

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

№ 1

1965

В. К. Боболев, И. А. Карпунин, С. В. Чуйко
(Москва)

О ГОРЕНИИ ПОРИСТЫХ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Причиной возникновения взрывов при горении пористых зарядов взрывчатых веществ (ВВ) в условиях возрастающего давления считается [1] нарушение баланса газоприход—газоотвод, возникающее при горении заряда по внутренней поверхности пор. В этих условиях рост скорости горения приводит к росту давления, что увеличивает скорость горения и т. д.; в результате возникает взрыв. В последнее время была отмечена возможность возникновения взрыва через самовоспламенение полупродуктов горения в порах ВВ [2].

В данной работе излагаются результаты наблюдения процесса возникновения взрыва при горении пористых зарядов в манометрической бомбе и влияние флегматизации на этот процесс. Применение фоторегистрации позволило выявить ряд существенных для понимания механизма процесса деталей, которые нельзя было получить обычными методами, основанными на записи давления в объеме горения [3].

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Использовалась манометрическая бомба с окнами объемом до 150 см^3 , который можно было при необходимости изменять. Рост давления в процессе сгорания заряда записывался пьезодатчиком, подключенным к катодному осциллографу. Барабанный фоторегистратор и скоростная кинокамера СКС-1 позволяли фиксировать процесс горения по его свечению. Подробнее аппаратура описана ранее [2].

Применялись заряды из порошкообразного чистого и флегматизированного парафином гексогена. Размер частиц флегматизированного гексогена составлял везде около 200 мк ; размеры частиц чистого гексогена изменялись от 50 до 360 мк . Заряды помещались в прозрачные стаканы из оргстекла с внутренним диаметром 8 , высотой 40 и толщиной стенок 5 мм . Для киносъемки были применены стаканы из оргстекла прямоугольного сечения $10 \times 4 \text{ мм}$ при высоте 35 мм , что уменьшило вероятность протекания процесса вне поля зрения камеры. Воспламенение зарядов низкой плотности производилось от электроспирали, что исключало влияние воспламенителя. Заряды высокой плотности поджигались от воспламенителя в виде навески $0,2$ — $0,6 \text{ г}$ измельченного черного пороха. Плотность заряжения не превышала $0,05 \text{ г/см}^3$. В этих

условиях скорость нарастания давления была недостаточной для образования ударной волны.

По осциллограммам давления и фотозаписям горения определялись давления срыва нормального режима и характер горения. Записи давления перестраивались в полулогарифмических координатах, что позволяло выявить различные стадии горения. По прямым записям $p(\tau)$ сделать это трудно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотрение фотозаписей и осциллограмм давления (рис. 1, 2) позволяет выявить следующие характерные стадии процесса перехода горения во взрыв.

Нормальное горение. Сразу после воспламенения заряда ВВ как чистого, так и флегматизированного устанавливается нормальный режим горения. При этом скорость горения близка к наблюдаемой в условиях соответствующего постоянного давления. Однако если горение заряда длится долго (более 3 сек), то скорость постепенно начинает превышать нормальное значение. Фотозаписи горения на нормальном режиме имеют характерный вид: от поверхности горящего заряда идут отдельные яркие струи¹, которые особенно хорошо различаются на снимках, сделанных скоростной кинокамерой (рис. 3, 1).

Возмущенное горение. Нормальное горение (см. рис. 2) плавно переходит в более или менее ярко выраженное возмущенное горение. При этом фронт горения несколько размывается, интенсивность свечения пульсирует. Участок возмущенного горения заканчивается перерывом свечения длительностью несколько десятков миллисекунд. Изменение размеров частиц и плотности зарядов не оказывает заметного влияния на внешнюю картину этой стадии. Однако длительность перерывов свечения при равной относительной плотности растет с увеличением размеров зерна. Так, при средних размерах зерна гексогена 80, 130, 280 и 360 мк и $\delta=0,6$ это время составило соответственно 16, 26, 37 и 44 м/сек, что дает приблизительно линейную связь между временем перерыва свечения и размером зерен.

