

## РАЗВИТИЕ ГОРЕНИЯ В ЕДИНИЧНОЙ ПОРЕ

А. Ф. Беляев, А. И. Коротков, А. А. Сулимов,  
М. К. Сукоян, А. В. Обменин  
(Москва)

Известно [1, 2], что при определенных условиях горение газопроницаемых пористых систем нарушается вследствие проникновения горения в поры (объем) вещества. Характер возникшего конвективного горения предопределяет последствия проникания и, следовательно, эффект взрыва.

Исследование возникновения и развития конвективного горения [3, 4] затрудняется тем, что фронт конвективного горения в общем случае не является плоским. Поэтому оптические методы, фиксирующие свечение на боковой поверхности заряда, в случае непрозрачных (твердых) ВВ не дают достаточно полной и объективной картины развития процесса. Кроме того, пористое ВВ представляет собой неупорядоченную систему пор сложной геометрической формы. Чтобы разобраться в сложной картине явления, целесообразно использовать упрощенную упорядоченную модель, с помощью которой можно было исследовать все последовательные стадии возникновения и развития конвективного горения. В качестве такой модели была взята единичная пора, образованная двумя тонкими ( $2\div 3$  мм) плоскопараллельными пластинами сплошного (непористого) вещества. Пора заключалась в прочную оболочку из плексигласа и металла. Поджигание осуществлялось с одного из концов;

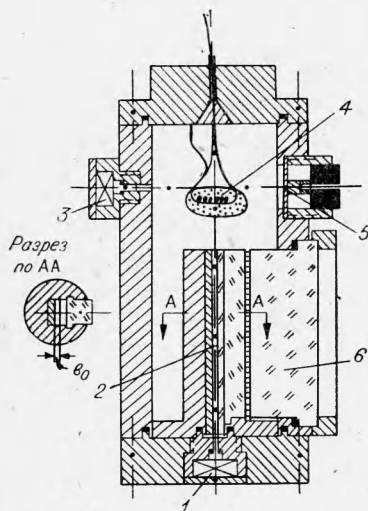


Рис. 1. Схема манометрической бомбы, применяемой для исследования развития горения в единичной поре.

противоположный конец либо заклеивался (закрытая пора), либо оставался открытым (открытая пора). Геометрические размеры поры определялись длиной (глубиной)  $L$  и расстоянием  $b_0$  между пластинами вещества, которое характеризует величину эквивалентного гидравлического диаметра поры  $d_3$ . Для применяемой плоской поры  $d_3 \approx 2 b_0$ .

Изучение развития горения в поре проводилось в манометрической бомбе (рис. 1) с большим свободным объемом, позволяющей осуществлять одновременно оптическую регистрацию процесса и запись давления непосредственно в поре у закрытого донного конца. В бомбе имелось прозрачное окно из плексигласа 6, два пьезоэлектрических датчика, один из которых 3 регистрировал давление  $p_k(t)$  в объеме бомбы, другой 1 — непосредственно в поре  $p^n(t)$  и устройство 5 для гашения образцов сбросом давления.

Распространение горения по поре фиксировалось скоростной кинокамерой или фоторегистром. Сигналы с пьезоэлектрических датчиков через усилитель записывались на двухлучевом катодном осциллографе. Поджигание поры осуществлялось конвективным потоком горячего газа, образующегося при сгорании воспламенителя 4, который создавал начальное давление в бомбе за

5—10 мсек. Таким образом, воспламенитель создавал, по существу, условия фильтрации газовых продуктов по поре, характерные для схемы «замурованного заряда» [5].

Часть опытов была поставлена в бомбе постоянного давления, при этом начальное давление в поре было равно давлению в объеме. Поджигание поры производилось от нихромовой спиральки, накаливаемой током. В этой серии опытов осуществлялись оптическая регистрация процесса распространения горения по поре, запись давления в объеме бомбы и измерения температуры в поре с помощью тонких (30 мк) термопар вольфрам — рений. Измерение температуры проводилось по методике, разработанной А. А. Зениным [6].

