

установление автоколебательных режимов может быть полезным практически. Это делает актуальной задачу о методах параметрического воздействия на систему при помощи модуляции различных параметров с целью улучшения эксплуатационных характеристик топок с дисперсным топливом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раушенбах Б. В. Вибрационное горение.— М.: ГИФМЛ, 1961.
2. Виленский Т. В., Хзмалян Д. М. Динамика горения пылевидного топлива.— М.: Энергия, 1978.
3. Буевич Ю. А., Федотов С. П. ФГВ, 1985, 21, 5, 64.
4. Акуличев В. А., Алексеев В. Н., Буланов В. А. Периодические фазовые превращения в жидкостях.— М.: Наука, 1986.
5. Буевич Ю. А., Мансуров В. В., Наталуха И. А. ИФЖ, 1988, 55, 2, 275.
6. Буевич Ю. А., Наталуха И. А. ТВТ, 1988, 26, 3, 535.
7. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва.— М.: Наука, 1980.
8. Колесняков П. М., Карпова Т. А. // Тепло- и массоперенос: Итоги и перспективы.— Минск, 1985.
9. Тюльпанов Р. С., Соболев О. П. ФГВ, 1967, 2, 1, 94.
10. Голдобин Ю. М. ИФЖ, 1983, 45, 3, 452.
11. Голдобин Ю. М. ИФЖ, 1986, 50, 1, 114.
12. Randolph A. D., Larson M. A. Theory of particulate processes.— N. Y.: Academic Press, 1971.

г. Свердловск

Поступила в редакцию 3/IV 1989,
после доработки — 10/V 1989

УДК 662.311.1

Ю. Г. Шепелев, А. Е. Фогельзанг, А. П. Денисюк, А. Е. Демидов

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ БАЛЛИСТИТНЫХ ПОРОХОВ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Закономерности горения баллиститных порохов подробно рассмотрены при давлении $p \leq 10$ МПа. При более высоком давлении исследовано, главным образом, влияние p на скорость горения u [1, 2]. Влияние же начальной температуры T_0 практически не изучалось. В то же время знание зависимости $u(T_0)$ позволило бы подойти к вопросу о механизме горения порохов при высоких давлениях. В этой связи диапазон давлений расширен до 300 МПа при $T_0 = 223 \div 323$ К.

Для исследования были выбраны пороха, в которых соотношение между нитроэфирным пластификатором и нитроцеллюлозой (НЦ) изменялось от 26,5/56 до 60/40. В качестве нитроэфирных пластификаторов использовали нитроглицерин (НГЦ), нитроглицоль (НГЛ) и динитрат диэтиленгликоля (ДНДЭГ). Это позволило получить ряд составов, отличающихся по температуре горения T_r на 1480 К. Характеристики всех исследованных составов приведены в табл. 1. (Все пороха содержали по 0,5—1,0 % централита и вазелинового масла.)

Опыты проводили в манометрической бомбе объемом 35 см³. Для определения скорости горения использовали методы Вьеля (рис. 1, а) и угловых точек (рис. 1, б). Изменение давления в бомбе во времени t фиксировали с помощью тензодатчика, тензостанции ЛХ-7000 и светолучевого осциллографа Н-117 или пьезодатчика, усилителя заряда с входным сопротивлением 10^{13} Ом и цифрового осциллографа С9-8.

По методу Вьеля испытуемый образец горит под возрастающим давлением собственных газов. Здесь применяли заряды в виде цилиндрической шашки диаметром 18 и высотой 18—20 мм и воспламенитель из

Таблица 1

Порох	Пластификатор	Q, кДж/кг	T _г , К (при p=300 МПа)	f, кДж/кг
H265	НГЦ	3278	2062	970
H280		3866	2322	1048
H330		4359	2627	1110
H453		4796	2889	1164
H490 (порох А)		5198	3126	1196
H495		5363	3229	1203
H545		5543	3329	1220
H600		5887	3509	1237
Д330	ДНДЭГ	3281	2029	965
Д430		3869	2286	1052
НГ280	НГЛ	3889	2298	1042
НГ490		5239	2994	1180

Примечание. Буквы в наименовании пороха означают тип нитроэфирного пластификатора, а цифра — его содержание в десятых долях процента. Порох Н265 содержит 9 % динитротолуола и 4,5 % дибутилфталата, а пороха Н280 и НГ280 — по 12 % динитротолуола. Обозначения: Q — калорийность, f — сила пороха.

