

**О НАРУШЕНИИ ПОСЛОЙНОГО ГОРЕНИЯ
ГАЗОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРИСТЫХ СИСТЕМ**

А. Ф. Беляев, А. И. Коротков, А. А. Сулимов
(Москва)

В определенных условиях нормальное послойное (параллельными слоями) горение газопроницаемых взрывчатых систем может нарушаться вследствие проникновения горения в поры (объем) вещества [1, 2]. При этом передача тепла теплопроводностью заменяется в основном конвективной теплопередачей, поэтому горение, возникающее после нарушения послойного горения, целесообразно назвать конвективным. Нарушение (срыв) послойного горения увеличивает скорость газообразования, что может приводить к взрыву, переходящему в детонацию.

Прорыв горения в поры является сложным нестационарным процессом, который определяется физико-химическими и термохимическими свойствами вещества, условиями фильтрации продуктов горения, характером пористой структуры.

В настоящей работе излагаются результаты экспериментального изучения нарушения послойного горения пористых вторичных и смешанных взрывчатых веществ при небольших значениях пористости¹ ($m=0,15 \div 0,03$) и газопроницаемости ($k=10^{-3} \div 10^{-6}$ дарси) образцов. Некоторые из полученных результатов были кратко изложены ранее [3]. Необходимо отметить, что нарушение послойного горения в образцах с большой пористостью ($m > 0,15$) исследовалось в работах [4—7].

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пористые образцы получали методом глухого прессования исходных порошкообразных веществ, что давало возможность получать однородные (в макроскопическом смысле) по длине и диаметру газопроницаемые заряды. Исследуемый заряд с общей длиной $L=5 \div 10 d$ (d — диаметр заряда) составлялся из нескольких цилиндрических образцов одинаковой пористости и газопроницаемости, высота которых не превышала $0,5 d$. Боковая поверхность и нижний торец заряда тщательно бронировались. В отдельных опытах применялось порционное прессование непосредственно в плексигласовую или латунную оболочку. Объем образца, необходимый для расчета пористости, определялся гидростатическим взвешиванием или по геометрическим размерам.

¹ Под пористостью m понимается отношение объема пор к полному объему образца: $m = 1 - \frac{\rho}{\rho_m}$, где ρ_m — максимально возможная плотность ВВ (плотность монокристалла); ρ — плотность образца.

Измерение газопроницаемости проводилось в режиме установившейся изотермической фильтрации газа (азот, гелий) через исследуемый пористый образец. Определялся секундный расход прошедшего через образец газа при постоянном перепаде давления на его торцах. Разработанная методика позволяла проводить измерение газопроницаемости в малопористых образцах ($m < 0,2$).

Для исследования нарушения послойного горения была применена манометрическая бомба [3—5] специальной конструкции до 2000 бар с непрерывной записью давления в объеме пьезокварцевым датчиком и

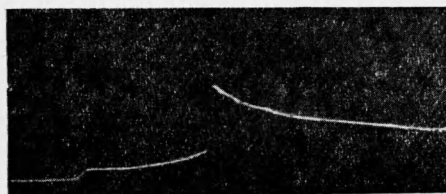


Рис. 1. Запись давления $p(t)$ в манометрической бомбе при нарушении послойного горения пористого заряда.

торцовым горением цилиндрических зарядов. Поджигание верхнего торца заряда осуществлялось провололочкой, накаливаемой током, или воспламенителем, создававшим небольшое ($20 \div 50$ бар) повышение давления, так что дальнейшее возрастание давления в объеме бомбы происходило за счет сгорания исследуемого пористого заряда. Плотность заряжения во всех опытах была постоянной и равнялась 50 кг/м^3 , быстрота изменения давления при послойном горении составляла $0,1 \div 10 \text{ бар/м} \cdot \text{сек}$. Подпрессовка пористого заряд в процессе горения исключалась.

На рис. 1 показана типичная запись давления во времени $p(t)$ при нарушении послойного горения (давление возрастает снизу вверх, время — слева направо, начальный подъем на записи обусловлен вспышкой воспламенителя). Пока сохранялось устойчивое послойное горение, наблюдалось плавное нарастание давления. Резкий рост давления (излом записи) свидетельствовал о достижении критического давления p_c , о нарушении горения параллельными слоями и прорыве горения в поры.

Критическое давление срыва p_c принималось в качестве основного параметра, характеризующего нарушение послойного горения.

