

О МЕХАНИЗМЕ КОНВЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ СИСТЕМ

В. Е. Храповский, А. А. Сулимов

(Москва)

Закономерности и механизм распространения квазистационарного конвективного горения (КГ) изложены в [1, 2]. Показано, что квазистационарный режим наблюдается при постоянном внешнем давлении и обеспечивающих баланс массы фильтрующегося газа [1]. Для данного режима характерны периодические пульсации скорости пламени и давления, связанные в случае низкопористых образцов с дискретным диспергированием вещества вследствие проникновения горения по отдельным наиболее крупным порам [3, 4], повышения давления в них и отрыва части образца. При этом сохраняются постоянными средние скорости распространения w и максимальное давление во фронте пламени p_{\max} .

В развитие [1, 2, 5] в данной работе представлены количественные данные, характеризующие зонную структуру волны квазистационарного КГ, выделена ведущая зона, определяющая скорость распространения пламени, а также рассмотрены процессы, протекающие в зоне догорания, образующейся в результате диспергирования образца. Волна КГ включает зоны фильтрации, прогрева, воспламенения (в том числе фронт пламени) и догорания диспергируемой взвеси.

Эксперименты проводили в условиях, когда внешнее давление поддерживалось близким к постоянному все время распространения пламени по заряду (отклонение от среднего давления не превышало 10—15%). Использована установка, описанная в [2], которая позволяла проводить одновременно оптическую регистрацию распространения пламени и запись пьезокварцевыми датчиками профилей $p(t)$ в различных сечениях заряда и свободном объеме установки. Погрешность измерения скорости перемещения лидирующей точки воспламенения не превышала 10, давления — 5%. Установка состояла из прозрачной секции, в цилиндрическом канале которой располагался заряд, и соединенного с ней свободного (ресервного) объема ($V \approx 1$ л) со сменным соплом. Диаметр заряда составлял 12, длина 70—200 мм. За счет быстрого сгорания в свободном объеме навески воспламенителя обеспечивалось заданное начальное давление p_0 , при котором распространялось конвективное горение по длине образца. Близкое к постоянному давление в ресервном объеме, куда истекали продукты сгорания, поддерживалось за счет вытекания газов, выделяющихся при развитии КГ, через сопло.

Заряд прессовался из непористых частиц модельного смесового топлива, содержащего 80% перхлората аммония и 20% горючего. В отдельных опытах использовались гранулы с повышенным содержанием горючего. Пористость образца в большинстве экспериментов составляла 5%, газопроницаемость $K = (2 \div 9) \cdot 10^{-10}$ см². Начальный эффективный размер гранул $d = 0,66 \div 1,9$ мм.

Характерные щелевые фоторегистрограммы процесса показаны на рис. 1. Пример совместной обработки записей давления и перемещения лидирующей точки воспламенения, определенной по кадрам скоростной киносъемки, представлен на рис. 2. Синхронизация оптических и пьезометрических данных осуществлялась согласованием момента появления свечения с началом подъема давления от сгорания воспламенителя. В результате указанной обработки, кроме изложенных в [2] параметров (средней скорости w квазистационарного КГ, максимального давления во фронте p_{\max} , частоты пульсаций), находились и другие характеристики процесса (см. рис. 2).

Суммарная ширина зон фильтрации и прогрева l_{ϕ} определялась как расстояние от переднего фронта волны фильтрации, регистрируемой

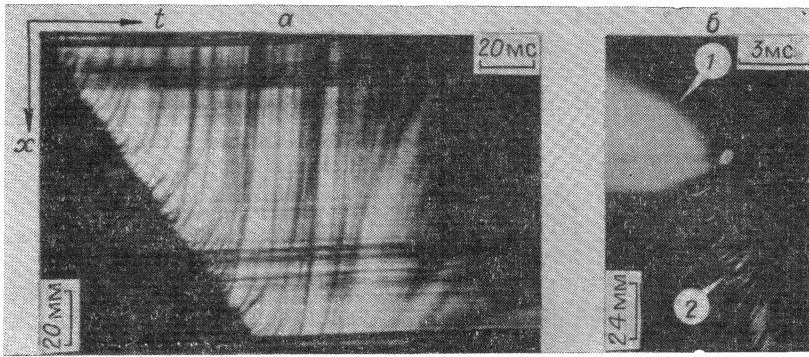


Рис. 1. Фоторегистрограммы процесса конвективного горения.