Из рис. 2 видно, что введение парафина расширяет участок горения с размытым фронтом. Чтобы проследить влияние флегматизатора на процесс распространения горения в поры, было произведено гашение зарядов чистого и флегматизированного гексогена путем вскрытия дна стакана с горящим ВВ на атмосферу. Оказалось, что от поверхности в глубь заряда отходят каналы, по которым прошли горячие газы. Стенки каналов оплавлены. Причем в чистом гексогене весь образец испещрен узкими разветвленными каналами.

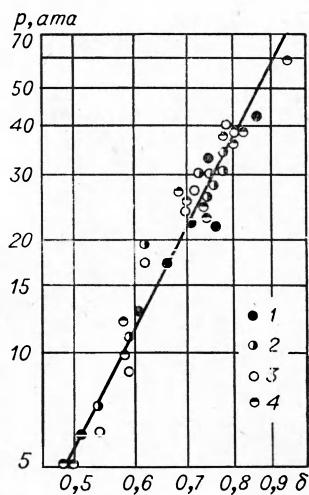


Рис. 1. Зависимость давления срыва нормального горения p_* от относительной плотности для гексогена с различными добавками парафина при размере частиц около 200 мк:

1 — чистое вещество; 2 — 0,5%;
3 — 2%; 4 — 10%.

¹ Неоднородный, струйчатый вид отходящего от поверхности пламени является характерным для горения порошкообразных ВВ [5].

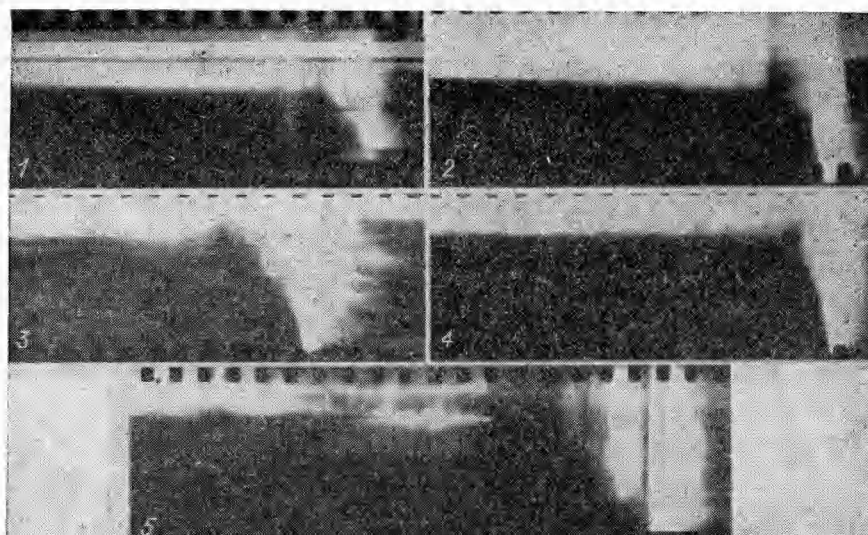


Рис. 2. Фоторегистрации горения гексогена с размером частиц около 200 мк: 1 — $\delta=0,6$; 2 — $\delta=0,6$ (0,5% парафина); 3 — $\delta=0,48$ (2% парафина); 4 — $\delta=0,72$ (2% парафина); 5 — $\delta=0,5$ (10% парафина). Скорость развертки на фото 1 в 1,5 раза больше, чем на остальных регистрациях.

Во флегматизированном веществе у самой поверхности горения каналов также много, но они очень быстро обрываются, остается 1—2 больших широких канала, уходящих на большую глубину. Стенки каналов оплавлены и не имеют выходов в стороны, идут каналы извилистым путем. На рис. 3, 2 приведен фотоснимок одного из затухших образцов.

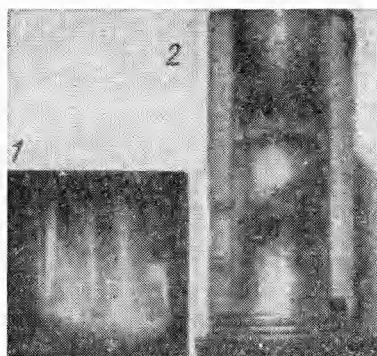


Рис. 3.

1 — фото отходящих от поверхности струй газов, гексоген, $\delta=0,8$; 2 — фото затухшего образца гексогена с 2% парафина, $\delta=0,65$.