Простой в исполнении метод манометрической бомбы с непрерывной записью давления позволил исследовать и сравнить устойчивость послойного горения целого ряда ВВ в одинаковых условиях.

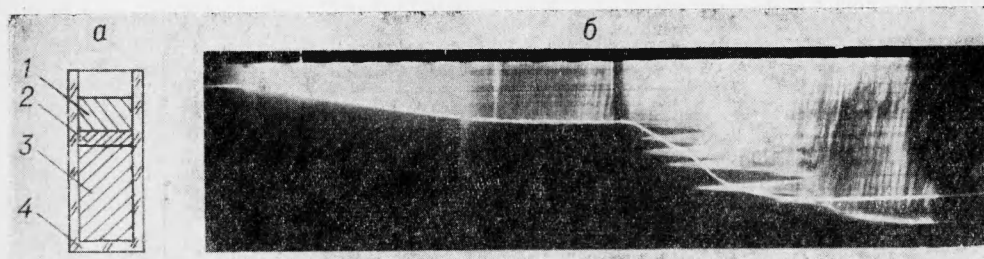


Рис. 2. Заряд, применяемый при проведении опытов в бомбе постоянного давления. а — схема; б — вид оптической записи и осциллограммы давления $p(t)$ при горении.

Изучение устойчивости горения пористых систем проводилось также в бомбе постоянного давления (рис. 2, а). В плексигласовую оболочку 4 запрессовывалось последовательно сплошное вспомогательное вещество 1, выполняющее роль горючей газонепроницаемой перегородки, сплошное 2 и пористое 3 исследуемые вещества, нижний торец оболочки заклеивался. Заряд помещался в бомбу, где постоянное давление соз-

давалось азотом, после чего осуществлялось поджигание верхнего торца заряда. Данная схема опыта исключала предварительное заполнение пор азотом. В этих условиях фронт горения подходит к исследуемому пористому веществу, когда начальное давление в порах равно атмосферному, и фильтрация продуктов горения осуществляется под действием всего давления в объеме бомбы. На рис. 2, б приведена полученная из одного опыта совмещенная запись давления $p(t)$ и оптическая запись при горении такого заряда: проникновение горения в поры происходит с массовой скоростью порядка $10 \text{ г/см}^2 \cdot \text{сек}$ (давление возрастает сверху вниз, время — слева направо, скорости движения пленки на осциллографе и фоторегистраторе равны).

Ниже будет показано, что послойное горение нарушается в отдельных центрах и фронт конвективного горения не является плоским. Таким образом, оптические методы, фиксирующие свечение на боковой поверхности заряда, в случае непрозрачных (твердые ВВ) систем не могут давать полной объективной картины возникновения и развития конвективного горения, особенно при значительных диаметрах заряда.

Данное обстоятельство натолкнуло на мысль использовать единичную пору для исследования механизма нарушения послойного горения. Применялась плоская единичная пора, образованная двумя параллельными пластинами сплошного (непористого) ВВ. В части опытов одна из пластин вещества заменялась прозрачной пластиной из плексигласа, что облегчало наблюдение за ходом процесса. Распространение горения по поре фиксировалось скоростной кинокамерой и производилась запись давления непосредственно в поре.

Необходимо отметить, что исследование горения ВВ в узкой поре после ее воспламенения оказалось полезным также для изучения механизма послойного горения, в частности, при исследовании влияния на скорость горения различных зон факела пламени [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследовалось влияние на нарушение послойного горения параметров пористой среды (газопроницаемости, пористости, начального размера частиц), геометрических размеров заряда, индивидуальных свойств горящего вещества и условий опыта.

подавляющее большинство опытов, результаты которых излагаются ниже, проведено в манометрической бомбе.

Влияние пористости, начального размера частиц и газопроницаемости. Зависимости критического давления срыва послойного горения от пористости для вторичных ВВ и стехиометрических смесевых ВВ приведены соответственно на графиках рис. 3 и 4. Точки на графиках представляют средние значения из 3—4 измерений.

Как видно из графиков, нарушение послойного горения вторичных ВВ: тротила, дини, пикриновой кислоты, тэна во всем исследованном интервале пористости происходит при давлениях, существенно больших, чем в случае пироксилина и смесевых ВВ на основе перхлоратов калия и аммония.