пироксилина, помещенные в бумажный стаканчик. Плотность заряжания для испытуемого образца массой 7—9 г составляла 0,2—0,25 г/см³. При каждой температуре проводили 3—6 опытов. Кривую $p(\tau)$ обрабатывали в интервале изменения сгоревшей части заряда $\psi = 0,1 \div 0,9$, при этом на ЭВМ Электроника ДЗ-28 рассчитывали величину ψ [3], а затем на основании геометрического закона — скорость горения. Из полученных данных путем обработки методом наименьших квадратов вычисляли коэффициенты уравнения $u = Vr^n$.

В случае метода угловых точек, когда испытуемый образец горит практически при постоянном или очень слабо возрастающем давлении (см. рис. 1, б), заряды состояли из цилиндрической таблетки диаметром 18 и высотой 3—4 мм и дополнительного быстрогорающего состава из пироксилина или пороховой массы Н490. Заряды вкладывали в бумажный стаканчик. Плотность заряжания для испытуемой таблетки массой 1—1,5 г составляла 0,03—0,04 г/см³. Скорость горения определяли, исходя из измеренной перед опытом толщины горящего свода $2e_1$, равной высоте таблетки, и времени ее горения (см. рис. 1, б)

$$u = 2e_1/2(\tau_2 - \tau_1)$$

и относили ее к среднему давлению между точками 1 и 2:

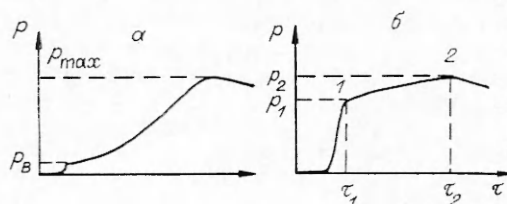
$$p = (p_1 + p_2)/2.$$

Изменением массы дополнительного заряда устанавливали уровень давления. Для получения кривой $u(p)$ этим методом при каждой температуре в интервале $p = 25 \div 400$ МПа проводили 15—20 опытов с различными навесками дополнительного заряда.

Выбор в качестве испытуемого элемента для метода угловых точек цилиндрической таблетки обусловлен простотой ее изготовления, обеспечивающей очень малую (до 0,05 мм) разностовность (чего трудно добиться на трубках). Это позволяет достичь высокой точности определения u . В данном методе горение при постоянном или слабо возрастающем

Рис. 1. Типичные осциллограммы $p(\tau)$.

p_B — давление воспламенителя; p_1 — амплитуда левой угловой точки (начало горения таблетки); p_2 — амплитуда правой угловой точки (конец горения таблетки).



давлению обеспечивается балансом двух конкурирующих факторов: газо-прихода от горящей таблетки и теплоотвода в стенки бомбы. Баланс достигается подбором геометрических размеров элемента. При этом для определения конца исследуемого процесса необходимо, чтобы горение не происходило на спаде давления. В данных условиях это возможно, если отношение высоты таблетки к ее диаметру будет не более 0,225, что обеспечивает необходимую величину поверхности в конце горения.

Воспламенитель из пироксилина или пороховой массы, размещенный в стаканчике вокруг испытуемого элемента, одновременно служит тепло-изолятором. Чтобы выяснить, насколько быстро заряд принимает температуру окружающей среды, исследована динамика термостатирования заряда с помощью вольфрам-ренийевых термопар толщиной 50 мкм, помещенных в центре и на поверхности шашки. Установлено, что заряд (термопара в центре шашки) принимает температуру термокамеры приблизительно за 2 ч. После извлечения заряда из термокамеры изменение температуры на 1 К на поверхности шашки происходит за время ≈ 1 мин. Исходя из этого, термостатирование зарядов в термокамере ТКСИ-0,2-80 проводили 2,5—4 ч (2,5 ч — для первого испытуемого заряда и 4 ч — для последнего), а испытание после извлечения заряда из термокамеры — за 20—30 с.

Изложенная методика испытаний обеспечивает среднееквadrатичное отклонение скорости горения для метода Вьеля не более 5—7 %, а для метода угловых точек 2—3 %. При указанном количестве опытов доверительный интервал на скорость горения (при доверительной вероятности 0,95) будет не выше ее среднееквadrатичного отклонения.