в отдельных местах на некоторую глубину, в результате чего происходит выброс с поверхности отдельных кусков заряда, расплывающихся и загорающихся в газовом потоке. Киносъемка показывает, что в момент выброса вещества в зону пламени интенсивность свечения может снизиться, что выглядит как частичное затухание заряда. Горение возрождается из точек, наименее затронутых выбросом, и распространяется через последовательный ряд таких прорывов и выбросов как отдельных зерен, так и целых кусков вещества. При этом чем меньше поры, в которую проникло горение, тем сильнее выброс, что естественно объяс-

Для моделирования процессов, происходящих при возмущенном горении, была проведена скоростная киносъемка быстрогорящего ВВ в плоском стакане. Низкая плотность ($\delta=0,6$) и большая скорость горения обеспечили уже при нормальном давлении возникновение возмущенного горения, аналогичного происходящему при горении более плотных зарядов при повышенном давлении. Моделирование позволило наглядно показать особенности этого режима.

На рис. 4, а приведены кадры киносъемки возмущенного горения модельного заряда. Видно, что горение проникает

нить ростом давления в поре вследствие затрудненного газоотвода. В том случае, когда отдельный участок вещества окружен достаточно широкими каналами отвода газов, местный подъем давления незначителен, и выброса не происходит.

Взрыв (или ускоренное сгорание) заряда. Вслед за временным ослаблением свечения в условиях манометрической бомбы следует или взрыв, или ускоренное сгорание, оставшейся части заряда. В чистом гексогене, как правило, происходит взрыв, сопровождающийся резким звуком, дроблением стакана и скачком давления. Если же к гексогену добавлено хотя бы 0,5% парафина, то в подавляющем большинстве случаев происходит ускоренное сгорание заряда без механического действия.

Киносъемка процесса перехода нормального горения во взрыв.

На рис. 4, б приведены кадры скоростей киносъемки процесса перехода нормального горения чистого гексогена во взрыв в условиях манометрической бомбы. Видно, что после периода нормального горения впереди фронта, на глубине порядка 6—8 мм, произошло воспламенение части заряда. Газоотвод оказался затрудненным, местный подъем давления привел к выбросу части заряда, что сопровождалось временным ослаблением интенсивности свечения, а также разрушением фронта горения. Через некоторое время горение на поверхности возобновилось, однако фронт горения остался несплошным. Через 0,04 сек после выброса вещества возник взрыв.

Характер протекания процесса во флегматизированном гексогене (рис. 4, в) остался без изменения. Однако нужно отметить следующие специфические особенности. Во-первых, фронт горения даже при нормальном режиме в отдельных местах колеблется. По мере увеличения давления толщина ярко светящейся зоны на поверхности заряда уменьшается. Во-вторых, длительность возмущенного горения возрастает (по сравнению с чистым веществом) в 1,5—2 раза. Аналогично, при равных прочих условиях увеличивается длительность перерыва свечения. Так, добавка 2% парафина к гексогену с размером частиц около 200 мк увеличила это время с 26 до 50 мсек. В-третьих, возмущенное горение переходит не во взрыв, как это наблюдается для чистого вещества, а на новый режим, который выражается в ускоренном сгорании оставшейся части заряда.

Осциллограммы давления. Записи изменения давления в объеме бомбы в процессе перехода горения во взрыв можно разбить на следующие три типа (рис. 5)¹.

Записи типа 1 наблюдаются всегда при горении флегматизированного гексогена и часто при горении чистого с размерами частиц более

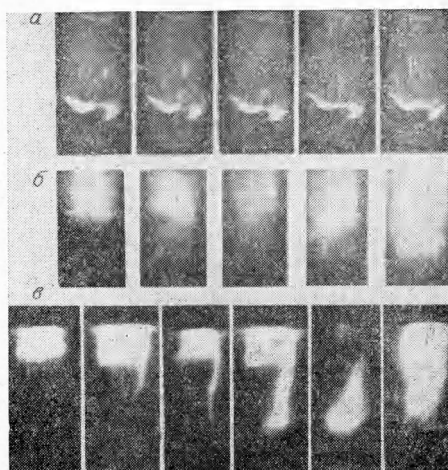


Рис. 4. Кадры киносъемки горения:
а — модельного заряда; б — гексогена в манометрической бомбе, $\delta=0,7$; в — флегматизированного (10% парафина) гексогена, $\delta=0,7$.

