

УДК 662.215.1

В. Е. Храповский

О НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОЦЕССА ПОДЖИГАНИЯ ПОРОШКООБРАЗНОГО ВВ С ЗАКРЫТОГО ТОРЦА

Методом одновременной оптической и пьезометрической регистрации процесса получены новые данные относительно поведения слоя легкосжимаемой пикриновой кислоты на начальной стадии, предшествующей возникновению конвективного горения. Установлены закономерности формирования и развития полости, образующейся вследствие уплотнения и движения ВВ под действием продуктов сгорания воспламенителя. Исследовано влияние на развитие полости параметров воспламенителя, ВВ (длины, начальной плотности, размера частиц), шероховатости стенок канала оболочки. Показано, что при небольших высотах слоя ВВ наряду с образованием полости наблюдается формирование обратной волны сжатия, распространяющейся к воспламенительному торцу. Определены ее параметры.

Для аварийных ситуаций перехода горения порошкообразных ВВ во взрыв характерно образование очага воспламенения в объеме вещества, содержащем свободные поверхности. В этом случае развитие горения в очаге (особенно на начальной стадии) зависит от воздействия разгрузки, возникающей из-за движения и уплотнения ВВ. Дальнейшее протекание процесса определяется еще рядом параметров: длиной слоя ВВ, мощностью воспламенителя, сопротивлением движению и т. д. В представленной работе исследовались закономерности процесса, протекающего на начальной стадии при поджигании ВВ с закрытого торца.

Методика

Применялась экспериментальная методика, которая позволяла проводить одновременно оптическую регистрацию распространения свечения (пламени), а также измерение давления на воспламенительном торце и в нескольких точках по длине заряда и установки. Использовалась металлическая неразрушающаяся щелевая оболочка, в канал которой плотно вставлялась прозрачная плексигласовая трубка с толщиной стенки 2,5, внутренним диаметром 5 и длиной 170 мм (рис. 1). Конструкция оболочки близка к той, которая применялась при исследовании перехода горения в детонацию [1, 2]. Оптическая регистрация осуществлялась с помощью фоторегистратора через щель оболочки, давление записывалось через боковые отверстия высокочастотными (200 кГц) пьезокварцевыми датчиками Т-6000, сигналы с которых фиксировались на многоканальных осциллографах ОК-40 и Datalab. В описанной постановке датчики регистрировали только газовое давление в канале оболочки.

Объект исследования — пикриновая кислота (ПК), которая располагалась в канале плексигласовой трубки. Выбор данного ВВ обусловлен характерным высоким давлением срыва послойного горения [3], что дало возможность эффективнее выделить и подробнее изучить явления, протекающие до горения в конвективном режиме. Размер частиц ПК, определенный по газопроницаемости насыпного слоя, $d_r = 70$ мкм. Отдельные эксперименты проведены с $d_r = 20$ мкм. Длина образцов

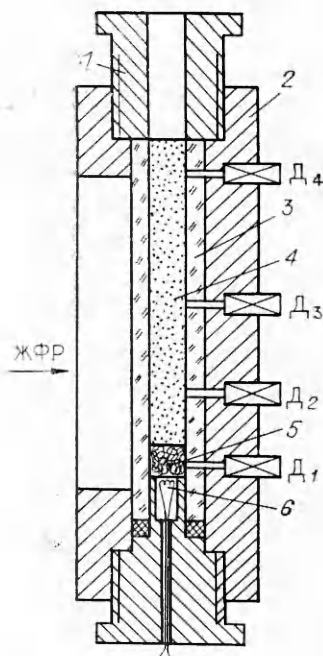


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — уплотнительная вставка; 2 — стальная щелевая оболочка; 3 — прозрачная плексигласовая трубка; 4 — слой исследуемого ВВ; 5 — воспламенитель (ДРП); 6 — нихромовая спираль; Д₁ — Д₄ — датчики давления.

$h = 48 \div 310$ мм, плотность ρ изменялась от насыпной ($0,7 \text{ г/см}^3$) до $1,1 \text{ г/см}^3$, получаемой порционным прессованием.