Необходимо подчеркнуть, что причины, вызывающие фильтрацию продуктов в поры при горении в условиях манометрической бомбы и бомбы постоянного давления (при заполнении пор азотом), существенно различаются [5].

В качестве исследуемых материалов использовались вторичные ВВ, нитроглицериновый порох и смеси на основе перхлората аммония. Для них были определены критические значения ширины поры  $b_{кр}$ , в которую возможно проникновение горения. Показано, что связь  $b_{кр}$  и давления, при котором наблюдается проникновение горения в пору, удовлетворительно описывается зависимостью вида  $b_{кр} \cdot p = const$ .

В проведенных опытах, результаты которых излагаются ниже, начальная ширина поры  $b_0$  превышала критическую  $b_{кр}$ , что обеспечивало проникновение горения в пору. Внешнее давление в объеме бомбы  $p_0$ , как правило, не превышало 100 атм.

Фильтрация в пору газообразных продуктов горения приводит к развитию в ней экзотермической реакции. Было показано, что в условиях наших опытов наиболее типичным результатом воздействия проникающих продуктов является воспламенение (поджигание) поверхности поры.

Условие воспламенения поры можно получить, приравнявая количество тепла, вносимого в пору продуктами горения, запасу тепла, необходимого для создания в конденсированной фазе ВВ достаточно глубокого прогреваемого слоя и прогрева поверхности поры до температуры, при которой начинается интенсивная газификация ВВ.

Строгое теоретическое рассмотрение данной задачи связано с большими трудностями, так как воспламенение поры зависит от широкого круга газодинамических, теплофизических параметров и физико-химических свойств горящего вещества. Специфической особенностью воспламенения поры является непостоянство по длине и во времени величины конвективного теплового потока и давления, при котором происходит воспламенение.

В зависимости от условий течения газа, размера поры и свойств ВВ проникающие газы могут быть продуктами полного горения или промежуточными [4, 7]. Необходимо также подчеркнуть, что закономерности конвективного воспламенения ВВ и порохов в настоящее время практически не исследованы.

Воспламенение поры изучалось в зависимости от условий эксперимента, геометрических размеров поры и величины давления в объеме. Было установлено, что скорость воспламенения поры может изменяться в очень широких пределах от сантиметров до сотен метров в секунду.

Применение оптических методов (рис. 2, а, б, г) позволило установить, что впереди фронта воспламенения фиксируется более слабое свечение, обусловленное движением с большей скоростью продуктов горения, которые прогревают вещество, охлаждаясь при этом. Фронт вос-

пламенения отделяет движущиеся по поре продукты от потока продуктов, вытекающих из поры. Указанная картина течения прослеживается при введении в состав ВВ частиц металла (рис. 2 а, г).

На рис. 3 представлены схематически результаты измерения скорости воспламенения  $\omega$  по длине закрытой и открытой поры, полученные в бомбе постоянного давления. Ниже на примере закрытой поры показано влияние на скорость воспламенения начальной ширины поры  $b_0$ :

$b_0, \text{ мм}$	0,6	0,4	0,2
$\omega, \text{ м/сек}$	55	100	300
$p_{\text{п макс}}, \text{ атм}$	300	700	1800

При уменьшении ширины поры наблюдается увеличение скорости воспламенения, что отмечалось в работе [8]. Было установлено также, что увеличение глубины поры аналогично по своему действию уменьшению ширины<sup>1</sup>.

В узкой поре с эквивалентным гидравлическим диаметром порядка  $10^{-1}$ — $10^{-2}$  мм, который близок к среднему размеру пор ( $m \approx 0,5$ ), горение может распространяться почти постоянной по длине и высокой скоростью порядка сотен метров в секунду. Этим можно объяснить природу высокоскоростных режимов, распространяющихся с почти постоянной скоростью, которые возникают после поджигания пористых ВВ в замкнутых.