Интересно, что величины критического давления срыва для исследованных смесевых ВВ (рис. 4) с различными горючими (полистирол, битум, тротил) при одинаковой пористости близки между собой. Данный результат свидетельствует о том, что возможность нарушения послойного горения такого рода смесевых ВВ определяется в основном свойствами окислителя.

С уменьшением пористости устойчивость горения повышается, при этом связь давления срыва и пористости удовлетворительно описывается [3] гиперболической зависимостью вида

$$p_c (m - B) = A, \quad (1)$$

где A , B — константы. Величина константы A определяется физико-химическими свойствами ВВ и условиями опыта. Константа B , как будет

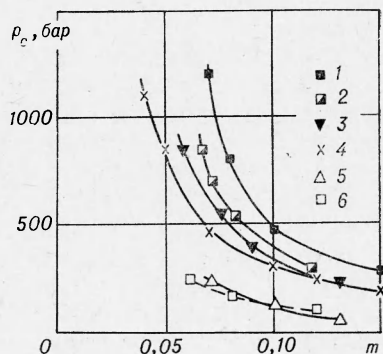


Рис. 3. Зависимости критического давления срыва послынного горения от пористости для вторичных ВВ ($d=10$ мм, начальный размер частиц $r=10 \div 20$ мкм).

1 — тротил; 2 — пикриновая кислота; 3 — дина; 4 — тэн; 5 — гексоген; 6 — пикросилин.

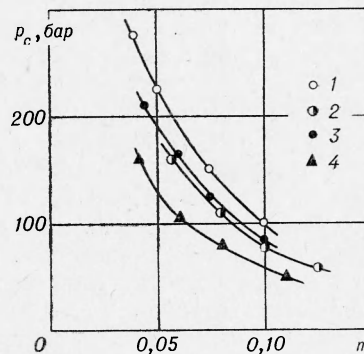


Рис. 4. Зависимости критического давления срыва послынного горения от пористости для смешевых ВВ ($d=10$ мм, $r=10 \div 20$ мкм).

1 — битум+KClO₄; 2 — полистирол+KClO₄; 3 — тротил+NH₄ClO₄; 4 — битум+NH₄ClO₄.

показано ниже, приблизительно характеризует величину закрытой (газонепроницаемой) пористости. Полученные из опыта значения констант A и B для некоторых систем представлены в таблице.

При пористости $m \leq B$, как следует из (1), должно сохраняться послынное горение до весьма больших давлений, что было подтверждено экспериментально [9] вплоть до давлений в несколько тысяч бар.

ВВ	A	B
Тротил	24	0,05
Пикриновая кислота	15	0,05
Тэн	20	0,025
Смесевые ВВ	3÷7	0,025

График рис. 5 иллюстрирует на примере тэна влияние начального размера частиц кристалла на возможность нарушения послынного горения. Нужно отметить, что в процессе прессования образцов происходит механическое разрушение кристаллов. Тем не менее начальный размер частиц влияет на характер упаковки, распределение пор по размеру и, в конечном итоге, на устойчивость горения. Так, например, давление срыва для образцов с пористостью 0,04 при увеличении начального размера частиц от 10 до 550 мкм снижается с 1450 до 380 бар.

Эти данные наглядно показывают, что величина пористости не определяет однозначно возможность нарушения послынного горения ВВ. Было высказано предположение, что таким параметром будет являться газопроницаемость, поскольку именно она определяет возможность фильтрации продуктов горения в поры. Измерение газопроницаемости позволило провести сравнение устойчивости горения пористых систем

с различными свойствами при одинаковых значениях газопроницаемости.

На рис. 6 представлены результаты определения газопроницаемости некоторых систем. С уменьшением пористости и начального размера частиц наблюдается монотонное снижение газопроницаемости, величина

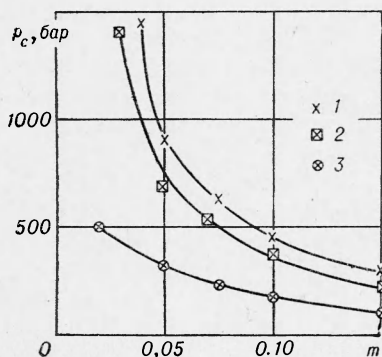


Рис. 5. Зависимости критического давления срыва послынного горения от пористости при различном начальном размере частиц ($d=5$ мм).

1 — $r=10 \div 20$ мкм; 2 — $r=120$ мкм;
3 — $r=550$ мкм.