Данные по скорости горения при $p = 25 \div 40$ МПа, полученные в манометрической бомбе (рис. 2), хорошо согласуются с полученными в бомбе постоянного давления с использованием барабанного фоторегистратора.

Зависимость $u(T_0)$ характеризовали температурным коэффициентом скорости горения

$$\beta = \left. \frac{\partial \ln u}{\partial T_0} \right|_{p=\text{const}}$$

Известно [4], что точное определение β из-за его малости связано с большими методическими трудностями. Рассмотрим этот вопрос подробнее. По формулам [5] получено соотношение

$$\delta_{\beta} = \frac{2\delta_u}{\beta(T_2 - T_1)} + \frac{T_2 + T_1}{T_2 - T_1} \cdot \delta_T,$$

где δ_{β} , δ_u , δ_T — ошибки в определении величин β , u и T ; $T_2 - T_1$ — температурный интервал испытаний.

Из табл. 2 видно, что для снижения δ_{β} необходимо проводить испытания в возможно более широком температурном интервале, например 223—323 К, и при этом применять методики, обеспечивающие высокую (не хуже 2—3 %) точность определения скорости горения, например метод угловых точек в манометрической бомбе или испытания в бомбе постоянного давления.

Значения скорости горения при различных p и T_0 приведены в табл. 3. Величины температурного коэффициента скорости горения для различных порохов приведены в табл. 4. Отметим, что значения β падают с ростом p и практически не зависят от состава пороха.

Рассмотрим возможные механизмы горения пороха при высоком давлении. В [6—8] высказывается предположение о том, что при повышении p ведущая реакция¹ переходит из конденсированной фазы в газовую, несмотря на рост температуры поверхности T_n . Тем не менее не исключено, что ведущая реакция протекает при высоком давлении и в к-фазе.

¹ Здесь и далее под термином ведущая реакция следует понимать совокупность многих одновременно и последовательно протекающих реакций с участием таких окислителей, как NO_2 и NO , образующихся в процессе разложения компонентов пороха [9].

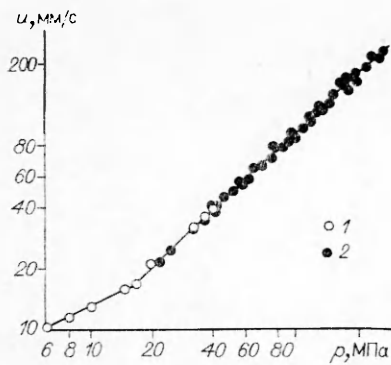


Рис. 2. Зависимость скорости горения от давления для пороха Н330, полученная в бомбе постоянного давления (1) и в манометрической бомбе (2).

Таблица 2

$\beta, \frac{\%}{\text{К}}$	$\delta u, \%$	$\delta \beta, \%$ при $T, \text{К}$	
		223–323	293–333
1	2	46	116
	3	66	166
	5	106	266
	7	146	—
3	2	19	49
	3	26	66
	5	39	99
	7	52	—

Примечание. $\delta T = 1\%$.

Допустим, что реакция, определяющая значение u при высоком давлении, протекает в газовой фазе при максимальной температуре и одинаковой для всех рассматриваемых составов энергией активации. В этом случае величина $\beta = E/(2RT_r^2)$ была бы тем больше, чем меньше T_r , и не зависела бы от p , так как T_r в области высокого давления не изменяется с ростом последнего. При этом значение β для составов Н265 и Д330 было бы почти в 3 раза выше, чем у Н600. В действительности этого не наблюдается и отличие β для составов Н265 и Н600 составляет лишь 8–12%, что находится в пределах ошибки опыта, а для Д330 даже несколько ниже, чем у Н600.

Если скорость горения пороха определяется реакцией, протекающей в газовой фазе при максимальной температуре, то в координатах $\ln u(1/T_r)$ должна наблюдаться прямая линия. Действительно, как видно из рис. 3, а, экспериментальные точки (кроме состава Н330) хорошо ложатся на прямую с тангенсом угла наклона, отвечающим $E = 74 \text{ кДж/моль}$. Это, казалось бы, указывает на то, что ведущей реакци-