¹ Рис. 5 показывает только характер различных кривых $p(\tau)$, но не их истинное относительное расположение.

300 мк. В этих случаях коэффициент роста скорости давления $\frac{1}{p} \cdot \frac{dp}{d\tau}$ на участке *BC* (по сравнению с нормальным горением на участке *AB*) возрастает в 1,5—2 раза. По времени участок *BC* составляет 0,1—0,3 сек.

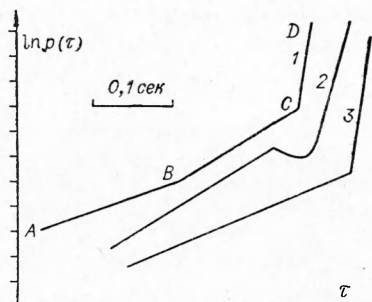


Рис. 5. Характер хода кривых $p(\tau)$ при переходе нормального горения гексогена во взрыв (или ускоренное сгорание):
1 — флегматизированное вещество; 2 — размер частиц ~ 50 мк; 3 — размер частиц ~ 200 мк.

Записи типа 2 наблюдаются при горении чистого гексогена с размерами частиц менее 50 мк.

При возникновении самовоспламенения полупродуктов горения в порых ВВ [2] запись $p(\tau)$ имеет вид кривой 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Процесс перехода нормального горения пористых зарядов в условиях горения под возрастающим давлением во взрыв развивается следующим образом.

Нормальное горение пористого заряда идет до тех пор, пока фильтрующиеся из объема бомбы в поры ВВ горячие газы не прогреют вещество до температуры газификации на глубине большей, чем толщина теплового слоя. Фильтрация газов в поры заряда приводит к разогреву стенок пор (вещества). Этим и объясняется отмеченное выше увеличение скорости нормального горения при длительном процессе. В этом смысле следует различать послойное горение со скоростью, соответствующей данному давлению для процесса в условиях постоянного давления, и послойное горение, но с отличной скоростью. Так, например, горение мелкокристаллического тэна низкой плотности при высоких давлениях идет послойно [5], но со скоростью, превышающей нормальную в десятки раз.

Неоднородная структура пламени указывает на неравномерность горения по поверхности заряда, что связано прежде всего с ее гетерогенностью, обусловленной пористостью. Как следствие облегчается фильтрация газов в поры заряда и подготовка распространения по ним горения. Каналы фильтрации в будущем становятся каналами распространения горения в глубь заряда.

Возмущение горения связано с тем, что по мере роста давления (скорости горения) в объеме бомбы размеры пор становятся соизмеримыми с толщиной теплового слоя [4] и фронт горения постепенно начинает прогибаться в пору. Сначала в процесс горения включаются лишь наиболее крупные поры, причем каналы фильтрации газов, как наиболее подготовленные, являются наиболее благоприятными направлениями распространения горения. Происходит воспламенение поры по большой поверхности. Вследствие затрудненного газоотвода давление в ней возрастает. Чем больше углубилось горение в пору, тем выше в поре давление, а поскольку максимальным давлением становится в наиболее глу-

бокой точке зоны горения, проникновение в пору становится самоускоряющимся. Но этот процесс может продолжаться лишь до тех пор, пока подъем давления не разрушит пору. Возникает явление выброса с поверхности и ускоренного сгорания в зоне пламени отдельных частиц и кусков заряда¹. Выброс вещества в отдельных точках поверхности в зону пламени является характерной чертой возмущенного горения.