а) ($d = 0,66$ мм) отсутствие эффекта погасания диспергированных частиц; б) ($d = 1,9$ мм) существование эффекта гашения взвеси: 1 — свечение продуктов сгорания воспламенителя, 2 — распространение конвективного горения.

датчиком давления на донном торце заряда, до фронта пламени (границы свечения). Зона прогрева отождествлялась с глубиной пульсации h , определенной по кадрам скоростной киносъемки¹. Ширина зоны догорания $l_{\text{дог}} = v_{\text{от}} t_{\text{дог}}$, где $v_{\text{от}}$ — измеряемая по фоторегистрограммам максимальная скорость частиц взвеси, оттекающих от поверхности заряда; $t_{\text{дог}} = t_{\text{д}} - t_{\text{к}}$ — время сгорания диспергированных частиц; $t_{\text{к}}$ — время окончания диспергирования заряда, соответствующее распространению КГ на всю длину образца; $t_{\text{д}}$ — время полного сгорания последнего диспергированного слоя, которое соответствовало моменту возникновения экспоненциального спада внешнего давления в установке. Времени $t_{\text{д}}$ отвечал в полулогарифмических координатах $\lg p_0 - t$ переход к линейной зависимости.

По записи давления $p_0(t)$ в свободном объеме рассчитывалась интенсивность газовыделения $\dot{m}_+(t)$ при конвективном горении из условия, что изменение давления $dp_0(t)/dt$ определяется газоприходом от сгорания заряда и газорасходом через сопло:

$$\dot{m}_+(t) = \frac{V}{f} \frac{dp_0(t)}{dt} + BFp_0(t). \quad (1)$$

Здесь V — величина свободного объема; f — сила топлива; B — коэффициент истечения газов; F — площадь критического сечения сопла. Принимая, что частицы после воспламенения горят со скоростью послыогного горения u (при соответствующих давлениях), вычислялась поверхность горения S_r из выражения

$$\dot{m}_+ = \rho_c u S_r \quad (2)$$

(ρ_c — плотность частиц). Интегрирование (1) дает выражение, по которому рассчитывалось изменение массы сгоревшего вещества во времени:

$$m_+(t) = \frac{V}{f} [p_0(t) - p_0(t_3)] + BF \int_{t_3}^t p_0(t) dt \quad (3)$$

(t_3 — время задержки воспламенения заряда). Ошибка при расчете \dot{m}_+ , m_+ , S_r не превышала 7–8%.

Закономерности распространения квазистационарного конвективного горения. В результате исследования распространения квазистационарного КГ установлено, что закон скорости $w(p_{\text{max}})$ хорошо аппроксими-

¹ Такое предположение обусловлено тем, что при пульсирующем КГ на стадии депрессии (пламя неподвижно) вещество прогревается на глубину h , после чего быстро воспламеняется прогретая зона.

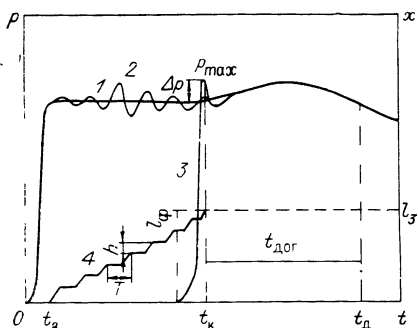


Рис. 2. Схема совместной обработки оптической записи на СКС (4) и кривых давления в свободном объеме установки (1), в канале прозрачной камеры (2) и в порах заряда у его дна (3).

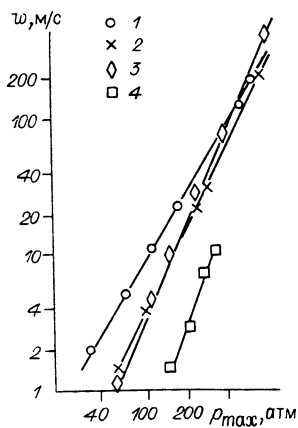


Рис. 3. Зависимость скорости квазистационарного КГ от давления и размера частиц. Модельная смесевая система — $\varphi = 5\%$, d , мм: 1 — 1,9, 2 — 0,96, 3 — 0,66; 4 — тэн, $\varphi = 10\%$, $d = 0,5$ мм.