Опыты, проведенные при различных давлениях в манометрической бомбе, показали, что с увеличением давления  $p_0$  скорость воспламенения существенно увеличивается:

$p_0, \text{ атм}$	10	100
$\omega, \text{ м/сек}$	0,2	100
$p_{\text{п макс}}, \text{ атм}$	10	400

При определенных условиях горение в поре является неустойчивым, аномальным, что

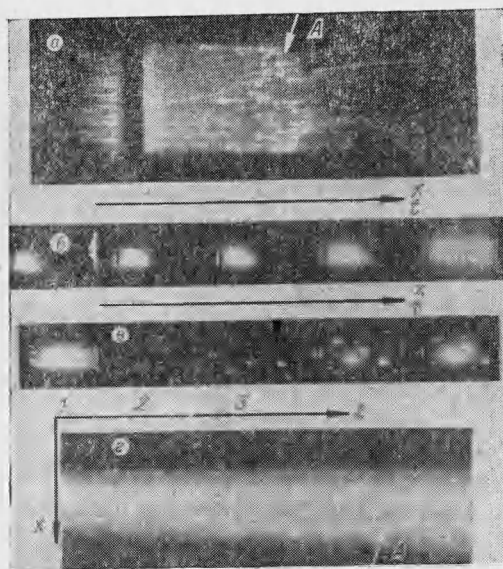


Рис. 2. Покадровая съемка проникания горения в пору (а, б) и аномального горения поры (в) (1 — завершение воспламенения поры; 2 — полное гашение поры за время  $t < 2 \cdot 10^{-4}$  сек; 3 — возникновение новых очагов воспламенения через  $4 \cdot 10^{-3}$  сек); г — запись проникания горения в пору, полученная фоторегистром (А — фронт воспламенения).

выражается в многократном воспламенении поры с последующим гашением (см. рис. 2, в). Аномальное горение в поре наблюдается при небольших внешних давлениях, близких к атмосферному. Повторное (после гашения) воспламенение поры происходит либо в результате последовательного распространения фронта, либо вследствие развития горения из отдельных точек. Последний случай характерен для смесей на основе перхлората аммония и свидетельствует о существенной роли процессов, протекающих после гашения в конденсированной фазе.

Аномальное горение поры может быть объяснено на основе выводов

<sup>1</sup> В работе [9] было показано, что увеличение высоты заряда облегчает проникновение горения в пору.

работы [10] применительно к горению пороха в полузамкнутом объеме, так как воспламенившаяся пора представляет расходящее сопло (точнее — комбинацию расходящего и теплового сопла) с весьма малым свободным объемом. Там было показано, что в условиях критического истечения, когда время релаксации камеры значительно меньше времени релаксации прогретого слоя, т. е. при низких давлениях, горение пороха в камере с малым свободным объемом неустойчиво, аномальным.

Другой возможной причиной аномального горения является невозможность устойчивого горения вещества в узкой поре, когда отсутствует активная (ведущая) зона горения. Фактором, облегчающим прорыв горения в поры, является малое расстояние  $h_m$  от поверхности до высокотемпературной газовой зоны [3, 5]. Этим обстоятельством объясняется тот факт, что горение в случае смесевой системы проникает в одинаковые поры при давлениях, меньших, чем в случае веществ, имеющих большое  $h_m$  (как, например, нитроглицериновый порох) и с большими скоростями. Величина  $h_m$  для смесевых систем на порядок меньше, чем у нитроглицеринового пороха [6, 11, 12].

Проведенные измерения температуры в поре нитроглицеринового пороха с  $b_0 < 2h_m$  показали (рис. 4), что температура в поре в начальный момент после проникновения достаточно низкая ( $\sim 1000^\circ \text{K}$ ) и увеличивается по мере разгорания поры. Горение пороха в поре в начальной стадии является беспламенным и до значения  $b_0 \approx 2h_m$  происходит со скоростью, меньшей скорости нормального горения [13]<sup>1</sup>.

В случае смесевых систем даже в узких порах ( $b_0 \approx 0,1 \text{ мм}$ ) и при меньших давлениях температура в поре практически сразу достигает своего максимального значения.

Рассмотрим последствия проникновения горения в пору.