Таблица 3

Порох	$T_0, \text{К}$	$V, \text{мм/}(\text{с} \cdot \text{МПа})$	ν	$u, \text{мм/с}$ при $p, \text{МПа}$		Порох	$T_0, \text{К}$	$V, \text{мм/}(\text{с} \cdot \text{МПа})$	ν	$u, \text{мм/с}$ при $p, \text{МПа}$	
				100	300					100	300
Н265	223	0,30	1,11	50	168	Н545	248	1,41	0,99	135	400
	293	0,52	1,05	65	207		293	2,62	0,90	165	444
	323	0,48	1,08	69	225		323	2,38	0,93	172	479
Н280	223	0,53	1,06	69	219	Н600	223	1,72	0,93	126	350
	293	1,03	0,96	87	249		293	2,16	0,94	161	450
	323	1,02	0,97	89	259		323	2,54	0,91	169	459
Н330	223	0,79	1,00	79	236	Д330	223	0,31	1,10	49	163
	293	1,54	0,88	89	233		293	0,45	1,07	63	203
	323	1,29	0,95	103	291		323	0,45	1,07	62	202
Н453	248	0,96	0,99	92	272	Д430	223	0,42	1,08	62	205
	293	1,37	0,96	114	327		293	0,60	1,06	79	255
	323	1,46	0,96	121	349		323	0,67	1,04	82	259
Н490	223	1,27	0,97	109	317	НГ280	223	0,34	1,12	60	206
	293	1,84	0,94	139	391		293	0,54	1,07	75	245
	323	1,97	0,94	151	426		323	0,56	1,07	78	253
Н495	223	1,47	0,95	117	332	НГ490	223	0,42	1,16	87	310
	293	1,91	0,94	145	407		293	0,80	1,08	115	377
	323	2,18	0,94	165	465		323	0,86	1,07	118	380

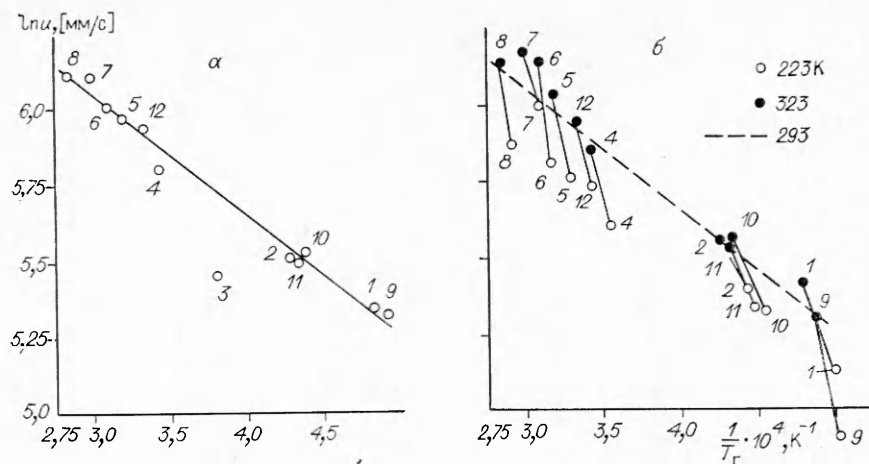


Рис. 3. Зависимость $u(T_r)$ (цифры около точек — номера порохов по табл. 1), $p = 300$ МПа.

ей является реакция диоксида азота с продуктами разложения пороха [10], идущая при максимальной температуре. Однако если в этих координатах (рис. 3, б) нанести значения скоростей горения, определенные при различных T_0 ($dT_r/dT_0 = 1$), то хорошо видно, что изменение начальной температуры оказывает несоизмеримо более сильное влияние на скорость горения, чем такое же изменение T_r . Если величина $dT_r/dT_0 < 1$, то эта разница будет еще больше.

Проведен также расчет зависимости $\ln u(1/T)$ при температуре ниже термодинамической температуры горения, который показал, что кривая, полученная путем изменения состава пороха, не может быть совмещена ни при какой температуре с кривыми, полученными путем изменения T_0 . Это указывает на то, что ведущая реакция не протекает ни при T_r , ни при другой эффективной температуре в газовой фазе.

Таким образом, высказанное предположение о ведущей реакции, протекающей в газовой фазе, вероятно, следует считать ошибочным.

Приведенные данные, по-видимому, можно объяснить, если предположить, что ведущая реакция при горении всех исследованных порохов даже при высоком значении p протекает не в газовой, а конденсированной фазе. Действительно, в этом случае температурный коэффициент скорости горения будет падать при увеличении p и очень слабо меняться при переходе от одного состава к другому, так как T_n растет при повышении p и незначительно меняется при изменении состава пороха [11, 12].