Длину канала сверх 170 мм получали подсоединением дополнительной металлической оболочки с тем же размером канала, при этом фоторегистрацию проводили лишь на начальных 155 мм, соответствующих высоте щели. ВВ воспламеняли у закрытого торца нихромовой спиралью и навеской 0,2 г дымного пороха ДРП с размером частиц меньше 50 мкм и высотой насыпного слоя 12 мм. В большинстве проведенных экспериментов противоположный от воспламенителя торец был открыт, но в отдельных случаях он закрывался дюралюминиевой мембраной толщиной 1 мм.

Погрешность измерения давления не превышала 5 %, скорости перемещения свечения (по фоторегистратору) 10 % при угле наклона фронта $30-60^\circ$. Синхронизация оптических и пьезометрических данных с точностью ± 10 мкс осуществлялась либо по волнам давления, которые регистрировались на фоторегистрограммах и на записях давления $p(t)$ (подробнее их описание приведено ниже), либо по прекращению свечения после развития процесса из-за разрушения плексигласовой трубки. На кривых давление — время этот момент характеризуется резким сбросом давления.

Обработкой полученных в опыте зависимостей $p(t)$ с использованием интерполяции в промежуточных точках графически строилось пространственное распределение давления $p(x)$ для различных моментов времени t . За начало отсчета времени принимался момент подъема давления на 3—5 атм на датчике Д₁, расположенном на воспламенительном торце. Применение нескольких датчиков давления позволило впервые получить пространственные профили давления при различных начальных высотах слоя ВВ.

Исследовалось влияние высоты слоя, его плотности, размера частиц ВВ, навески ДРП, свойств внутренней поверхности канала оболочки на процессы развития давления и свечения при горении воспламенителя и пикриновой кислоты.

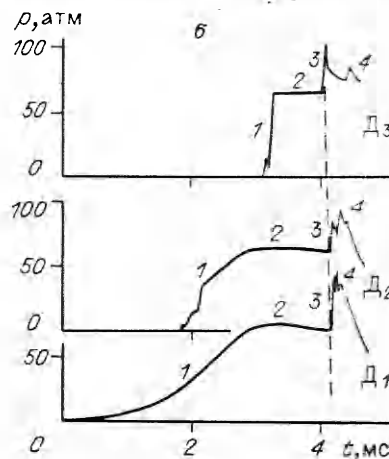
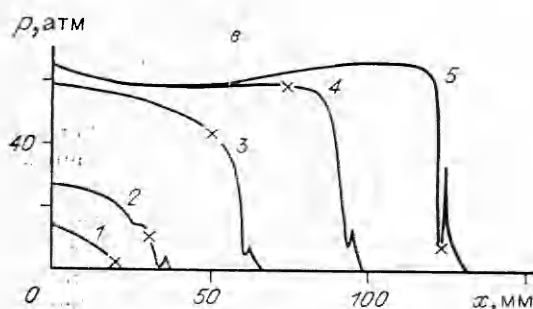
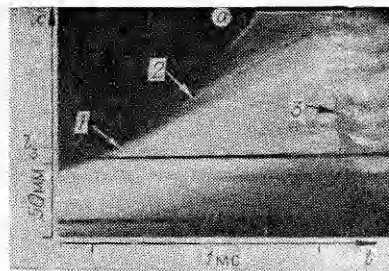
Экспериментальные результаты

Установлено, что для ПК насыпной плотности, как и для зернистых взрывчатых материалов [4], существует критическая высота слоя $H_{кр}$. При $H < H_{кр}$ горение протекает без взрыва, основная часть вещества выбрасывается из трубки несгоревшей. При $H \geq H_{кр}$ возникает конвективное горение, развитие которого приводит к заметному повышению давления (до 1 кбар и более). При размещении ПК в плексигласовой трубке $H_{кр} \sim 155$ мм. Замена канала прозрачной плексигласовой трубки на более шероховатый (с чистой поверхностью 5—6 вместо 8—9), образующийся в металлической оболочке после сверления, привело к величине $H_{кр} \sim 50$ мм.

На оптических записях, полученных при инициировании образцов ПК длиной 48—310 мм (больше и меньше $H_{кр}$), плотностью $0,7-1,1 \text{ г/см}^3$ и $\bar{a}_r = 70$ и 20 мкм, на начальном участке наблюдается движение ровного фронта свечения (рис. 2, а). Для выяснения процессов, протекающих на

Рис. 2. Характерные фоторегистрограмма развития свечения (а) и профили давления для насыпных образцов высотой 48 мм (б, в).