По мере роста давления масштабы явления увеличиваются, и, наконец, при очередном выбросе вещества зона горения на поверхности заряда разрушается настолько, что вторичное пламя вместе с выброшенными частицами сносится вверх. Возникает перерыв свечения. Опыт показывает, что основной причиной отброса пламени является именно выброс с поверхности заряда большого количества вещества, сопровождающийся выходом по порам продуктов газификации разогретых нижних слоев заряда. Это приводит к нарушению фронта горения в значительной части поверхности и охлаждению зоны пламени над зарядом. Введение в зону пламени массы вещества, спустя период задержки, приводит к воспламенению его по большой поверхности. Быстрое сгорание частиц ВВ создает скачок давления над поверхностью заряда, который способен вызвать усиленное проникновение в поры заряда газов с высокой температурой и создать адиабатический разогрев газов в порах оставшейся части заряда. Результат первого из этих воздействий будет зависеть от того, как быстро по глубине заряда будет отдано тепло газов, каков запас их тепла, какие размеры пор в заряде (газопроницаемость), каков период задержки воспламенения вещества и т. д. В местах, где поверхность вещества заплавлена, проникновение затруднено, там же, где защитного слоя нет, горячие газы с большой скоростью проникают вглубь.

Ранее уже указывалось [2], что если создаются благоприятные условия, то полупродукты и газы горения, проникшие в глубь заряда и обогащенные за счет экзотермических реакций на поверхности нагреваемых ими зерен ВВ, могут самовоспламениться в порах и вызвать взрыв заряда. Этому может также способствовать их адиабатическое сжатие. Поскольку оба пути перехода во взрыв существуют одновременно, вопрос сводится к тому, что успеет быстрее развиться — самовоспламенение в порах или описанный выше механизм.

Влияние флегматизатора. Чем больше размер пор, тем легче проникает в них горение (при одинаковой скорости горения). Введение флегматизатора типа парафина приводит к укрупнению пор, поскольку при неизменной относительной плотности доля мелких пор уменьшается. Одновременно уменьшается и удельная поверхность заряда. Фильтрация газов происходит по большим каналам-порам, которые поддерживают хорошую связь с поверхностью. Горячие газы оплавливают парафин и замыкают выходы из этих каналов в стороны. Заплывание мелких пор будет происходить и при горении нефлегматизированного, но легкоплавкого ВВ. Но в отличие от чистого вещества пора во флегматизированном веществе прогорает с меньшей скоростью, и подъем давления в ней слабее. Флегматизированное ВВ после выброса в зону пламени воспламеняется медленнее по сравнению с чистым веществом. Это связано с тем, что зерна ВВ покрыты слоем теплоотводящего материала — парафина. Другими словами, выброс флегматизированного ВВ соответствует внесению в зону пламени охладителя. Все это и приводит к значительному увеличению перерыва свечения.

¹ Определенную роль при этом может играть также диспергирование вещества вследствие реакций в конденсированной фазе.

Еще одной интересной особенностью горения флегматизированного ВВ является вид записей $p(\tau)$: наличие участка ускоренного роста давления (участок BC на кривой 1, рис. 5), соответствующего стадии возмущенного горения. Этот факт объясняется тем, что если происходит выброс небольшой порции чистого ВВ, то вклад от его сгорания в давление будет небольшой, но повлечет за собой сильное нарушение фронта горения. Теплоотвод в стенки бомбы может привести к тому, что возникнет даже спад давления (рис. 6). В случае флегматизированного ВВ относительная доля разрушенной части фронта горения меньше; преобладающим оказывается увеличение поверхности горения из-за ее искривления, что и приводит к некоторому росту скорости подъема давления.

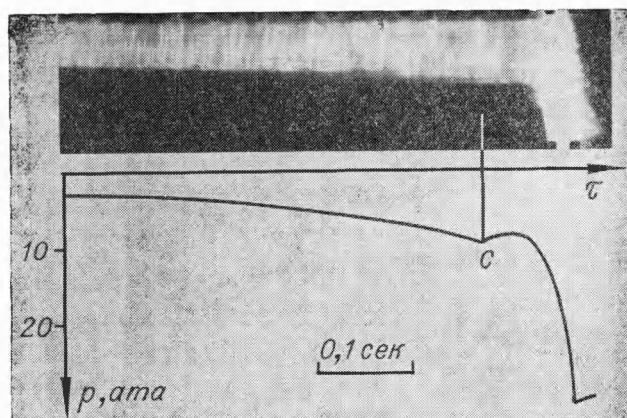


Рис. 6. Совмещенные запись $p(\tau)$ и фотозапись горения гексогена с размером частиц ~ 50 мк при $\delta=0,68$.

