

УДК 662.215.2

КРИТИЧЕСКИЙ ДИАМЕТР И СПИНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ЛИТЫХ И ЖИДКИХ ВВ

Г. Д. Козак

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
125190 Москва

Приводятся результаты экспериментального измерения критического диаметра детонации $d_{кр}$ литых зарядов тротил — гексоген, тротил — пикрат калия, тротил — тэн и жидких растворов динитротолуола в биснитроэтилнитрамине. Полученные данные сопоставляются с результатами проведенных ранее работ по исследованию спиновых детонационных волн в рассматриваемых системах. Как для литых зарядов на основе тротила, так и для жидких смесей на зависимости критического диаметра от состава зарегистрированы области содержания компонентов, в которых $d_{кр}$ остается неизменным. Эти области совпадают с диапазонами содержания сенсбилизатора в смесях, в которых наблюдаются спиновые явления. Результаты экспериментов подтверждают сделанный ранее вывод о том, что спиновые волны способствуют распространению основного детонационного процесса в литых системах и препятствуют детонации жидких ВВ.

Критический диаметр детонации — одна из важнейших характеристик взрывчатого вещества (ВВ), которая определяет его детонационную способность. С точки зрения практики его величина определяет возможность применения данного ВВ в каждом конкретном случае и является одной из характеристик взрывобезопасности. Последнему вопросу, в частности, посвящены работы [1–3]. С другой стороны, измерение критического диаметра детонации $d_{кр}$ позволяет составить суждение о кинетике процессов, протекающих при высокой температуре и сверхвысоком давлении. Примеры такого подхода продемонстрированы в работах [1, 2, 4].

В [5, 6] описано явление спиновой детонации в литых зарядах составов тротил — гексоген (ТГ), тротил — пикрат калия (ТПК) и тротил — тэн (ТТ). В [7] рассмотрены жидкие ВВ — нитрометан и растворы динитротолуола в биснитроксиэтилнитрамине (дина) — составы БД.

Спиновая детонация наблюдается в зарядах, диаметр которых несколько превышает критический, и заключается в последовательном распространении по боковой поверхности волн затухания химической реакции, ее возобновления и пересжатой детонации. Если комплекс этих волн носит устойчивый характер, на фоторегистрограммах отмечаются пульсации свечения, а на пластинах-свидетелях четкие поперечные бороздки-углубления, расположенные под некоторым углом к оси заряда. Наиболее полно в этом отношении исследованы заряды ТГ [6], спиновые явления четко регистрировались при содержании 12,5–15 % гексогена в смеси,

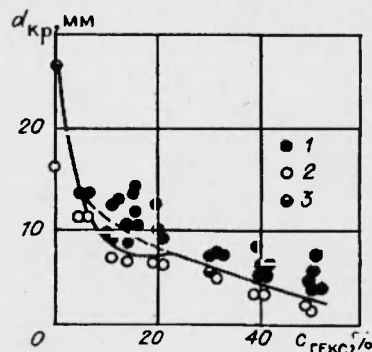


Рис. 1. Влияние содержания гексогена на $d_{кр}$ литых зарядов ТГ:

1 — детонация; 2 — отказ;
3 — затухание детонации.

когда нарушается плавный ход зависимости (рис. 1) критического диаметра литого ТГ от состава $d_{кр}(c)$. Для литых зарядов ТГ и ТПК и жидких БД эта зависимость не исследовалась. В настоящей работе эти экспериментальные данные получены и сопоставляются с результатами [6, 11] по

исследованию спиновой детонации.

Опыты проводили, применяя для приготовления составов тротил, динитротолуол, гексоген и дину заводского изготовления. Тэн получали этерификацией пентаэритрита концентрированной (97–99 %) азотной кислотой с последующей стабилизацией [8]. Средний размер частиц тэна и гексогена составлял 30–80 мкм. Пикрат калия синтезировали из реактивной пикриновой кислоты лабораторным способом, дозируя к ее суспензии раствор карбоната калия при температуре 60–70°C. Дозировку прекращали по окончании газовыделения и достижения $pH=7\div 8$. После промывки и сушки до постоянного веса пикрат калия просеивали через сито с размером ячеек 200 мкм, средний размер частиц, определенный по газопроницаемости, составлял 20–30 мкм.