руется зависимостью вида $w = A\rho_{\max}^{\nu}$. Увеличение пористости заряда φ с 2 до 12% при неизменном размере гранул ($d = 1,9$ мм) вызывает лишь возрастание скорости, а показатель степени ν остается постоянным ($\nu = 1,6$). Значительное изменение w наблюдается в области $\varphi = 2 \div 4\%$, где коэффициент $A = (3,5 \div 5,8) \cdot 10^{-3}$ м/(с · атм ^{ν}). Последующее увеличение φ до 12% оказывает слабое влияние, и величина A возрастает до $7,6 \cdot 10^{-3}$ м/(с · атм ^{ν}). С учетом полученных данных дальнейшие исследования проводились при $\varphi = 4 \div 5\%$.

Уменьшение d с 1,9 до 0,96 и 0,66 мм при $\varphi = 5\%$ приводит к увеличению ν с 1,6 до 2,0 и 2,2 и уменьшению A (рис. 3). Показатель ν возрастает пропорционально удельной поверхности частиц $S_{уд}$: $\nu \sim S_{уд}^{0,33}$. Необходимо отметить, что на указанную зависимость для смесевой системы укладываются данные для бризантного ВВ — тэна — ($\nu = 2,7$) с $d = 0,5$ мм.

Зонная структура волны. Характеристики волны квазистационарного конвективного горения представлены в таблице, где наряду с размерами основных зон, указаны перепад давления $\Delta p = p_{\max}(t_k) - p_0(t_k)$, среднее давление $p_{дог}$ и максимальная скорость движения частиц $v_{от}$ в зоне догорания, относительная доля сгоревшего вещества ψ за время

d , мм	w , м/с	Δp , атм	l_{φ} , мм	h , мм	$\bar{p}_{дог}$, атм	t_D , мс	$t_{дог}$, мс	$v_{от}$, м/с	$l_{дог}$, мм	\dot{m}'_{+} , г/мс	ψ
0,66	1,2	12	17	—	50	34	31	—	—	—	—
	4,7	20	20	9	145	15	23	—	—	—	—
0,96	1,45	20	55 *	—	45	42	44	10,6	500	0,01	0,037
	4,1	40	50 *	13	85	18	38	—	—	0,037	0,052
	9,3	52	24	12	120	7,5	30	—	—	0,125	0,074
	21,0	80	—	—	160	2,3	25	42	1300	0,5	0,13
1,9	2,0	6	—	—	60	22	98	8,6	800	0,015	0,04
	5,2	18	18	—	—	—	—	—	—	—	—
	6,4	20	—	—	115	11	76	19	1500	0,058	0,075
	11,3	20	16	22	—	—	—	—	—	—	—
	23,5	28	21	—	150	3,5	60	32	1900	0,44	0,095

* Опыты с влиянием воспламенителя на ширину зоны фильтрации.

распространения КГ по всей длине заряда. В условиях отсутствия искажающего действия газообразных продуктов воспламенителя (быстрое нарастание давления в свободном объеме до постоянного значения за время $t = 2 \div 5$ мс, длинный заряд) измеренная ширина зоны фильтрации составляет $15 \div 20$ мм.

Установлено, что глубина пульсаций h , с которой отождествлялась величина зоны прогрева, определяется размером частиц $h \approx 13d$ и слабо уменьшается с давлением.

Расчеты по выражению (3) показали, что за время распространения пламени на всю длину заряда сгорает не более $10 \div 13\%$ образца. Основная его часть диспергирует и сгорает в зоне догорания. Согласно результатам скоростной киносъемки и анализа погашенных остатков, установлено, что в процессе диспергирования первоначально образуются конгломераты, состоящие из совокупности частиц, с размером, близким к глубине пульсации. Впоследствии они распадаются на отдельные гранулы, сгорающие в послыйном режиме. Время распада конгломератов существенным образом зависит от физико-механических свойств заряда (прежде всего от прочности на растяжение σ_p).

Процесс распада конгломератов изучали при помощи сравнения при одинаковых давлениях времен догорания диспергируемой взвеси $t_{\text{дог}}$, образующейся при конвективном горении заряда, с временами догорания t_n навесок насыпной плотности из тех же гранул. Выявлено два характерных случая. Если прессование заряда происходит при температуре, равной или превышающей температуру размягчения частиц, то $\sigma_p = 20 \div 50$ кг/см² и $t_{\text{дог}} \gg t_n$. Распад конгломератов вносит заметный вклад во время догорания. С ростом давления и скорости КГ время распада снижается.

