

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ НОРМАЛЬНОГО ГОРЕНИЯ  
ПОРИСТЫХ СИСТЕМ ПОД ПОСТОЯННЫМ ДАВЛЕНИЕМ

В. К. Боболев, А. Д. Марголин, С. В. Чуйко  
(Москва)

Нормальное горение пористых зарядов взрывчатых веществ, при котором теплопередача в зоне горения осуществляется путем теплопроводности и излучения, в некоторых условиях переходит в конвективное, когда существенную роль играет тепло- и массоперенос в зоне горения, осуществляемый газовыми струями, проникающими в поры заряда. После проникновения горения в поры заряда в одних случаях устанавливается режим стационарного конвективного горения [1—3], скорость которого существенно превосходит скорость нормального горения, в других — конвективное горение приводит к детонации или взрыву заряда [4, 5], иногда горение затухает.

Теоретический анализ горения пористых зарядов ВВ в условиях постоянного давления привел к критерию устойчивости [6, 7] вида:

$$(\rho U)_* d(c/\lambda) = \text{const.} \quad (1)$$

Условие (1) означает, что если величина произведения массовой скорости горения  $\rho U$  на гидравлический диаметр пор  $d$  меньше некоторой константы, то нормальное горение устойчиво, если же указанное произведение превосходит критическую величину, то горение проникает в поры заряда. Поскольку отношение теплоемкости  $c$  к коэффициенту теплопроводности ВВ  $\lambda$  изменяется в относительно узких пределах, критерий (1) приближенно сводится к условию

$$\varphi_* = (\rho U)_* d = \text{const.} \quad (2)$$

Проведенная обработка имевшихся в литературе экспериментальных данных показала [6], что условие (2) удовлетворительно описывает границу устойчивости горения пористых зарядов индивидуальных ВВ и гомогенных составов, причем  $\varphi_* = 7,5 \pm 4$  мг/см·сек.

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния некоторых характеристик заряда на условия нарушения нормального горения и определению критического значения величины  $\varphi_*$  для некоторых гетерогенных систем.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходные вещества рассеивали на стандартных ситах на фракции. Сложные системы готовили путем тщательного смешения. Во всех опытах применяли заряды насыпной плотности, что обеспечивало неизменность первоначальных размеров частиц. Для сжигания вещества

помещали в плексигласовые стаканы с внутренним диаметром 7 и высотой 35 мм. Поджигание осуществлялось от электроспирали. Плотность зарядов определяли по весу и размерам. Горение происходило в бомбе объемом 2 л в атмосфере азота. Фиксировалось изменение начального давления в бомбе (0,5—1,5 атм) и велось фотографическое наблюдение за горением. Такая методика позволяла определять скорость и характер горения. На рис. 1 приведены типичные фотозаписи, соответствующие нормальному и конвективному режимам горения.

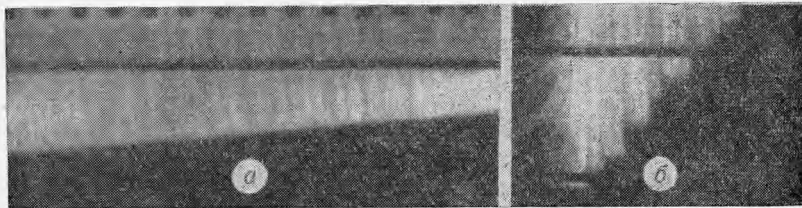


Рис. 1. Фотозаписи горения порошкообразного гексогена (состав 2, табл. 2). Скорости развертки на обеих записях одинаковые.  
а —  $p_0=52$  атм, горение нормальное; б —  $p_0=56$  атм, горение конвективное.

Методику определения критической величины  $(\rho U)_*$  поясним на примере определения зависимости  $(\rho U)^* = f(D)$  для гексогена. Заряды гексогена с данным размером частиц  $D$  сжигали при различных начальных давлениях  $p_0$  до тех пор, пока не выявлялась граница нормального горения. Рис. 1 и 2 показывают, что смена режимов горения четко фиксируется как на фотозаписях, так и на зависимостях  $\rho U = f(p)$ , где в некоторой точке наблюдается резкое изменение характера фотозаписи

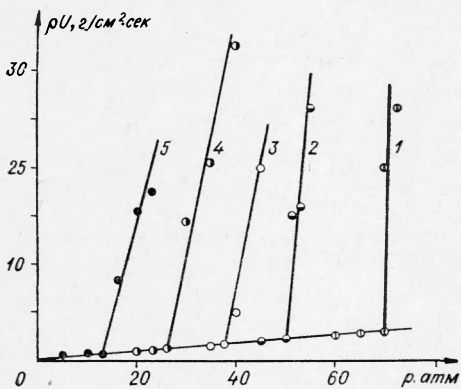


Рис. 2. Зависимость скорости горения зарядов гексогена с различными размерами частиц от давления; цифры у кривых соответствуют номерам составов по табл. 1.