Компоненты взрывчатых смесей взвешивали с точностью 0,01 г, помещали в стеклянный стакан, обогреваемый кипящей водой, и после расплавления плавящихся компонентов (тротил, динитротолуол, дина) тщательно перемешивали. Литые заряды получали, заливая расплав в бумажные или предварительно нагретые до 90°C стеклянные трубки-изложницы, закрытые снизу пробками. Кристаллизация расплава происходила на воздухе. Специального предотвращения осаждения твердой фазы при заливке не проводили, поскольку значительная часть заряда диаметром ~ 10 мм кристаллизуется за ~ 1 мин. Заряды меньшего диаметра за это время кристаллизуются практически полностью. Заметной седиментации твердой фазы за это время не наблюдалось, разноплотности зарядов по высоте не отмечено. Измерение $d_{кр}$ составов ТГ, приготовленных на мелкодисперсном (~ 5 мкм) и заводском (30–80 мкм) гексогене при одинаковом содержании этих продуктов в смеси, давало одинаковый результат. Ввиду того, что скорость осаждения по закону Стокса пропорциональна квадрату размера опускающихся частиц, можно полагать, что седиментация в процессе кристаллизации зарядов умеренного диаметра существенной роли не играет.

После охлаждения заряд извлекали из оболочки, удаляя усадочную раковину и обрабатывали его торцы на мелкой наждачной бумаге. Для определения плотности заряды взвешивали с точностью 0,01 г и измеряли линейные размеры с точностью 0,1 мм. Измеренную плотность сравнивали с результатом ее расчета по аддитивности удельных объемов, и если измерение плотности указывало на наличие воздушных включений, такие заряды отбраковывали. Длина зарядов составляла не менее 10 диаметров.

Критический диаметр детонации литых зарядов определяли при комнатной температуре без оболочки методом последовательных взрывов (да — нет) [6].

В ряде опытов проводили фоторегистрацию процесса с помощью прибора СФР-2 или ВФУ-1 для определения скорости детонации и получения картины спиновых пульсаций. Пульсации, в случае их наличия, фиксировались также и на пластине-свидетеле. Лучшим материалом для этого, по результатам опытов, оказались медь и латунь, на стальных пластинах пульсации регистрировались менее четко. Если заряд был вплотную прижат к пластине, след спиновой детонации представлял собой своеобразную «елочку», ветви (наклонные бороздки-углубления) которой отходили от ствола (гладкой вмятины, оставленной основным детонационным процессом). При расположении заряда на некотором расстоянии от пластины-свидетеля на ней фиксировались параллельные бороздки-углубления, расположенные наклонно к оси заряда. Примеры получающихся фоторегистрограмм и отпечатков на пластинах-свидетелях приведены в [6].

С жидкими смесями БД опыты проводили в трубочках, склеенных из кальки в один слой с помощью резинового клея. Дном служила резиновая пробка [7].

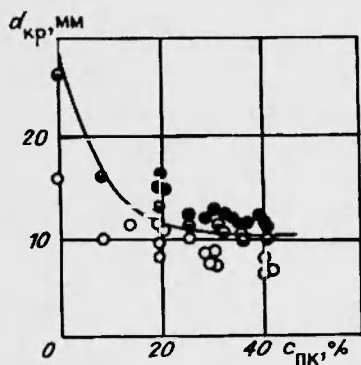


Рис. 2. Влияние содержания пикрата калия на $d_{кр}$ литой смеси тротил — пикрат калия (обозначения аналогичны рис. 1).

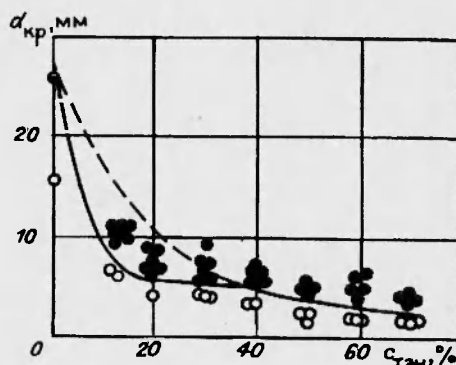


Рис. 3. Влияние содержания тэна на $d_{кр}$ литых зарядов тротил — тэн (обозначения аналогичны рис. 1).