а) 1 — передний фронт свечения; 2 — заметное снижение яркости переднего фронта; 3 — движение обратной волны; l_3 — верхняя граница исходного слоя ПК; б) расстояния от спирали накаливания до датчиков давления: D_1 — 6, D_2 — 36, D_3 — 96 мм; в) t , мс: 1 — 1,19, 2 — 1,86, 3 — 2,6, 4 — 3,18, 5 — 3,5 мс, точки — положение переднего фронта свечения.



этом участке, рассмотрим подробнее эксперименты с высотой насыпного слоя 48 мм. Здесь регистрировался процесс свечения и измерялось давление не только на исходной высоте образца, но и над верхней границей слоя (обозначено l_3).

На фоторегистрограммах, полученных при исследовании указанных образцов, фронт свечения имел ровную границу 1 (см. рис. 2, а), яркость которой в отдельных опытах на небольших участках (30—40 мм) могла уменьшаться. Скорость движения переднего фронта возрастала¹ от 10—15 ($l = 15 \div 20$ мм) до 150—170 м/с ($l = 155$ мм), причем скорость треков непосредственно за ним незначительно отличалась от скорости самого фронта. В дальнейшем по образовавшейся светящейся области от верхнего торца к нижнему регистрировалось распространение обратной волны, за которой изменялись направление и скорость движения треков на оптической записи, причем в наименьшей степени в верхней части оболочки и возрастало по мере развития вниз. Скорость перемещения этой волны в параллельных опытах увеличивалась от 700 до 1550 м/с. Взаимодействие обратной волны с нижним торцом оболочки приводило к развитию от него отраженной волны, за которой движение треков менялось на противоположное (вверх).

Движение обратной волны регистрировалось датчиками в виде быстрого нарастания давления на 10—40 атм (рис. 2, б), с последующим более медленным спадом. Скорость перемещения участка 3, которая определялась по моменту начала подъема $p(t)$ на записях датчиков, отстоящих друг от друга на известные расстояния, с точностью до погрешности измерения совпадала со скоростью движения по светящейся зоне волны 3 (см. рис. 2, а). Следующий участок 4 с резким подъемом давления перемещался уже от воспламенительного торца, что соответствовало распространению отраженной волны. Развитие таких обратных волн регистрировалось оптически и на записях $p(t)$ только при коротких длинах слоя ВВ. Увеличение высоты слоя и замена ВВ на инерт (КВг, при небольшой его длине) приводило к отсутствию обратных волн. В последнем случае движение переднего фронта аналогично оптическим записям с ВВ (см.

¹ Все расстояния отсчитывались от местоположения спирали накаливания.

Таблица 1

Оболочка	Мембрана	h , мм	ρ , г/см ³	t_e , мкс	$(p_1 - p_2)t_e$, атм
Плексиглас	—	48	0,7	690	5—50
	—	48	0,7	740	3—45
	—	48	0,7	680	10—40
	—	155	0,7	750	15—60
	—	155	0,7	780	20—100
	—	155	0,7	710	15—105
	—	280	0,7	2070	20—70
	+	293	0,7	1610	100—250
	+	288	0,7	1630	20—140
	—	298	1,1	700	60—240
Металл	+	310	1,1	220	20—270
	+	106	1,0	290	50—140
	—	48	0,7	710	10—120

Примечание. +, — — наличие или отсутствие мембраны на противоположном от воспламенителя торце.

рис. 2, а), а на кривых $p(t)$, как и для ПК (см. рис. 2, б), наблюдается сначала повышение давления до 70—90 атм (участок 1) с последующим сохранением его некоторое время на этом уровне (участок 2).

Небольшому темпу увеличения зависимости $p_a(t)$ на воспламенительном торце (кривая Д₁, рис. 2, б) на участке 1 соответствует экспоненциальное нарастание давления ($p \sim (\exp^{t/t_e})$) в интервале $(p_1 - p_2)t_e = 5 \div 45$ атм с характерным временем увеличения давления $t_e = 680 \div 740$ мкс (табл. 1).