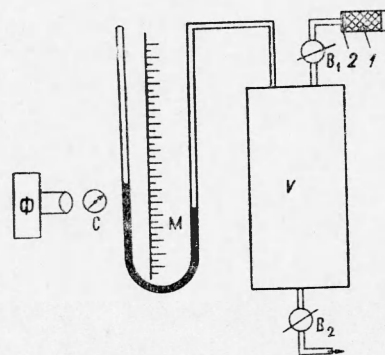


Рис. 3. Схема установки для определения газопроницаемости мало-плотных зарядов.

и быстрый подъем скорости горения при незначительном увеличении начального давления. Аналогичная методика была применена и во всех остальных случаях.

Характерный размер пор заряда можно рассчитывать по формуле [8]:

$$d = 4F/\Pi = 2(1 - \delta) d_0 \sqrt{0,205 S_0 / v_0^{2/3} / 3\delta}, \quad (3)$$

где  $F$  — площадь сечения поры;  $\Pi$  — ее смоченный периметр;  $V_0$  — объем частицы вещества;  $S_0$  — ее поверхность;  $\delta$  — относительная плотность заряда;  $(1 - \delta)$  — пористость заряда;  $d_0$  — диаметр шара, эквивалентного данной частице по объему. Формула (3) применима в основном для монодисперсных систем. Если же данная система содержит частицы различных размеров, то в качестве среднего эффективного диаметра эквивалентного шара принимают иногда среднее арифметическое значение

$$\bar{d}_1 = \sum a_i D_i, \quad (4)$$

где  $a_i$  — весовая доля частиц узкой фракции с диаметром  $D_i$ . Однако было показано [8], что понятию гидравлического диаметра поры лучше отвечает среднее гармоническое значение размера частиц полидисперсной смеси  $\bar{d}_2$ , определяемое из выражения

$$1/\bar{d}_2 = \sum (a_i/D_i). \quad (5)$$

Как правило, формула (4) дает завышенное по сравнению с (5) значение диаметра.

Гидравлический диаметр пор  $d$  можно также рассчитать по измеренной величине  $k$  — газопроницаемости заряда [9]:

$$d = \sqrt{2k/(1 - \delta)}. \quad (6)$$

На опытном определении величины  $k$  остановимся подробнее. На рис. 3 показана схема прибора для определения газопроницаемости малоплотных систем. При закрытом вентиле  $B_1$  производится откачка известного большого ( $\sim 1,5$  л) объема  $V$  до некоторого давления  $p_1$ , меньшего атмосферного на  $\Delta p$  (100—150 мм вод. ст.). Затем  $B_1$  перекрывают и открывают  $B_2$ . Начинается натекание воздуха через испытуемый заряд  $I$  в объем  $V$ . Одновременно с помощью кинокамеры  $\Phi$  производится фиксация показаний манометра  $M$  и секундомера  $T$ . Нетрудно получить, что

$$k = v(LV/S) (\dot{p}/p_1 \Delta p),$$

где  $v$  — величина коэффициента вязкости фильтрующегося воздуха, равная при 20°С  $1,87 \cdot 10^{-4}$  г/см · сек;  $L$  — длина заряда;  $S$  — площадь его поперечного сечения;  $\dot{p}$  — скорость изменения давления в объеме  $V$ . При фиксированных  $V$ ,  $L$  и  $S$  и перепаде  $\Delta p$ , значительно меньшем 1 атм, имеем:

$$k = \text{const } \dot{p}/p_1 \cdot \Delta p = \text{const } \cdot \psi. \quad (7)$$

По кинограмме определяем зависимость  $\dot{p}(\tau)$ , откуда находим величину  $\dot{p}$ . Затем с помощью (7) и (6) рассчитываем  $d$ . Следует обратить внимание на то, что испытуемый заряд помещается на подкладку 2 (см. рис. 3) из фильтровальной бумаги, что необходимо для обеспечения стабильности и надежности результатов измерений. В связи с этим перед измерением газопроницаемости заряда находим постоянную прибора  $\psi_0$ , определяемую удельным сопротивлением прокладки 2 и других частей установки в целом. В измеренное значение величины  $\psi_{\text{изм}}$  заряда вводится поправка на постоянную прибора, так что в (7) подставляем

$$\psi = (1/\psi_{\text{изм}} - 1/\psi_0)^{-1}.$$

Данная установка отличается от известного прибора ПСХ-2 значительно увеличенным объемом  $V$ , что позволяет измерять весьма малые проницаемости, и методом регистрации показаний.