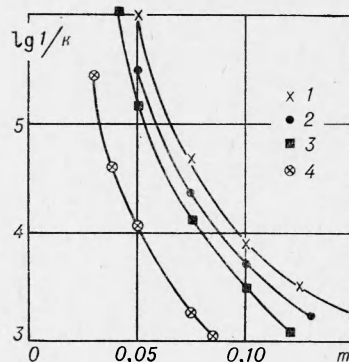


Рис. 6. Зависимости логарифма обратной газопроницаемости от пористости.

$r=10 \div 20$ мкм: 1 — тэн; 2 — стехиометрия тротила и перхлората аммония; 3 — тротил; $r=550$ мкм: 4 — тэн.

на которой в интервале пористости $m=0,03 \div 0,05$ весьма мала — порядка 10^{-6} дарси ($r=10 \div 20$ мкм). Нетрудно видеть (см. таблицу), что данный интервал пористости практически совпадает с величиной константы B в формуле (1). При одинаковом начальном размере частиц и равной пористости значения газопроницаемостей исследованных систем близки между собой.

Влияние газопроницаемости на нарушение послынного горения иллюстрируется рис. 7. Как следует из графика, устойчивость горения образцов вторичных ВВ (тротил, тэн) одинаковой газопроницаемости нарушается при значительно более высоких давлениях, чем в случае смесевых систем, что особенно отчетливо выражено при малых значениях газопроницаемости ($k \sim 10^{-5}$ дарси).

Для смесевых ВВ зависимость давления срыва от газопроницаемости в исследованном интервале является сравнительно слабой:

$$ke \frac{p_c}{D} = C, \quad (2)$$

где константы C , D слабо зависят от физико-химических свойств горючего. Вторичные ВВ (тротил, пикриновая кислота, дина, тэн), как правило, обнаруживают более сильную и сложную зависимость давления срыва от

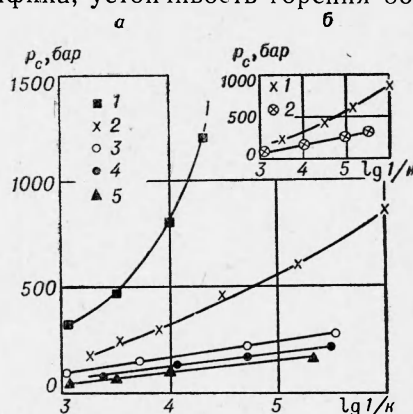


Рис. 7. Зависимости критического давления срыва послынного горения от логарифма обратной газопроницаемости ($d=10$ мм).

а ($r=10 \div 20$ мкм) 1 — тротил; 2 — тэн; 3 — битум + $KClO_4$; 4 — тротил + NH_4ClO_4 ; 5 — битум + NH_4ClO_4 ; б: (тэн) 1 — $r=10 \div 20$ мкм; 2 — $r=550$ мкм.

газопроницаемости. Установленные особенности в поведении исследованных систем, как будет показано ниже, связаны с различным физическим состоянием поверхности горения.

Представляло интерес сравнить устойчивость горения образцов равной газопроницаемости, но с различным начальным размером частиц. Такое сравнение, проведенное с тэном, показало (рис. 7, а), что устойчивость горения образцов, полученных из мелких кристаллов, выше устойчивости крупнокристаллических образцов. Увеличение начального размера частиц повышает газопроницаемость при постоянной пористости (см. рис. 6), тем не менее использование газопроницаемости как основного аргумента не ликвидирует полностью различие в величинах давления срыва. Этот результат указывает на то, что и газопроницаемость не является однозначным параметром, характеризующим нарушение послойного горения, и свидетельствует о том, что наряду с газопроницаемостью существенное влияние на устойчивость горения оказывает распределение пор по размеру (более правильно — наличие в распределении крупных пор).

Роль геометрических размеров заряда. Изучалось влияние диаметра d и длины L заряда. Нижний торец заряда заклеивался и был газонепроницаем. Опыты проводились в манометрической бомбе.

Экспериментально было показано, что устойчивость горения обычно применявшихся в работе образцов с газопроницаемостью $k < 10^{-3}$ дарси практически не зависит от длины участка послойного горения, предшествующего возникновению конвективного горения, и определяется величиной давления срыва (при этом в момент достижения критического давления оставшаяся длина заряда была, как правило, больше $15 \div 20$ мм).

