ пересекают ось h(T) примерно в одной точке. Это обстоятельство позволяет определить параметры множественной регрессии и рассчитать значение h_{max} , являющееся параметром уравнения нелинейной регрессии

$$\mu \rho = \frac{q_0 + q_1 \cdot \Pi}{h_{\max} - h(T)},\tag{7}$$

где q_0 , q_1 , h_{max} — искомые параметры уравнения, описывающего изменение массовой скорости горения в зависимости от степени уплотнения при различных температурах.



Рис. 5. Влияние степени уплотнения на характер зависимости $(u\rho)^{-1} = F(h(T))$: линии — расчет, точки — экспериментальные данные при степени уплотнения 0,98 (1), 0,8 (2) и 0,7 (3)

Значения параметров уравнения (7) получаются с помощью модуля нелинейной регрессии пакета STATGRAPHICS:

$q_0, \kappa \mathrm{BT/M}^2$	6873
<i>q</i> ₁ , кВт/м ²	11351
<i>h_{max}, кДж/кг</i>	616,3

3.3. Определение влияния дисперсности компонентов на теплофизические параметры волны горения

Обработке подвергаются экспериментальные данные по влиянию дисперсности окислителей и горючих на скорость горения при различной температуре (табл. 4). Цель математической обработки получение уравнений зависимости параметров q_m и h_m в виде:

$$h_{max}^{c} = a_{0} + a_{1} \cdot d_{Mg} + a_{2} \cdot d_{NaNO_{3}}$$
(8)

$$q_{max}^{c} = b_{0} + b_{1} \cdot \Pi + \frac{b_{2}}{d_{Mg}} + b_{3} \cdot d_{NaNO_{3}}$$
(9)

где *a_i*, *b_i* — эмпирические коэффициенты;

*d*_{Mg} — средний диаметр частиц магния, мкм;

*d*_{*NaNO3} — средний диаметр* частиц нитрата натрия, мкм;</sub>

 Π — пористость заряда, $\Pi = K_y - 1$.

Таблица 4

Влияние температуры, дисперсности компонентов и степени уплотнения на скорость горения смеси 46,2%Mg+53,8%NaNO₃

Размер частиц, мкм		K_{ν}	Скорость горения, мм/с, при температуре,						pe, K
NaNO ₃	Mg	J	213	273	293	323	373	423	473
120	130	0,80	10,70	11,50	12,30	13,00	14,00	16,30	18,80
120	130	0,70	8,15	8,78	9,20	10,00	10,80	11,50	14,60
120	130	0,98	5,16	5,77	6,14	6,28	6,82	8,49	9,20
490	130	0,80	9,75		10,70				15,60
28	130	0,80	7,72	_	8,60	_	_	_	14,40
120	182	0,80	7,95		8,90				13,90
120	18	0,80	14,40		16,50				27,30

Примечание: диаметр заряда 15 мм, оболочка бумажная, средний диаметр частиц МПФ-2 — 182 мкм, МПФ-3 — 130 мкм, МПФ-5 — 18 мкм [5]

Необходимо отметить, что результаты расчетов сильно зависят от того, какое значение среднего диаметра принять для каждой марки порошка. Расхождения в некоторых случаях могут достигать 100%.

Дальнейшая математическая обработка экспериментальных данных (табл. 4) осуществляется в два этапа.

На первом этапе рассчитываются оценки значений параметров q_m и h_m для каждого сочетания d_{Mg} , d_{NaNO3} и K_y . Для этого используется методика, описанная в п. 3.2. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Влияние размеров частиц компонентов и степени уплотнения на теплофизические параметры волны горения смеси 46,2%Mg+53,8%NaNO₃

Размер частиц, мкм		V	$q_m,$	h_m ,	
NaNO ₃	Mg	K_y	кДж/кг	$\kappa BT/M^2$	
120	130	0,80	9307	616,3	
120	130	0,70	10399	616,3	
120	130	0,98	6869	616,3	
490	130	0,80	12859	742,0	
28	130	0,80	9011	569,0	
120	182	0,80	9105	632,0	
120	18	0,80	14921	560,0	

На втором этапе с помощью модуля множественной регрессии пакета STATGRAPHICS определяются параметры зависимостей (10) и (11). Например, для рассматриваемой смеси Mg+NaNO₃ получаются уравнения

$$h_{max}^c = 509,972 + 0,447225 \cdot d_{Mg} + 0,359533 \cdot d_{NaNO_3}$$
(10)

$$q_{max}^{c} = 5274, 13 + 12590, 6 \cdot (1 - K_{y}) + \frac{1913010}{d_{Mg}^{2}} + 10,2007 \cdot d_{NaNO_{3}}$$
(11)

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашпоров Л. Я., Рабинович В. А., Шелудяк Ю. Е. Теплофизические аспекты процесса горения//Теплофизические свойства веществ и материалов. ГСССД, 1991. — Вып. 30. — С. 139—147

2. Влияние начального теплового состояния на скорость горения конденсированых систем/Л.Я.Кашпоров, Ю.Е.Шелудяк, В.М. Мальцев и др.//Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированых систем: Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. — Черноголовка. — 1989. — С. 18—21.

3. Кашпоров Л. Я., Рабинович В. А., Шелудяк Ю. Е. Энтальпийный подход к изучению процесса горения. І. Уравнение закона сохранения энергии для химически реагирующих систем и следствия, вытекающие из него в случае процесса горения//ИФЖ. — 1994.— Т. 66, № 3. — С. 291—300.

4. Кашпоров Л. Я., Рабинович В. А., Шелудяк Ю. Е. Энтальпийный подход к изучению процесса горения. П. Результаты теплового анализа некоторых горючих систем//ИФЖ. — 1994.— Т. 66, № 3. — С. 301—309.

5. Функциональная зависимость скорости горения смесей Mg+NaNO₃ от многих переменных/Н. А. Силин, Л. Я. Кашпоров, Ю. Е. Шелудяк и др.//ФГВ. — 1992.— Т. 28. — № 5.— С. 27—34.

6. Gurvich L.V., Iorish V.S. et al. IVTANTHERMO — A Thermodynamic Database and Software System for the Personal Computer: User's Guide. — Boca Raton, CRC Press, Inc. — 1993.

7. JANAF Thermochemical Tables, NSRDS — NBS 37. Thechnical Notes. — Washington: US Gov. Print. Office, 1971. — 1141 p.

8. Термические константы веществ: В 5 т./Под ред. В. П. Глушко. — М.: ВИНИТИ АН СССР, 1965—1973.

9. Теплофизические свойства компонентов горючих систем/ Ю. Е. Шелудяк, Л. Я. Кашпоров, Л. А. Малинин, В. Н. Цалков. — М.: НПО «Информ ТЭИ», 1992. — 184 с.

10. Тюрин Ю. Н., Макаров А. А. Анализ данных на компьютере/Под ред. В. Э. Фигурнова. — М.: ИНФРА-М, Финансы и статистика, 1995. — 384 с.

Кафедра физической химии

Методические указания

Определение теплофизических параметров в критическом сечении волны горения

Олег Серафимович Алехин Юлия Игоревна Климентьева Дмитрий Владимирович Королев Константин Александрович Суворов

Отпечатано с оригинал-макета. Формат 60×90 1/16

Печ. л. 1. Тираж 75 экз. Заказ №

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), ИК «Синтез»

198013, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 26