Суммарная точность определения величины  $(\rho U)_* d = \varphi_*$  оценивается в 6—10%. В таблицах приведены величины, являющиеся средним значением 3—5 измерений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**Влияние размера частиц.** Основные результаты опытов по изучению влияния размера частиц заряда на величину  $\varphi_*$  представлены в табл. 1. Изучены перхлорат аммония (ПХА) и гексоген. Максимальные плотности этих веществ соответственно равны 1,95 и 1,8 г/см<sup>3</sup>. Гидравлический диаметр пор рассчитывался по формуле (5); в качестве размера частиц принимали среднее арифметическое значение для данной фракции. Из табл. 1 видно, что критическая величина обоих веществ от размера частиц в изученных пределах не зависит, но несколько изменяется от вещества к веществу, на что указывалось и в работе [6].

Таблица 1

Влияние размера частиц  $D$  на условия нарушения нормального горения

$D, \text{ мк}$	Гексоген					Перхлорат аммония				
	$\rho, \text{ г/см}^3$	$d, \text{ мк}$	$p_*, \text{ атм}$	$(\rho U)_*$	$\varphi_*$	$\rho, \text{ г/см}^3$	$d, \text{ мк}$	$p_*, \text{ атм}$	$(\rho U)_*$	$\varphi_*$
50—63	0,996	31	66	2,13	6,5	1,07	31	50	1,17	3,63
63—100	1,035	41	46	1,57	6,4	1,205	34	40	0,97	3,27
100—160	1,038	64	26	1,015	6,5	1,145	67	20	0,535	3,58
160—250	1,015	105	12	0,63	6,65	1,043	119	12	0,315	3,74
250—315	1,00	151	5	0,437	6,6	0,92	212	6	0,175	3,71

Примечание  $(\rho U)_*$  — в г/см<sup>2</sup> · сек;  $\varphi_*$  — в мг/см · сек.

**Влияние распределения частиц по размерам.** Основная часть экспериментов проведена со смесями двух фракций гексогена, взятыми в различных соотношениях. Были проведены также опыты со смесями трех фракций. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние распределения частиц гексогена по размерам на условия нарушения нормального горения

номер	Состав,		$\rho, \text{ г/см}^3$	$d_*, \text{ мк}$	$p_*, \text{ атм}$	$(\rho U)_*$	$\varphi_*$
	вес, %						
1	100:0:0		0,996	32	66	2,13	6,8
2	75:25:0		1,03	36	54	1,785	6,5
3	50:50:0		1,75	50	40	1,40	7,1
4	25:75:0		1,10	74	25	0,98	7,25
5	10:90:0		1,09	93	17	0,765	7,05
6	0:100:0		1,015	104	12	0,63	6,65
7	50:30:20		1,20	44	40	1,63	7,16
8	20:30:50		1,113	78	18	0,90	7,02

В табл. 2 приведено соотношение фракций 50—63, 160—250, 250—315 мк. Величина диаметра поры  $d_p$  вычислена на основании измеренной газопроницаемости зарядов. На рис. 4 показаны зависимости характерного диаметра пор  $d$  гексогена от весового соотношения фракций 50—63 и 160—250 мк. На рис. 5 приведены значения критической величины  $\varphi_*$  для тех же составов, причем значения  $d$  взяты из графиков рис. 4. Видно, что критическое значение  $\varphi_*$  для смеси различных фракций не зависит от фракционного состава, если  $d$  определено из данных по газопроницаемости заряда. В первом приближении значение  $\varphi_*$  совпадает с приведенным в работе [6]. Следует заметить, что скорость нормального горения составов 7 и 8 (табл. 2) оказалась несколько выше, а зависимость от давления — более сильной, чем у высокоплотного гексогена.