Критический диаметр детонации литых систем существенным образом зависит от способа изготовления заряда. Так чистый тротил по [9] в зависимости от типа отливок имеет $d_{кр} = 16 \div 28$ мм. По условиям изготовления наши заряды близки ко второму типу отливок [9]. При испытании литого заряда тротила диаметром 25,3 мм детонация затухала. Учитывая эти факты, для чистого тротила можно ориентироваться на $d_{кр} = 25 \div 30$ мм. Изменение детонационной способности составов ТГ, ТПК и ТТ в зависимости от содержания сенсibilизатора с показано соответственно на рис. 1–3. Определение $d_{кр}$ составов ТГ при содержании гексогена, кратном десяти, проведено автором около тридцати лет назад в основном методом телескопических зарядов. Между точками, отвечающими содержанию 10 и 20 % гексогена в смеси, тогда предполагалось плавное изменение $d_{кр}$ (это показано на рис. 1 штриховой линией). В настоящей работе проведены опыты при 12,5 и 15 % и повторно при 20, 30 и 50 % гексогена в смеси. Результат последних трех серий опытов полностью совпал с прежним, тогда как более подробное исследование в диапазоне 10–20 % гексогена показало, что штриховая кривая существенно завышает значение $d_{кр}$ (здесь на кривой появляется площадка): $d_{кр}$ не зависит от содержания гексогена в составе. Именно в этой области наиболее четко проявляется спиновый эффект [6].

Для состава ТПК спиновый эффект наиболее четко регистрировался при содержании пикрата калия в смеси в количестве 40, 35 и 30 % [5]. Опыты по определению $d_{кр}$ проводили именно для этих смесей. При содержании более 40 % пикрата калия смесь теряла текучесть и получить заряды не удалось. Результаты опытов представлены на рис. 2. Несмотря на то что во всем диапазоне содержаний компонентов опыты не проведены, можно заметить, что при 20–40 % пикрата калия $d_{кр}$ не зависит от его содержания в смеси.

Закономерности спиновой детонации в зарядах ТТ исследовали только при содержании 13 % тэна в смеси, поскольку по данным [10] — это предельное количество тэна, растворяющегося в тротиле. В отличие от ТГ и ТПК в этом случае получается не суспензия, а истинный раствор. Для этого состава в [11] изучено влияние условий изготовления зарядов, определяющих их структуру, на характер пульсаций при спиновой детонации. Пульсации свечения и четкие следы спиновых волн на пластине-свидетеле регистрировались при режимах кристаллизации отливок, когда температура среды T , охлаждающей изложницу, была больше 5°C . При охлажде-

нии изложниц с расплавом раствором поваренной соли в воде, имеющим температуру -1°C и ниже, пульсации при детонации исчезали.

Заряды ТТ для определения зависимости $d_{кр}(c)$ готовили при режиме охлаждения ($T = 18 \div 20^{\circ}\text{C}$), когда пульсации спиновой детонации литых зарядов состава ТТ-13 хорошо регистрируются: расстояние между бороздками h , оставляемыми на пластине-свидетеле, в среднем равнялось 2 мм, что при скорости детонации $D \approx 7,2$ км/с соответствует частоте $f = D/h \approx 3,6$ МГц. Результаты измерения критических диаметров составов ТТ приведены на рис. 3. Спиновых явлений при детонации зарядов, содержащих 30–70 % тэна, не замечено. Видно, что при $c_{тэна} > 30$ % наблюдается плавное падение $d_{кр}$. Интерполяция этой зависимости в сторону меньшего содержания тэна в предположении плавного характера кривой показана на рис. 3 штриховой линией. Однако в действительности точки для составов ТТ при $c = 13 \div 20$ % лежат ниже этой кривой, а в области $c = 20 \div 30$ % тэна наблюдается отсутствие зависимости $d_{кр}(c)$, т. е. получается такая же картина, как и в случае ТГ и ТПК.