Таблица 4

Порох	$\beta, \frac{\%}{\text{K}}$ при p , МПа				Порох	$\beta, \frac{\%}{\text{K}}$ при p , МПа			
	50	100	200	300		50	100	200	300
H265	3,5	3,3	3,1	3,0	H545	3,4	2,9	2,4	2,1
H280	3,2	2,6	2,0	1,7	H600	3,1	2,9	2,8	2,7
H330	3,0	2,6	2,3	2,1	Д330	2,6	2,4	2,2	2,1
H453	3,6	3,3	3,1	2,9	Д430	3,1	2,8	2,5	2,3
H490	3,4	3,2	3,1	3,0	HГ280	2,9	2,6	2,2	2,0
H495	3,6	3,5	3,4	3,4	HГ490	3,7	3,0	2,4	2,0

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазкова А. П., Терешкин И. А. ЖФХ, 1961, 35, 7, 1622.
2. Basset J. Acad. sci. Compt. rendus, 1950, 231, 14, 649.
3. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет.— Оборонгиз, 1962.

4. Бахман И. П., Беляев А. Ф. Горение гетерогенных конденсированных систем.— М.: Наука, 1967.
5. Батунер Л. М., Позин М. Е. Математические методы в химической технике.— Л.: Химия, 1966.
6. Беляев А. Ф., Лукашеня Г. В. ПМТФ, 1963, 6, 114.
7. Беляев А. Ф., Цыганов С. А. Докл. АН СССР, 1964, 157, 2, 378.
8. Кондриков Б. Н., Райкова В. М., Самсонов Б. С. ФГВ, 1973, 9, 1, 84.
9. Андреев К. К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ.— М.: Наука, 1966.
10. Светлов Б. С., Лурье Б. А., Корнилова Г. Е. Кинетика и катализ, 1972, XIII, 5, 1146.
11. Зенин А. А. Физические процессы при горении и взрыве.— М.: Атомиздат, 1980.
12. Lengelle G., Bizot A., Dutergue J. et al. // Progr. Astron. Aeron., 1984, 90, 361.

г. Москва

Поступила в редакцию 5/IV 1989,
после доработки — 16/X 1989

УДК 536.46

И. Н. Меграбова, Вит. А. Вольперт, Вл. А. Вольперт, С. П. Давтян

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ В ПОТОКЕ

В работах [1—3] исследовались фронтальные режимы протекания экзотермической реакции в сферических и цилиндрических реакторах. Интерес к этим задачам связан с практическим применением таких реакторов и их преимуществами перед трубчатыми — отсутствием прилипания реагентов к стенкам и пробоя. Создание теоретических основ процесса начато в [1—3] с изучения простейшей физической модели, в которой активная зона реактора расположена между двумя коаксиальными цилиндрами и реакционноспособная смесь подается через внутреннюю цилиндрическую поверхность радиуса r_0 , а продукты одностадийного химического превращения выводятся через внешнюю поверхность радиуса r_1 .

В традиционных упрощающих предположениях теории горения математическая постановка теплодиффузионной задачи, не учитывающая распределение вдоль оси цилиндра, имеет в полярных координатах вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \Delta T - v(r) \frac{\partial T}{\partial t} + q(1 - \eta) k(T),$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -v(r) \frac{\partial \eta}{\partial r} + (1 - \eta) k(T).$$

Здесь T — температура; η — глубина превращения реагента; t — время; κ — коэффициент теплопроводности; q — адиабатический разогрев; $k(T) = k_0 \exp(-E/RT)$ — аррениусовская температурная зависимость скорости реакции; $\Delta T = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2}$ — оператор Лапласа в полярных координатах r, φ . Скорость потока $v(r)$ зависит только от радиуса, и предположение о постоянстве плотности смеси дает

$$v(r) = ur_0/r.$$

Граничные условия:

$$r = r_0: T = T_n, \eta = 0; r = r_1: \partial T / \partial r = 0.$$

Приближенное аналитическое решение задачи получено в [1,2], где определена структура решения и, в частности, координата r_* фронта реакции в зависимости от параметров задачи. В [3] исследована устойчивость стационарного режима к малым возмущениям, выведено и изучено дисперсионное соотношение, содержащее три безразмерных параметра