Пространственные профили давления при развитии ровного фронта свечения до возникновения обратной волны приведены на рис. 2, в, где видно формирование перед фронтом пламени пикообразного профиля с возрастающей по мере движения амплитудой давления в пике. На начальных стадиях (кривые 1—3) максимальное давление регистрируется на воспламенительном торце, в последующем наблюдается выравнивание давления по длине за фронтом пламени.

Осмотром после опыта поверхности вокруг оболочки установлено, что основная часть ПК выбрасывается несгоревшей.

О механизме процесса

Обнаруженное в экспериментах с короткими образцами распространение по светящейся в области обратной волны со скоростью $D = 700 \div 1550$ м/с позволило оценить плотность вещества в области за ровным передним фронтом свечения из выражения $\Delta p = \rho D \Delta u$, где Δp — измеренная датчиками амплитуда давления в этой волне (участок 3 на рис. 2, б); Δu — изменение скорости движения вещества, вызываемое этой волной и определенное по изменению скорости движения треков частиц на оптических записях. Оказалось, что величина ρ составляет $\sim 0,02$ г/см³.

Сравнение характерных времен нарастания давления на воспламенительном торце ($t_e \geq 700$ мкс) при движении только ровного фронта свечения в экспериментах с образцами насыпной плотности высотой 48—310 мм (см. табл. 1) с временем нарастания давления при сгорании той же навески 0,2 г ($l_v = 12$ мм) воспламенителя (ДРП) в замкнутом объеме ($t_e \approx 245$ мкс) показало, что при наличии слоя ПК над воспламенителем интенсивность подъема давления снижается в 3 раза и более. При этом максимальное давление уменьшается с 900 (в замкнутом объеме) до 90—250 атм, регистрируемого на воспламенительном торце при развитии только ровного фронта свечения. Отмеченные результаты указывают, что ДРП сгорает в объеме, в несколько раз превышающем исходный.

Расчет количества сгоревшего вещества² на стадии распространения ровного фронта свечения (до возникновения обратных волн в экспериментах с короткими образцами) и начала развития конвективного горения в опытах с образцами большей длины по построенным профилям $p(x)$ (см. рис. 2, в) показал, что к указанным выше моментам сгорает около половины навески воспламенителя.

Основываясь на приведенных данных и учитывая, что используемый в качестве воспламенителя дымный порох лучше воспламеняется и имеет большую скорость послойного горения, чем пикриновая кислота, можно заключить, что на первой стадии, характеризуемой временами нарастания t_e и ровным фронтом свечения, сгорает в основном ДРП, а горение пикриновой кислоты вносит незначительный вклад в изменение давления. Под действием образующихся продуктов происходит движение и уплотнение ПК с образованием полости, заполненной продуктами сгорания воспламенителя. Последнему способствует не только плохая воспламеняемость ПК, но и ее высокая сжимаемость, особенно при низких плотностях³.

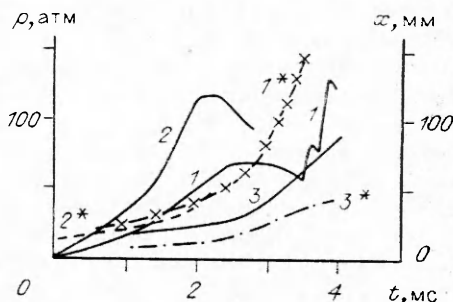
Отсутствие заметного воспламенения и горения ПК подтверждается ее наличием вокруг оболочки после опытов, где регистрировался лишь ровный фронт свечения. Доказательством сжатия служат эксперименты с регистрацией волн уплотнения в слое ВВ на заметном расстоянии перед фронтом свечения (о которых будет рассказано ниже) и опыты с насыщенным слоем ПК ($d_r = 20$ мм, $h = 280$ мм), ограниченным мембраной, в которых после развития ровного фронта свечения в верхней части оболочки оставался уплотненный слой пикриновой кислоты.

Таким образом, движение ровного светящегося фронта представляет собой перемещение границы раздела между продуктами сгорания воспламенителя и уплотняющейся пикриновой кислотой, т. е. определяет движение передней границы образующейся вблизи очага воспламенения полости.