Данный результат свидетельствует о том, что при достаточной длине наличие на нижнем торце заряда газонепроницаемой границы практически не влияет на процесс фильтрации продуктов.

Вместе с тем это влияние в определенных условиях является существенным, поскольку поджатие фильтрующегося газа у нижнего торца приводит к выравниванию давления в порах, уменьшению скорости фильтрации, что может стабилизировать горение. Теоретический анализ показывает (6), что чем меньше длина заряда и больше его газопроницаемость, тем более заметное влияние оказывает газонепроницаемая граница. Были проведены отдельные опыты по схеме рис. 2, а, в которых сжигались малоплотные заряды ($m > 0,2$, $k > 10^{-3}$ дарси) различной длины. При длине $5 \div 10$ мм наблюдалось устойчивое послойное горение, однако увеличение длины при тех же давлениях и параметрах пористого заряда приводило к нарушению послойного горения. Аналогичный эффект наблюдался в работе [5].

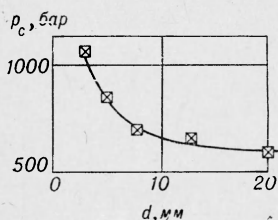


Рис. 8. Влияние диаметра заряда на нарушение послойного горения.

Отмеченное выше обстоятельство определило выбор оптимальных значений длины заряда, которые применялись в опытах, и что исключало влияние закрытого нижнего торца заряда. Таким образом, результаты настоящей работы соответствуют случаю нарушения послойного горения неограниченных пористых зарядов.

Исследование влияния диаметра заряда (рис. 8) проводилось на примере тэна. Постоянство плотности зарядов при сжигании образцов достигалось применением набора манометрических бомб с различным свободным объемом. Из графика рис. 8 видно, что увеличение диаметра заряда в интервале $d = 3 \div 10$ мм

понижает устойчивость горения, при дальнейшем росте диаметра его влияние незначительно.

Влияние условий опыта. Возможность нарушения послойного горения зависит от условий проведения эксперимента, которые определяют первоначальные причины, вызывающие фильтрацию продуктов горения в поры. Сравнение устойчивости горения одинаковых пористых образцов, проведенное в условиях манометрической бомбы и бомбы постоянного давления (при заполнении пор азотом), показало, что в последнем случае послойное горение нарушается при давлениях в 10—15 раз больших; при этом существенно различается характер возникшего конвективного горения (см. ниже). В условиях манометрической бомбы и схемы рис. 2, а значения давлений срыва близки.

Повышенная устойчивость горения в условиях бомбы постоянного давления обусловлена [3, 7] заполнением пор в процессе создания давления инертным холодным газом, что приводит к существенному уменьшению перепада давления, вызывающего фильтрацию продуктов в поры, и к интенсивному охлаждению продуктов. В этих условиях давление в порах равно давлению в объеме бомбы и одной из причин проникновения продуктов является динамическое повышение давления, существующее у поверхности горящего ВВ и обеспечивающее отток газа от поверхности. В ранних работах по устойчивости горения пористых систем [1, 2, 7, 10] динамическое повышение давления рассматривалось в качестве единственной причины проникновения продуктов в поры. Однако опыты по проникновению горения в единичную пору позволили установить, что существует также другая причина фильтрации продуктов, обусловленная специфическими особенностями, характерными для горения пористых систем. Было установлено, что наличие пор вызывает искривление поверхности горения и приводит к возникновению составляющих газового потока, направленных под углом друг к другу (рис. 9). Столкновение потоков в верхней части поры образует газовую струю, направленную по поре в глубь вещества, что способствует проникновению горения в пору. Позднее аналогичный результат был получен авторами работы [11].

При горении недеформируемых зарядов в манометрической бомбе и по схеме рис. 2, а начальное давление в порах равно атмосферному, поэтому фильтрация продуктов осуществляется под действием всего давления в объеме бомбы, что существенно облегчает нарушение послойного горения.

Было установлено, что проникновение горения в глубь вещества приводит к повышению давления в порах, и это внутреннее давление практически полностью определяет дальнейшее развитие процесса (вплоть до детонации) независимо от внешнего давления.

О характере распространения конвективного горения. Опыт показывает, что в зависимости от условий и прежде всего — от соотношения между газопритоком и газоотводом при горении пористого заряда — возможны различные режимы распространения конвективного горения.