В случае прессования заряда при температуре ниже температуры размягчения частиц прочность его на растяжение существенно меньше и не превышает $1 \div 10$ кг/см², конгломераты на отдельные гранулы распадаются с высокой скоростью. Времена догорания взвеси и навесок исходных гранул совпадают. Их значения определяются скоростью послыйного горения по наименьшему размеру частиц. Ширина зоны догорания для этого случая меньше, чем при затрудненном распаде конгломератов, но тем не менее достаточно большая (выше 500 мм) (см. таблицу).

Уменьшение размера частиц в заряде сокращает времена догорания, однако при этом возрастает скорость их оттока (мелкие частицы быстрее увлекаются оттекающими газовыми потоками), и зона догорания уменьшается слабо. С ростом давления скорость движения частиц взвеси увеличивается сильнее, чем снижается время догорания (так как $v > 1$), в результате зона догорания расширяется.

Сравнение времен распространения квазистационарного конвективного горения по заряду с временами догорания диспергируемой взвеси показало, что для используемых зарядов $t_p < t_{\text{дог}}$ и с ростом p разница между ними увеличивается.

Ведущая зона КГ. За ведущую принималась зона, газо- и тепловыделение в которой определяет скорость распространения пламени. Выполненные исследования показали, что ведущей является зона воспламенения, которая в рамках одномерного рассмотрения определяется как участок, ограниченный с одной стороны фронтом пламени, а со стороны зоны догорания — границей, где происходит диспергирование вещества. Зоны фильтрации и догорания не определяют величину скорости распространения КГ. Суть этих экспериментов сводилась к следующему.

Изменялась ширина зоны фильтрации за счет характера нарастания давления от сгорания воспламенителя. При использовании медленносгорающего воспламенителя (рис. 4, б), создающего такое же давление, что и быстро сгорающий (рис. 4, а), обеспечивалось заполнение пор заряда по всей его длине продуктами сгорания воспламенителя до начала распространения конвективного горения. Однако измерения скорости КГ

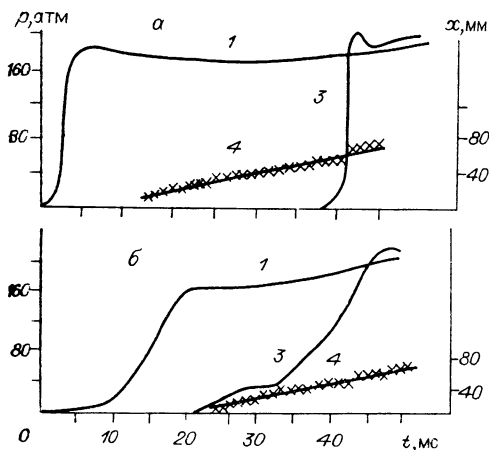


Рис. 4. $x(t)$ (4) и $p(t)$ (1, 3) диаграммы с быстро- (а) и медленногорящим (б) воспламенителями (использовались гранулы с повышенным содержанием горючего). Обозначения соответствуют рис. 2, 1, 3, 4.

показали, что ее значение не меняется. Близкими оставались и пульсационные характеристики. Приведенные данные указывают, что в условиях вынужденного механизма фильтрации ширина зоны фильтрации и распределение давления в ней не определяют величину скорости КГ.

Анализ скоростей КГ при одинаковом внешнем давлении показывает, что в зависимости от ϕ , d и типа вещества значения w меняются в широких пределах (см. рис. 3). Данный результат указывает, что давление в зоне догорания не определяет однозначно скорость КГ.

Как уже отмечалось в [2], пульсирующее распространение пламени сопровождается колебаниями давления в канале оболочки. С ростом внешнего давления повышается частота пульсаций и перепад $\Delta p = p_{\max} - p_0$. При критических условиях спада давления в пульсации горящие частицы гаснут в оттекающих продуктах [2]. Здесь зона догорания отсутствует, рассчитанные значения \dot{m}'_+ и S_r соответствуют зоне воспламенения заряда ($\dot{m}'_+ = \dot{m}'_+$; $S_r = S'_r$).