Нетрудно показать, что воспламенение поры со скоростью, значительно превышающей скорость послыонного горения вещества, должно приводить к возникновению избыточного давления в поре  $\Delta p = p_n - p_0$ , что было подтверждено экспериментально<sup>2</sup>. Давление в недеформируемой поре является функцией следующих основных безразмерных параметров:

$$p_n = f\left(\frac{w}{u^*}, \frac{b}{h_m}, \frac{L}{b}, z, \frac{x}{L}\right), \quad (1)$$

где  $u^*$  — скорость разгорания поры;  $b$  — ширина поры;  $z$  — коэффициент, учитывающий сопротивление оттекающим продуктам;  $x$  — координата, отсчитываемая от входной части поры.

<sup>1</sup> В этой серии опытов геометрия поры была такова, что давление в поре при горении было практически равно внешнему давлению в объеме бомбы.

<sup>2</sup> Необходимо отметить, что М. Е. Серебряковым [14] на основе анализа погашенных после пушечного выстрела образцов пороха Киснемского была показана возможность существования избыточного давления в узких каналах.

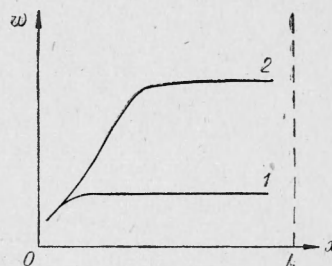


Рис. 3. Схематическое изображение зависимости скорости воспламенения  $w$  по длине закрытой (1) и открытой (2) поры.

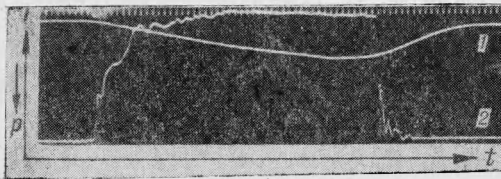


Рис. 4. Запись температуры  $T(t)$  в поре ( $b_0 = 0,1 \text{ мм}$ ) нитроглицеринового пороха (1), запись давления в объеме бомбы (2).

Первые два параметра в выражении (1) связаны с процессом воспламенения и горения, другие — с геометрическими размерами поры и состоянием ее поверхностей.

На рис. 5 представлены схематическое изображение и осциллограммы записи давления в поре у закрытого донного конца и в объеме бомбы. Из рисунка видно, что через время порядка  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  сек после начала повышения давления в объеме начинается выравнивание давления в поре вследствие проникновения в нее продуктов горения. Излом кривой  $p_n(t)$  через время  $t_3$  свидетельствует о начале воспламенения поры.

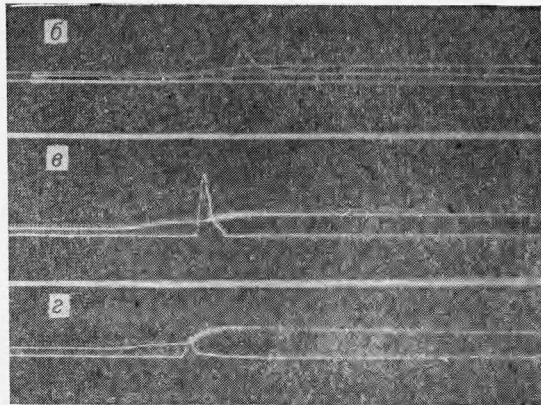
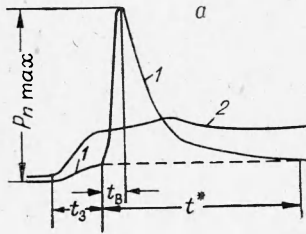
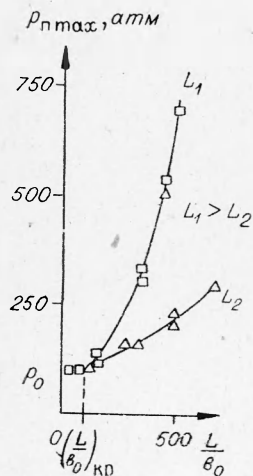


Рис. 5. Схематическое изображение (а) и осциллограммы (б, в, г) записи давления в поре у закрытого донного конца (1) и в объеме бомбы (2). Чувствительность датчика в поре ниже, чем датчика в объеме).