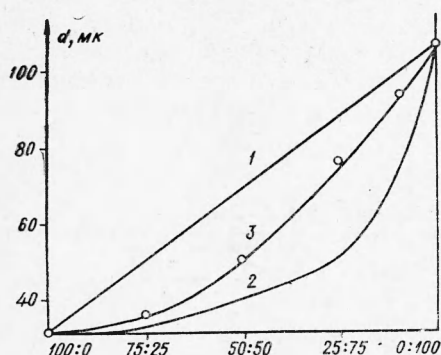


Рис. 4. Зависимость среднего диаметра пор  $d$  от весового соотношения, рассчитанная (гексоген):

1 — по формуле (4); 2 — по формуле (5); 3 — по величине измеренной газопроницаемости заряда.

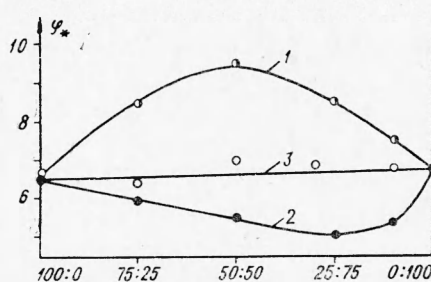


Рис. 5. Зависимость критической величины  $\varphi_*$  гексогена от весового соотношения фракций 50—63 и 160—250 мк в заряде.

Сравнительные измерения показали, что в случае монодисперсных зарядов определение диаметра пор по формуле (3) и по величине газопроницаемости (6) дает совпадающие значения.

В связи с этим величину  $d$  для монодисперсных систем можно легко рассчитывать, а для полидисперсных — определять по газопроницаемости.

**Влияние состава смеси.** Были исследованы типичные гетерогенные системы, состоящие из смеси горючих (сахароза, уротропин) и окислителей (ПХА) и перхлората калия (ПХК). Последний в отличие от ПХА не способен к самостоятельному горению. Выбранные вещества существенно отличаются друг от друга по физико-химическим характеристикам, в частности тем, что ПХА и уротропин не плавятся при горении, тогда как ПХК и сахароза, как правило, плавятся в поверхностном слое конденсированной фазы горячей смеси. Результаты проведенных опытов по выявлению влияния состава смеси на условия нарушения нормального горения представлены в табл. 3.

Результаты исследования смеси ПХА — гексоген представлены в табл. 4.

Оба компонента этой смеси способны к самостоятельному горению и имеют отличающиеся значения критической величины.



Таблица 3

## Влияние состава смеси на условия нарушения нормального горения

номер	Состав		$\delta$	$d$ , мк	$p_*$ , атм	$(\rho U)_*$	$\varphi_*$
	компоненты	вес, %					
1	ПХА — (100 — 160 мк) — сахароза (100—160 мк)	100:0	0,587	67	20	0,535	3,58
		90:10	0,580	63	13	0,608	3,80
		80:20	0,580	63	8	0,627	3,90
		70:30	0,568	66	7	0,574	4,43
2	ПХА—(100—160 мк)—уротропин	85:15	0,683	69	7	0,752	5,22
		75:25	0,634	57	6	0,655	3,78
		65:35	0,687	47	9	0,705	3,33
3	ПХК—(160—250 мк)—сахароза (160—250 мк)	90:10	0,535	119	14	0,760	9,00
		80:20	0,555	110	7	0,825	9,05
		70:30	0,540	116	6	0,775	8,95
		60:40	0,567	105	6,5	0,880	9,20
	ПХК—(63—100 мк)—уротропин	75:25	0,598	62	9	1,60	9,90
		65:35	0,630	57	10	1,86	10,65
		55:45	0,654	55	12	1,87	10,40
		45:55	0,600	45	16	2,15	9,60

Примечание. Размер частиц уротропина <100 мк. Величину  $d$  для смесей 1 и 3 определили расчетом по формуле (3), смесей 2 и 4 — по газопроницаемости зарядов.  $\delta = \rho/\rho_{\max}$  — относительная плотность зарядов.

Таблица 4

## Устойчивость горения смеси ПХА с гексогеном (размер частиц обоих компонентов равен 160—250 мк)

Весовой состав, %	$\delta$	$d$ , мк	$p_*$ , атм	$(\rho U)_*$ , г/см <sup>2</sup> ·сек	$\varphi_*$ , мг/см·сек
100:0	0,535	119	12,0	0,315	3,74
75:25	0,543	115	3,5	0,350	4,05
50:50	0,544	115	2,8	0,553	6,35
25:75	0,562	107	5,0	0,607	6,48
0:100	0,564	106	12,0	0,630	6,65

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Пригодность критерия (1) для описания устойчивости горения пористых зарядов гетерогенных смесей не была заранее очевидна и требовала опытного обоснования. Полученные в данной работе экспериментальные данные показывают, что критерий (1) описывает границу устойчивого горения пористых гетерогенных систем с достаточной точностью.