Значения \dot{m}'_+ и S'_r остаются постоянными на стадии распространения (рис. 5), несмотря на увеличение количества диспергированных частиц, что подтверждает эффект гашения взвеси. Полностью она воспламеняется и сгорает в дополнительном объеме после распространения пламени на всю длину заряда при $t > t_k$ (см. рис. 5). Установлена однозначная связь интенсивности газовыделения в зоне воспламенения \dot{m}'_+ со скоростью конвективного горения (рис. 6). На единую зависимость $w = 39(\dot{m}'_+)^{0,7}$ укладываются данные, полученные для зарядов с разным размером частиц и при разных давлениях.

Таким образом, на основе перечисленных экспериментальных данных показано, что скорость конвективного горения определяется процессами в ведущей зоне воспламенения и однозначно зависит от интенсивности газовыделения в ней. Основываясь на представлении о ведущей зоне, можно предложить следующее объяснение влиянию размера частиц на закон скорости конвективного горения. При уменьшении гранул в заряде с неизменной пористостью сокращается количество крупных пор, по поверхности которых происходит воспламенение при $p = 20 \div 50$ атм. Это вызывает снижение поверхности горения и интен-

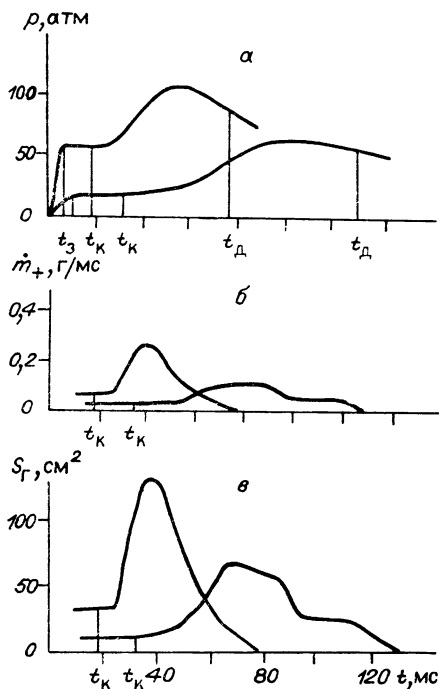


Рис. 5. Зависимость от времени давления (а), интенсивности газоприхода (б), поверхности горения (в) при разных давлениях воспламенителя, $d = 1,9$ мм.

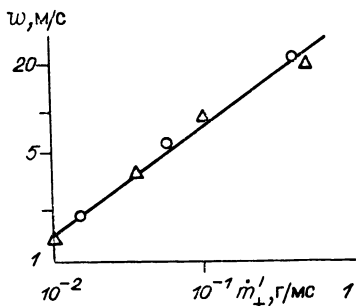


Рис. 6. Зависимость скорости квазистационарного КГ от интенсивности газовыделения в ведущей зоне ($\Delta - d = 0,96$ мм, $\circ - d = 1,9$ мм).

сивности газообразования в ведущей зоне (рис. 7), что приводит к уменьшению w (см. рис. 3). С ростом давления воспламенением охватываются более мелкие поры, количество которых больше в мелкозернистом заряде. Поверхность воспламенения в нем возрастает сильнее, чем для заряда, спрессованного из крупных гранул, что приводит к более сильному увеличению интенсивности газовыделения в зоне воспламенения и возрастанию зависимости скорости от давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А., Храповский В. Е. и др. — В кн.: Горение конденсированных систем. — Черногоровка: ОИХФ АН СССР, 1977.
2. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А., Храповский В. Е. и др. ФГВ, 1980, 16, 3, 24.
3. Беляев А. Ф., Коротков А. И., Сулимов А. А. ФГВ, 1966, 2, 3, 47.
4. Боболев В. К., Карпунин И. А., Чуйко С. В. НТПГВ, 1965, 1, 44.
5. Дубовицкий В. Ф., Коростелев В. Г., Коротков А. И. и др. ФГВ, 1974, 10, 6, 811.

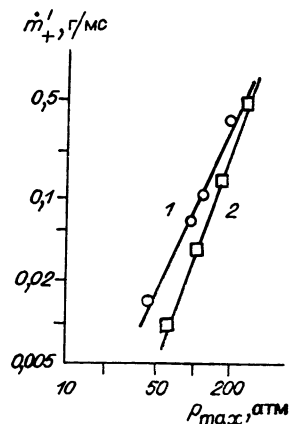


Рис. 7. Изменение интенсивности газовыделения в зоне воспламенения с давлением при $d = 1,9$ (1) и $0,96$ мм (2).