В течение времени  $t_в$  давление в поре растет, достигает максимального значения, после чего происходит спад, обусловленный разгоранием поры и ее механическим разрушением. Время существования повышенного ( $\Delta p \neq 0$ ) давления в поре составляет  $(1-50) \cdot 10^{-3}$  сек. Одновременная оптическая регистрация процесса и запись давления в поре показали, что в случае узких пор величины  $t_3$  и  $t_в$  представляют соответственно время задержки воспламенения и время воспламенения поры.

Было установлено, что все те факторы, которые приводят к увеличению скорости воспламенения, способствуют возрастанию давления в поре.

Повышение давления в поре изучалось в зависимости от параметра  $L/b_0$ , который представляет, по существу, отношение поверхности горения к площади проходного сечения (параметр Победоносцева).



Некоторые из полученных результатов для смесевой системы представлены на рис. 6. Как видно из графика, по мере возрастания  $L/b_0$  (уменьшения  $b_0$  при  $L = \text{const}$ ), начиная с некоторого критического значения  $(L/b_0)_{кр}$ , наблюдается прогрессирующее увеличение давления в поре. При этом простое геометрическое подобие отсутствует: в порах одинаковой геометрии давление возрастает с увеличением глубины, что связано с различием в скоростях воспламенения геометри-

Рис. 6. Зависимость максимального давления в недеформируемой поре от параметра  $L/b_0$ .

чески подобных пор. Естественно, возрастание давления в поре при уменьшении ее ширины не может продолжаться беспрестанно и ограничено возможностью проникновения горения в весьма узкие поры.

При горении нитроглицеринового пороха [15] большая часть пороха (до 70%) диспергируется. Данное обстоятельство, а также значительная протяженность низкотемпературных газовых зон [6, 11] являются основными факторами, приводящими к отсутствию избыточного давления в воспламенившейся поре нитроглицеринового пороха при низких давлениях в объеме бомбы. В этой связи необходимо отметить, что конвективное горение пористых образцов из нитроглицеринового пороха носит сравнительно «спокойный» (невзрывной) характер.

Наличие в поре избыточного давления и газового потока продуктов вызывает увеличение скорости горения вещества. Особенностью эрозионного разгорания поры является наличие высоких скоростей газового потока (вплоть до звуковой) и больших давлений. А как показали специально проведенные опыты, эрозионное горение порохов в звуковом потоке характеризуется сильной зависимостью от давления (рис. 7):

$$u^* \sim p^{0,8} \quad (2)$$

независимо от величины показателя  $\gamma$  в законе нормальной скорости горения  $u = ap^\gamma$ . Данная зависимость может быть получена теоретически, исходя из соотношения между критериями Нуссельта и Рейнольдса, описывающими теплоотдачу в турбулентном потоке газа [16].

При значительном повышении давления в поре наблюдается механическое разрушение стенок поры, приводящее к интенсивному возрастанию давления в объеме бомбы (верхняя кривая рис. 5,  $z$ ).

В условиях описанных экспериментов наиболее типичным результатом воздействия проникающих в пору продуктов горения является воспламенение ВВ. Это, безусловно, не исключает других возможных форм теплового воздействия таких, как тепловой взрыв заполняющих пору газов, разогрев газа вследствие адиабатического сжатия [17].

Рассмотрим факторы, которые делают невозможным проникновение горения в пору или существенно уменьшают скорость ее воспламенения. Из результатов, изложенных в [3, 5], следует, что образование на поверхности горения сплошного расплавленного слоя стабилизирует горение пористых газопроницаемых систем. Стабилизация расплавленным слоем является эффективной в случае узких пор, возможность поджигания которых вследствие проникновения газообразных продуктов и горящего расплава исключена. Кроме того, предварительное заполнение пор холодным газом также значительно повышает устойчивость горения. Данный эффект в условиях схемы «замурованного заряда» может иметь место, когда проникающие газы являются достаточно холодными и будучи не в состоянии поджечь ВВ выравнивают в порах давление до давления в объеме. Этот случай наблюдается при горении образцов, содержащих неглубокие закрытые поры, и систем, которые характеризуются низкой температурой горения или значительной протяженностью температурных зон в газовой фазе.