В условиях манометрической бомбы и схемы рис. 2, а возникшее в длинных зарядах конвективное горение, как правило, ускоряется и при наличии прочной оболочки легко

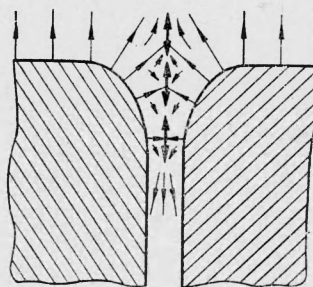


Рис. 9. Схема взаимодействия газовых потоков, которые приводят к формированию струи, направленной в глубь поры. (Тонкими стрелками показано направление движения газа, жирными — направление вектора скорости.)

переходит в детонацию. При горении укороченных зарядов с закрытым донным концом под постоянным внешним давлением (рис. 2, а), начавшееся с малой скоростью конвективное горение может замедляться и переходить в нормальное послойное горение (рис. 2, б). Такой режим часто наблюдается на пределе потери устойчивости.

В бомбе постоянного давления при заполнении пор инертным газом конвективное горение распространяется с приблизительно постоянной и небольшой по величине скоростью [6, 7] (порядка десятков сантиметров в секунду), что свидетельствует об ограниченной глубине проникновения горения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Необходимым условием нарушения послойного горения газопроницаемых систем является опережение газовыми продуктами¹ фронта послойного горения, которое выполняется, когда за время выгорания прогретого слоя $\tau = \frac{a}{u^2}$ передний фронт газа $X(t)$ распространяется на глубину, большую толщины прогретого слоя:

$$X(\tau) > \frac{a}{u}, \quad (3)$$

где a — температуропроводность ВВ; u — скорость послойного горения.

Достаточное условие нарушения послойного горения выражается в том, что горячие газовые продукты, опередившие фронт послойного горения, возбуждают впереди него интенсивную химическую реакцию, зона которой перемещается со скоростью, большей скорости послойного горения. В условиях опытов наиболее типичным результатом воздействия фильтрующихся газов являлся режим воспламенения (поджигания) пористого вещества.

Из приведенных экспериментальных результатов следует, что в зависимости от индивидуальных свойств ВВ давления, при которых нарушается послойное горение, могут существенно различаться. Такое различие не может быть объяснено без учета физического состояния поверхности горения.

Одной из основных особенностей большинства вторичных ВВ является их способность плавиться при горении без заметного разложения в конденсированной фазе. Специальные опыты (изучение поверхности горения погашенных пористых образцов, опыты с единичной порой) показали, что повышенная устойчивость горения (см. рис. 3 и 7) вторичных ВВ (тротил, пикриновая кислота, дина, тэн) объясняется наличием на горячей поверхности сплошного расплавленного слоя [3]. Последний выполняет роль газонепроницаемой перегородки, исключаяющей фильтрацию газовых продуктов в поры, что приводит к стабилизации горения. Условие сплошности расплавленного слоя означает, что его толщина не меньше максимального размера пор, откуда следует: чем больше толщина расплавленного слоя и меньше размер пор (меньше газопроницаемость и начальный размер частиц), тем эффективнее стабилизация горения. Эти положения подтверждаются результатами

¹ В зависимости от условий фильтрации и свойств горячей системы проникающие газы могут быть продуктами полного горения или промежуточными. Вопрос о роли расплава в процессе нарушения послойного горения будет рассматриваться особо.

эксперимента (см. рис. 3, 7 и 7, а). По степени устойчивости послойного горения в одинаковых условиях плавящиеся вторичные ВВ располагаются в следующий ряд: тротил (наиболее устойчив), пикриновая кислота, дина, тэн, гексоген. Полученный ряд соответствует величине расплавленного слоя, определенной для этих ВВ расчетным путем [3].

В случае смесевых ВВ на основе перхлоратов аммония и калия, характеризующихся низкой устойчивостью горения (см. рис. 4 и 7), образование сплошного расплавленного слоя (даже при использовании плавящегося горючего — тротила) затрудняется, поскольку перхлорат аммония при горении не плавится, а перхлорат калия плавится при высокой температуре с разложением [12]. Образованию сплошного слоя расплава препятствует также процесс диспергирования и наличие экзотермических реакций в конденсированной фазе [13], что существенно, например, при горении нитроклетчатки.