Закономерности развития полости

При увеличении h до 155 мм перемещение верхней границы полости $x(t)$ совпадает с таковым для образцов с $h = 48$ мм. Однако зависимости $p(t)$ на воспламенительном торце различаются (рис. 3). Для образцов с $h = 155$ мм реализуется более высокое давление, хотя значения t_e на стадии экспоненциального его роста отличаются незначительно (см. табл. 1). Аналогичные изменения наблюдаются и при повышении p до 1,0—1,1 г/см³. Рост высоты насыщенного слоя ПК до 290—300 мм приводит к неожиданным результатам: снижается интенсивность па-

Рис. 3. Зависимости $x(t)$ (1*, 2*, 3*) и $p(t)$ (1, 2, 3) при развитии полости в образцах.
 h , мм: 1, 1* — 48, 2, 2* — 155, 3, 3* — 290.



² При расчете использовалось выражение для определения давления в манометрической бомбе [5] с объемом, соответствующим расстоянию, на которое распространился передний фронт свечения.

³ Измерения плотностей ПК в условиях статического сжатия показали, что наибольшее ее уплотнение с $\rho = 0,7 \div 1,1-1,15$ г/см³ наблюдается при давлениях 10—15 атм соответственно. Дальнейшее увеличение p слабее сказывается на росте плотности ($\rho = 1,2$ и 1,3 г/см³ при $p = 36$ и 90 атм соответственно).

Таблица 2

p , атм	ρ , г/см ³ при d_r , мкм	
	70	20
1,65	0,78	1,0
3,30	0,87	1,05
6,60	0,96	1,07
13,2	1,07	1,12

растания $p_v(t)$ (см. табл. 1) и $x(t)$ (см. рис. 3, 3*).

Постановка мембраны на противоположный от воспламенителя торец слабо сказывается на зависимостях $p_v(t)$ и $x(t)$ при $h \approx 300$ мм (t_e уменьшается с 2070 до 1610—1630 мкс, см. табл. 1) и приводит к заметному их изменению при $h < 155$ мм. В последнем случае увеличиваются скорость

повышения давления в полости и интенсивность расширения. Например, при $h = 155$ мм в отсутствие мембраны $p_v = 50$ атм достигалось в момент 1,5 мс, а с мембраной — при 0,6 мс, скорость перемещения полости на высоте 27 мм составляла соответственно 15 и 30 м/с, однако для одинакового расширения полости требуются большие давления при наличии мембраны. К аналогичным изменениям приводит утяжеление навески воспламенителя до 0,35 г.

Уменьшение размера частиц ПК до 20 мкм (при высоте насыпного слоя 280 мм) вызывает более интенсивное (на 30—40 мм) увеличение размера полости при одинаковых начальных изменениях $p(t)$ до ~ 15 атм. В последующем $p_v(t)$ и $x(t)$ растут быстрее для образцов с $d_r = 20$ мкм. Отмеченный эффект можно объяснить изменением сжимаемости пикриновой кислоты с уменьшением d_r . Ее измерения в статических условиях показали, что при $p \leq 13$ атм образцы с мелкими частицами уплотняются до большей плотности (табл. 2). При дальнейшем увеличении давления разница в плотностях исчезает.

Для выяснения причин изменения свечения во фронте при развитии полости, характера уплотнения и движения слоя ПК проведены специальные эксперименты с постановкой на противоположный от воспламенителя торец поршневого датчика давления (диаметр поршня равен диаметру канала). Поршень контактировал с верхней границей слоя ПК ($h = 180$ мм), перемещение которой регистрировалось в виде начала подъема давления на торцевом датчике. Кроме того, по кривой $p_v(t)$ в области воспламенителя (кривая D_1 на рис. 2, б) вычислялся импульс,

действующей на нижнюю часть ПК силы $I = (\pi d^2/4) x \int_0^t p_v(t) dt$, где d —

диаметр канала плексигласовой трубки. По массе всего слоя ПК m и скорости движения верхней границы полости v (ровного фронта свечения) рассчитывался момент количества движения $M = mv$ и его изменение во времени. Синхронизация оптических и пьезометрических данных позволила определить значения I и M в одинаковые моменты времени и установить изменение их соотношения $k(x) = I/M$ по мере развития переднего фронта свечения $x(t)$.