Основной эффект введения флегматизатора состоит в том, что, не влияя на последовательность развития процесса, а также на зависимость p_* от δ , флегматизатор устраняет взрывы, которые происходят в чистом ВВ, сводя процесс срыва нормального горения к ускоренному выгоранию оставшейся части заряда. Все это связано с тем, что при прорыве продуктов горения по порам внутрь заряда флегматизатор играет роль теплового барьера, отбирая на себя значительную часть тепла газов, он не позволяет им воспламенить соседние слои ВВ.

В связи с полученными данными представляет интерес сравнить эффект флегматизации в рассматриваемом случае с его влиянием на чувствительность ВВ к механическим воздействиям, где флегматизатор слабо влияет на возбуждение взрыва в очаге [6], но значительно уменьшает вероятность его распространения. В этом отношении влияние флегматизатора на переход горения во взрыв оказывается аналогичным.

Влияние плотности заряда и размеров зерен. Увеличение плотности заряда приводит к уменьшению размеров пор. При этом для проникновения горения в поры требуется большая скорость горения (давление). На стадии сгорания выброшенного в зону пламени вещества узкие поры приведут к усиленной теплоотдаче от проникающих газов к стенкам пор, что уменьшит глубину, на которой эти газы смогут воспламенить вещество.

Если проследить влияние размера зерна (при постоянной плотности), то особенно сильным оно будет на стадии выброса и сгорания. Чем мельче зерна, тем больше их удельная поверхность, тем быстрее про-

изойдет прогрев, воспламенение и сгорание выброшенного в пламя вещества и тем резче будет созданный сгоранием скачок давления. Это иллюстрируют и приведенные выше данные по длительности перерыва свечения, с которой можно сопоставить время индукции воспламенения зерен в пламени.

Если рассмотреть два крайних случая — очень узкие и очень широкие поры, то нетрудно видеть, что наибольший взрывной эффект следует ожидать при промежуточных размерах пор [3]. Действительно, в узких порах поток горячих газов, созданный скачком давления, быстро охладится на малой толщине заряда. В широких порах газы пройдут большой путь, но отдадут свое тепло большой поверхности по ходу движения и не смогут воспламенить вещество по всей этой поверхности. Опыты по искусственному гашению зарядов, описанные выше, иллюстрируют последний случай.

О записях $p(\tau)$. Записи изменения давления в бомбе $p(\tau)$, несмотря на их простоту и привычность, требуют известной осторожности при интерпретации. Теплоотвод в стенки бомбы, зависящий от целого ряда непрерывно изменяющихся параметров, не позволяет, вообще говоря, судить по обычным записям $p(\tau)$ о скорости горения, величине горячей поверхности и т. д. Но в то же время наличие теплопотерь делает любое изменение процесса горения более резким: если горение ускорилось, относительные теплопотери упали, если замедлилось, возросли, что приводит к более выпуклому отражению этих изменений на записи $p(\tau)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нетрудно видеть определенную общность между данной точкой зрения на явление перехода нормального горения во взрыв в условиях возрастающего давления и взглядами других исследователей [1, 3]. Однако данные, полученные в этой работе, существенно уточняют как всю картину в целом, так и развитие ее отдельных фаз. Например, по К. К. Андрееву, образование и накопление взвеси частиц в зоне пламени при сгорании по механизму теплового взрыва может вызвать взрыв или даже детонацию заряда. Проведенное исследование показывает, что накопления не требуется, одиночный выброс вещества в зону пламени способен вызвать целую серию процессов, приводящих к взрыву.

Поступила в редакцию
1/XI 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев. Сб. «Теория взрывчатых веществ», Оборонгиз, 1963.
2. В. К. Боболев, Л. Ф. Чекирда, С. В. Чуйко, ПМТФ, 1963, 4.
3. К. К. Андреев, В. В. Горбунов, ЖФХ, 1963, 37, 9.
4. А. Д. Марголин. Докл. АН СССР, 1961, 140, 4.
5. К. К. Андреев, С. В. Чуйко. ЖФХ, 1963, 37, 6.
6. Ф. Боуден, А. Иоффе. Быстрые реакции в твердых веществах, ИЛ, 1962.