Предположение о стабилизирующем действии расплавленного слоя высказывалось Тэйлором [6]. Возможность влияния расплава на скорость горения пористых ВВ малой плотности отмечалась также К. К. Андреевым [14]. Однако позиция К. К. Андреева в этом вопросе была противоречивой [15].

Для нарушения послойного горения требуется, чтобы газовые продукты, проникшие в поры, приводили к воспламенению вещества. Процесс воспламенения определяется величиной конвективного теплового потока $q = \alpha (T - T_s)$ (α — коэффициент теплопередачи, T_s — температура поверхности поры), который в одинаковых условиях фильтрации газа зависит от температуры T проникающих газовых продуктов, а следовательно — от температуры горения ВВ и распределения температуры вблизи поверхности. К. К. Андреев [10] справедливо рассматривал высокую температуру горения как причину повышенной склонности к возникновению взрыва. Действительно, введение горючего в чистый перхлорат аммония (имеющий низкую максимальную температуру горения 1300° К), которое увеличивало температуру горения, приводило к нарушению послойного горения при меньших давлениях, с меньшими задержками воспламенения, а горение по порам развивалось с большими скоростями.

Вместе с тем проведенные опыты (измерение температуры газа в узкой поре и скорости ее воспламенения) показали, что основной причиной, облегчающей прорыв горения в поры, является малое расстояние между поверхностью горения и высокотемпературной газовой зоной [3], поскольку проникают в первую очередь газообразные продукты примыкающие к поверхности. Большая величина температурного градиента вблизи поверхности обеспечивает воспламенение пористого вещества газом высокой температуры и делает возможным горение в узкой поре.

При определенной величине теплового потока возможность и характер воспламенения пористого вещества зависят от его воспламеняемости. В частности, установлено, что увеличение начальной температуры заряда, уменьшающее необходимый для воспламенения запас тепла в прогретом слое, облегчает нарушение послойного горения при прочих равных условиях.

По мере увеличения газопроницаемости и пористости (а следовательно, — размера пор) различие в величинах давления срыва для исследованных ВВ сглаживается (см. рис. 3, 4 и 7). Данное обстоятельство указывает на то, что при большем размере пор роль индивидуальных свойств ВВ как фактора, влияющего на нарушение послойного горения, становится менее существенной.

Как было показано (см. рис. 7, а и 8), с увеличением начального размера кристаллов ВВ и диаметра заряда наблюдается уменьшение устойчивости горения образцов одинаковой газопроницаемости. Эти результаты, а также вид оптических записей конвективного горения свидетельствуют о том, что послойное горение нарушается не одновременно на всем фронте, а в отдельных центрах — наиболее крупных порах [3], в которые особенно легко начинается проникновение горения. Дальнейшему распространению горения по крупной поре способствует повышение давления в ней, что приводит также к возможности проникновения горения в более мелкие поры. При увеличении начального размера частиц и диаметра заряда возрастает число крупных пор, а следовательно, — число центров проникновения горения, что уменьшает устойчивость послойного горения. Факт зарождения и развития конвективного горения в отдельных порах подтверждается непосредственно характером оптических записей конвективного горения (см. рис. 2, б), которые имеют вид пульсаций, соответствующих проникновению горения в центральной части заряда с последующим выходом горения на боковую поверхность заряда. Именно поэтому газопроницаемость, которая является интегральным параметром пористой среды и которая не отражает характера распределения пор по размеру, не определяет однозначно возможности нарушения послойного горения. На существенную роль крупных пор в процессе нарушения послойного горения указывалось также в работе [16].

В общем виде теоретическое исследование задачи о нарушении послойного горения является крайне затруднительным из-за сложности процесса и отсутствия достаточного количества экспериментальных данных. Применительно к условиям схемы рис. 2, а, были получены некоторые полезные оценки, касающиеся неустановившейся фильтрации газа в пористую среду. Предполагалось, что фильтрация является изотермической и одномерной (в направлении оси x), а граница раздела ($x=0$) газ — пористая среда неподвижна. Рассматривалось неустановившееся (при $t > 0$) ламинарное движение газа, которое описывается уравнением Буссинеска [17]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{2m\mu} \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2},$$

где μ — динамическая вязкость газа.

Начальные и граничные условия при фильтрации в полубесконечную пористую среду записывались в виде:

$$p(x, 0) = 0, \quad p(0, t) = p_0,$$

где p_0 — постоянное давление газа, под действием которого осуществляется фильтрация.