Из табл. 2 видно, что изменение размера пор за счет диаметра составляющих заряд частиц практически не сдвигает границу устойчивого горения, если ее описывать в виде (1), (2). Значение  $\varphi_*$  по табл. 1

у ПХА равно  $3,6 \text{ мг/см} \cdot \text{сек}$ ; по данным работы [6], —  $3,7 \text{ мг/см} \cdot \text{сек}$ . У гексогена по табл. 1  $\varphi_* = 6,5 \pm 0,15$ , а по табл. 2 ( $d$  рассчитано по газопроницаемости заряда) равно  $6,9 \text{ мг/см} \cdot \text{сек}$ . Напомним, что в [6] приводилась величина  $6,9 \text{ мг/см} \cdot \text{сек}$ .

Анализ данных табл. 2 и рис. 4 и 5 позволяет заключить, что из расчетных методов определения характерного размера пор (формулы (4) и (5)) лучшие результаты (более строгое выполнение критерия (1)) дает формула (5). Однако самые лучшие результаты получаются при использовании величины  $d$ , найденной по данным экспериментального определения газопроницаемости зарядов. Это обстоятельство позволяет существенно расширить область применения критерия (1), поскольку в рассмотрение теперь включаются и пористые заряды из набора полидисперсных частиц. Отсюда же вытекает и второй весьма важный вывод: при нарушении нормального горения пористых систем в нормальном случае определяющими являются поры со средним размером диаметра, т. е. те, которых в заряде больше всего. Таким образом, предположение [10], согласно которому нарушение нормального горения определяют поры максимального диаметра, в наших опытах не подтвердилось. Дело в том, что существенное воздействие на процесс горения крупные поры могут оказать только в том случае, когда они составляют непрерывный вертикальный ряд, или же прирост общей поверхности горения за счет проникновения горения в эти поры будет значительным. Первый случай крайне маловероятен, так как образование непрерывного ряда из  $n$  штук крупных пор пропорционально содержанию этих пор в заряде, взятому в степени  $n$ . Во втором случае нужно учесть, что чем больше диаметр поры, тем она короче, а потому менее эффективна. Вследствие этого существенное изменение поверхности горения (а с ней и массовой скорости сгорания заряда) может произойти только при распространении горения в поры среднего диаметра, которых в заряде больше.

Исследование влияния состава смеси на устойчивость ее горения (см. табл. 3 и 4) позволило установить, что добавка к перхлорату аммония как плавкой сахарозы, так и неплавкого уротропина (до 30—35 вес. %) приводит к весьма слабому изменению критического значения величины  $\varphi_*$ , характерного для чистого ПХА. Аналогично можно заключить, что как состав, так и свойства горючего слабо влияют на  $\varphi_*$  смесей на основе перхлората калия. Данные табл. 3 и 4 показывают, что смеси ПХК с сахарозой и уротропином имеют  $\varphi_* \approx 9—10 \text{ мг/см} \cdot \text{сек}$ , близкое к  $\varphi_*$  для типичных вторичных ВВ [6]. Критическая величина  $\varphi_*$  смеси ПХА с сахарозой имеет тенденцию к росту при увеличении содержания горючего, а у смеси с уротропином проходит через максимум и далее несколько уменьшается.

Изменение размеров частиц компонентов не изменяло значения  $\varphi_*$ . Так, опыты со смесью ПХА — сахароза состава 80 : 20 с уменьшенным размером частиц ( $D=50—63 \text{ мк}$ ,  $\delta=0,557$ ,  $d=30 \text{ мк}$ ) привели к  $\varphi_* = 3,96 \text{ мг/см} \cdot \text{сек}$  ( $p_0=23 \text{ атм}$ ,  $(U\rho)_* = 1,28 \text{ г/см}^2 \cdot \text{сек}$ ), что совпадает со значением  $\varphi_*$  для смеси с размером частиц 100—160 мк.

Исследование горения смеси ПХА — гексоген (см. табл. 4) было проведено в широком диапазоне соотношений компонентов. Оказалось, что  $\varphi_*$  не является аддитивной функцией состава, но определяется тем компонентом, объемное содержание которого в смеси больше.