В результате проведенных экспериментов и их обобщения было установлено, что начало уплотнения верхнего слоя ВВ регистрируется на заметном расстоянии (до 110 мм) выше фронта свечения. Значения k возрастают от 0,18—0,2 до 4—11, что указывает на постепенное вовлечение в движение все большей части слоя ПК и увеличение сопротивления его перемещению. Момент охвата движением всего слоя ВВ, который к этому времени имел меньшую по сравнению с начальной высоту (большую плотность), характеризуется изменением (ослаблением) зависимости $k(x)$. Удалось установить, что движение ровного фронта свечения на начальной стадии соответствует перемещению лишь нижней границы слоя ПК и ее уплотнению. Дальнейшее ослабление свечения, или даже его прекращение (в опытах с $h = 155$ мм) связано с начавшимся движением всей массы пикриновой кислоты и обусловлено, по-видимому, остатком тонкого слоя ВВ на боковой поверхности плексигласовой трубки.

Следует отметить, что не во всех случаях при сгорании воспламенителя на начальной стадии происходило движение и уплотнение ПК

с образованием полости. В металлической оболочке с каналом, образующимся после сверления и имеющим более шероховатую поверхность, на образцах ПК с плотностью $1,0-1,1 \text{ г/см}^3$ характерные времена повышения давления на воспламенительном торце на начальной стадии (см. табл. 1) совпадают со значениями, полученными при сгорании той же навески ДРП в таком же, но замкнутом объеме. Этот результат свидетельствует об отсутствии движения ПК, что может быть обусловлено значительным увеличением силы сопротивления при движении уплотненного ВВ в канале с высокой шероховатостью.

Таким образом, показано, что на начальной стадии при воспламенении ВВ с закрытого торца под действием продуктов сгорания воспламенителя в большинстве случаев может происходить образование и расширение полости, заполненной этими продуктами, и уплотнение ВВ без заметного его горения. Развитие полости зависит от параметров ВВ (длины, сжимаемости, начальной плотности) и сопротивления его перемещению за счет внешних факторов (шероховатость стенок оболочки, наличие мембраны на противоположном от воспламенителя торце). В свою очередь изменение объема полости, в которой сгорает воспламенитель, влияет на интенсивность его горения и повышение давления в ней. Образование полости необходимо учитывать при анализе перехода горения порошкообразных ВВ в детонацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Храповский В. Е., Сулимов А. А., Ермолаев Б. С. О переходе горения пикриновой кислоты в низкоскоростную детонацию // Докл. IV Всесоюз. совещ. по детонации.— Телави, 1988.— Т. 1.— С. 129—133.
2. Sulimov A. A., Ermolaev B. S., Khrapovski V. E. Mechanism of deflagration-to-detonation transition in high-porosity explosives // Progr. Astron. Aeron. Dynamics of Explosions.— 1988.— 114.— P. 322—330.
3. Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв.— М.: Наука, 1973.
4. Ермолаев Б. С., Фотеенков В. А. и др. Критические условия перехода горения во взрыв в зерновых взрывчатых материалах // ФГВ.— 1990.— 26, № 5.— С. 102—110.
5. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика.— М.: Оборонгиз, 1949.

г. Москва

Поступила в редакцию 24/III 1992,
после доработки — 24/VII 1992

УДК 536.46

Е. И. Губин, И. Г. Дик

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА НА МИНИМАЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ ЗАЖИГАНИЯ ИСКРОЙ

На основе анализа теоретической теплораспространенной модели искрового зажигания газозвзвеси предложена инженерная зависимость, связывающая минимальную энергию зажигания искрового источника с параметрами пылевого облака.

Многообразие производств, непосредственно связанных с получением или переработкой дисперсных материалов, выдвигает требования предотвращения возгораний и взрывов [1—4]. Одним из критериев оценки пожаро- и взрывоопасности служит минимальная энергия зажигания — чувствительность дисперсного материала к искровым источникам. В качестве искрового источника могут выступать как электрические разряды, возникающие в результате трения или разрушения твердой фазы, так и раскаленные металлические частицы.

Постановка теоретической задачи о зажигании искрой горючей пылегазовой смеси приведена в [5]. Математическая модель процесса воз-