В данной постановке задача такого рода решалась Г. И. Баренблаттом [18], которым было получено, в частности, аналитическое выражение для координаты переднего фронта газа:

$$X(t) = 1,62 \sqrt{\frac{k p_0 t}{m \mu}}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) получаем выражение необходимого условия нарушения послойного горения:

$$\frac{k p_0}{m \mu a} > 0,38. \quad (5)$$

Из (5) следует, что уже при давлении p_0 порядка десятков бар необходимое условие нарушения послойного горения заведомо выполняется для образцов с весьма малыми значениями газопроницаемости ($k \sim 10^{-6}$ *дарси*). Этот вывод качественно согласуется с экспериментальными результатами (см. рис. 3 и 7) по срыву горения в случае смесевых ВВ и пироксилина, т. е. когда отсутствует стабилизация расплавленным слоем.

Если фильтрация осуществляется в ограниченную пористую среду, необходимо поставить дополнительное условие на газонепроницаемой при $x=L$ границе

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=L} = 0,$$

а начальное условие переписать в виде:

$$p(x, t^*) = 0,$$

где t^* — время достижения передним фронтом газа газонепроницаемой границы. Решение этой задачи позволило получить распределение давления во времени по длине пористого образца:

$$p(x, t) = p_0 - \frac{p_0}{L^2} e^{-\frac{3k p_0}{m \mu T^2} (t - t^*)} \cdot (2Lx - x^2). \quad (6)$$

Оценка, проведенная по формуле (6), показывает, что в коротких образцах с большой газопроницаемостью выравнивание давления в порах до давления в объеме может происходить за малый промежуток времени, который, как правило, меньше времени задержки воспламенения вещества в порах. Данное обстоятельство объясняет послойное горение коротких образцов с большой газопроницаемой пористостью.

Необходимо отметить, что фактором, стабилизирующим горение пористых систем, является также разброс вещества [16], который является естественным результатом повышения давления в порах и существенным для прессованных систем, характеризующихся низкой механической прочностью.

ВЫВОДЫ

1. Изучено нарушение послойного горения пористых вторичных и смесевых ВВ при небольших значениях газопроницаемости (10^{-3} ÷ 10^{-6} *дарси*) и пористости (0,15 ÷ 0,03) образцов.
2. Рассмотрены причины, вызывающие фильтрацию продуктов горения в поры.
3. Получены зависимости критического давления срыва послойного горения от газопроницаемости, пористости и начального размера частиц. Нарушение послойного горения определяется не только величиной газопроницаемости, но и характером распределения пор по размеру.
4. Конвективное горение зарождается и развивается в отдельных крупных порах.
5. Показано, что увеличение (до определенного предела) диаметра пористого заряда понижает устойчивость горения.

6. Образующийся на поверхности горения сплошной расплавленный слой стабилизирует горение газопроницаемых пористых систем и является причиной повышенной устойчивости горения вторичных ВВ.

7. Фактором, облегчающим прорыв горения в поры, является малое расстояние от поверхности горения до высокотемпературной газовой зоны.

Поступила в редакцию
18/III 1966

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, 4.
5. К. К. Андреев, В. В. Горбунов. ЖФХ, 1963, 37, 9.
6. T. W. Taylor. Comb. and Flame, 1962, 6, 2.
7. К. К. Андреев, С. В. Чуйко. ЖФХ, 1963, 37, 6.
8. А. А. Сулимов, А. И. Коротков. ЖФХ, 1964, 38, 2.
9. А. Ф. Беляев, А. И. Коротков и др. ЖФХ, 1963, 37.
10. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. Л., Госэнергиздат, 1957.
11. А. Д. Марголин, С. В. Чуйко. ФГВ, 1965, 3.
12. M. Summerfield, C. Sutherland, M. Webb, H. Taback, K. Hall. Solid Propellant Rocket Research. New York — London, 1960.
13. П. Ф. Похил. Сб. «Физика взрыва». М., Изд-во АН СССР, 1953, 2; 1955, 3; 1956, 4.
14. К. К. Андреев. ЖФХ, 1946, 20, 6.
15. К. К. Андреев, П. П. Попова. ЖФХ, 1961, 35.
16. В. К. Боболев, И. А. Карпунин, С. В. Чуйко. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 1.
17. Л. С. Лейбензон. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М. Гостехиздат, 1960.
18. Г. И. Баренблатт. Изв. АН СССР, ОТН, 1954, 6.