Важно, что при изменении состава (например, смеси ПХА — сахароза) происходит, в частности, весьма сильное изменение температуры продуктов сгорания (у смеси состава 80 : 20 по сравнению с 100 : 0 —

в два раза). Тем не менее в согласии с теорией это не повлияло на величину  $\varphi_*$ .

В работе [6] было показано, что критическая величина  $\varphi_*$  таких легкоплавких веществ, как тротил и пикриновая кислота, существенно не отличается от  $\varphi_*$  неплавкой нитроцеллюлозы (соответственно 8 и 10 мг/см · сек). Из табл. 3 и 4 вновь следует, что способность горючего к плавлению в общем случае не является тем фактором, который определяет устойчивость горения и возможность его проникновения в поры заряда. Что же касается причины различия величин  $\varphi_*$ , скажем, у чистого ПХА и у смесей на основе ПХК, то в настоящее время нет убедительных данных, позволяющих сделать какой-либо определенный вывод без проведения дополнительных исследований.

Критерий (1), как уже отмечалось ранее [6], описывает только предельные условия нормального горения пористых зарядов и не касается процессов, протекающих при горении за пределом устойчивости.

Ранее в работах К. К. Андреева [11, 12] указывалось, что добавка к перхлорату аммония небольшого количества тонкодисперсного алюминия облегчает переход горения смеси при возрастающем давлении во взрыв. Проведенные же опыты показали, что критическая величина  $\varphi$  (для условий горения при постоянном давлении) смеси ПХА — алюминий не ниже, а даже превышает величину  $\varphi_*$  для чистого ПХА. Таким образом, введение алюминия повышает устойчивость горения рассматриваемой смеси по сравнению с чистым ПХА в условиях проведения опытов под постоянным давлением.

Известно, что при добавке небольших количеств мелкокристаллического вещества к заряду с более крупными размерами частиц обычно хорошо облегчается переход горения под возрастающим давлением во взрыв.

В рассмотренном случае, как видно из табл. 2, состав 5, содержащий небольшое количество мелкокристаллического порошка, имел нормальное значение критической величины  $\varphi_*$ . Можно предполагать, что эффект мелких частиц проявляется только за пределом устойчивого горения.

Таким образом, один и тот же фактор может одновременно увеличивать критическое значение величины  $\varphi_*$  и способствовать интенсификации конвективного горения заряда за пределом устойчивости.

В заключение следует отметить, что при тщательной постановке экспериментов разброс критических значений величины  $\varphi_*$  для данного вещества оказывается весьма небольшим. Различие значений  $\varphi_*$  для данного вещества, которое наблюдалось при обработке литературных данных [6], обусловлено недостаточным единообразием выполнения опытов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показывает, что установленное ранее и проверенное на гомогенных составах условие устойчивости нормального горения вида  $\varphi_* = (\rho U)_* d = 7,5 \pm 4$  мг/см · сек количественно описывает также и пределы нормального горения гетерогенных систем. Экспериментально доказано, что это соотношение описывает также устойчивость горения полидисперсных составов.

Из опытных данных следует, что критическая величина  $\varphi_*$  смеси из компонентов, способных к самостоятельному горению, определяется тем из них, объемное содержание которого в составе больше.



Из теоретического вывода критерия устойчивости и анализа экспериментальных данных следует, что критерий (1) описывает положение границы устойчивого горения, но не может рассматриваться как единственный параметр, определяющий режим горения за пределом устойчивости.

Поступила в редакцию  
24/V 1966

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение ВВ. М., ГЭИ, 1957.
2. К. К. Андреев, С. В. Чуйко. ЖФХ, 1963, 37, 6.
3. W. Taylor. Trans. of the Farad. Soc., 1963, 58, 561.
4. С. В. Чуйко, И. А. Карпунин, В. К. Боболев. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 1.
5. Griffiths et al J. Ph. Chem., 1960, 11, 4154.
6. С. В. Чуйко, А. Д. Марголин. ФГВ, 1966, 3.
7. А. Д. Марголин. Докл. АН СССР, 1961, 140, 4.
8. С. С. Забродский. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое. М., ГЭИ, 1963.
9. Л. С. Лейбензон. Течение природных жидкостей и газов в пористых средах. М., ГТИ, 1947.
10. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков, А. А. Сулимов. ПМТФ, 1963, 4.
11. К. К. Андреев. Докл. АН СССР, 1962, 148, 6.
12. К. К. Andreev. IX-th International Symposium on Combustion. New York, 1962.