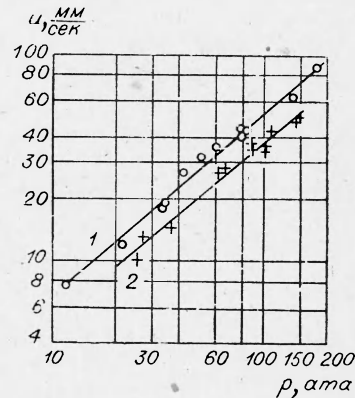


Рис. 7. Зависимость эрозионной скорости горения в звуковом потоке от давления. 1 — смешанная система, 2 — нитроглицериновый порох.

Горение пористых систем с низкой механической прочностью и при отсутствии прочной оболочки может стабилизироваться вследствие разброса вещества, который препятствует возрастанию давления в порах заряда [9]. Объемное сжатие легко деформирующегося пористого образца давлением, при котором осуществляется горение, может приводить к закрытию пор до значений  $b_0 < b_{кр}$  и проникновение горения в поры становится невозможным. В опытах, описанных выше, указанная возможность исключалась.

В заключение рассмотрим случай горения единичной поры в полу-безграничном пространстве пороха, когда имеют место деформация поры и увеличение ее глубины. Одной из причин роста поры является избыточное давление, возникающее при проникновении в нее горения. Нами проведен расчет повышения давления в поре с учетом ее деформации и экспериментально изучен рост поры при горении.

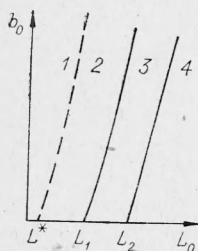


Рис. 8. Схема, иллюстрирующая возможность роста пор из-за действия избыточного давления (масштаб на оси ординат растянут по сравнению с осью абсцисс).

1 — область абсолютной (механической) устойчивости; 2 — область практической устойчивости, в которой рост горячей поры в опыте не обнаруживается; 3 — область ограниченного роста, где начавшееся с низкой скоростью развитие поры прекращается из-за спада давления; 4 — область самоподдерживающегося (безграничного) роста, где давление поддерживается за счет увеличения глубины поры.

Результаты показали, что кратковременность действия избыточного давления в сочетании с низкой скоростью роста поры значительно расширяет область устойчивых пор по сравнению с механическим расчетом (рис. 8).

Поступила в редакцию  
15/VII 1968

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Беляев. Докл. АН СССР, 1940, 28.
2. К. К. Андреев. Докл. АН СССР, 1940, 29.
3. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков, А. А. Сулимов. ПМТФ, 1963, 5.
4. В. К. Боболев, С. В. Чуйко, Л. Ф. Чекирда. ПМТФ, 1963, 5.
5. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков, А. А. Сулимов. ФГВ, 1965, 3.
6. А. А. Зенин. ПМТФ, 1963, 5; ФГВ, 1966, 3.
7. А. Ф. Беляев. Докт. дисс. М., ИХФ, 1945.
8. Н. Н. Бахман. ЖФХ, 1961, 35.
9. В. К. Боболев, И. А. Карпунин, С. В. Чуйко. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 1.
10. Я. Б. Зельдович. ПМТФ, 1963, 1.
11. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, Г. В. Лукашения. Докл. АН СССР, 1960, 135.
12. M. Summerfield, C. Sutherland a. o. Solid Prop. Roc. Res. N. Y., London, 1960.
13. А. А. Сулимов, А. И. Коротков. ЖФХ, 1964, 33, 2.
14. М. Е. Серебряков. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. Оборонгиз, 1962.
15. П. Ф. Похил. Сб. «Физика взрыва», 1953, 2.
16. С. С. Кутателадзе. Основы теории теплообмена, 1962.
17. А. Д. Марголин, С. В. Чуйко. ФГВ, 1965, 3.