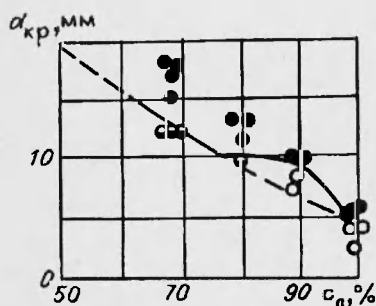


Рис. 4. Критический диаметр жидких смесей динитротолуола (обозначения аналогичны рис. 1).

Результаты измерения зависимости $d_{кр}(c)$ для жидких смесей БД приведены на рис. 4. Отличие этих смесей от ВВ на основе тротила состоит в том, что составы, для которых наблюдается спиновая детонация, содержат сенсibilизаторы — дины гораздо больше, чем сенсibilизирующего вещества динитротолуола (90–70 % дины, соответственно смеси БД-90 и БД-70).

В опытах с чистой расплавленной диной отмечен стационарный детонационный процесс. При диаметре заряда 13 мм скорость в среднем $D = 7,33 \pm 0,05$ км/с (расчет по [12] дает при плотности $1,495$ г/см³ $D = 7,59$ км/с). На торцевой развертке нет темных зон отсутствия реакции, не фиксируются и пульсации свечения вблизи боковой поверхности, характерные для спиновой детонации, отпечаток следа на пластине-свидетеле гладкий, следы, оставляемые спиновыми волнами, отсутствуют.

Критический диаметр детонации состава, содержащего 90 % дины, вдвое превышает $d_{кр}$ чистой дины. Дальнейшее уменьшение ее содержания в смеси до 80 % вначале приостанавливает рост $d_{кр}$, а затем (70 %) возобновляет его. На этом участке зависимости $d_{кр}(c)$ на торцевых фоторегистрограммах имеются темные зоны отсутствия реакции, пульсации свечения вблизи боковой поверхности заряда, а на пластине-свидетеле регистрируются отпечатки, характерные для спиновой детонации. Подробное рассмотрение этих явлений, проведенное в [7] на примере смеси БД-70, привело к заключению, что возникновение темных зон отсутствия реакции есть следствие распространения спиновой детонационной волны. Иными словами, в случае жидких ВВ образование спиновых детонационных волн приводит к затуханию детонации.

Сопоставим результаты, полученные для литых и жидких систем. Так же как и для литых зарядов на основе тротила, диапазон содержания компонентов жидких смесей БД, где регистрируются спиновые детонационные явления, совпадает с областью, в которой наблюдается характерная полка на зависимости $d_{кр}(c)$ и в этом, казалось бы, проявляется их сходство. Однако оно чисто внешнее. При сравнении рис. 1–3 с рис. 4 видно, что штриховые линии на рис. 1 и 3, проведенные в предположении монотонности первой производной функции $d_{кр}(c)$, для ТГ и ТТ лежат выше

экспериментальных точек, а на рис. 4 ниже их. Иначе говоря, вывод о том, что спиновые детонационные волны облегчают распространение основного детонационного процесса литых систем и препятствуют детонации жидких, находит здесь прямое экспериментальное подтверждение.

Автор искренне благодарен А. Б. Савкину, В. Б. Обломскому, М. Ю. Елисеенкову, принимавшим участие в проведении экспериментов, а также Б. Н. Кондрикову за ценные замечания при обсуждении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газемо В. Н., Козак Г. Д., Кондриков Б. Н., Хорошев С. М. Детонация смесей ароматических соединений с олеумом // Взрывчатые материалы и пиротехника. 1992. Вып. 3(128).
2. Козак Г. Д., Хорошев С. М., Кондриков Б. Н., Анников В. Э. Детонация азрированных систем на основе тротила и динитротолуола // Взрывчатые материалы и пиротехника. 1992. Вып. 3(128).
3. Кондриков Б. Н., Козак Г. Д., Райкова В. М. и др. Взрывоопасность некоторых жидких нитросоединений // Хим. пром. 1990. № 5.
4. Газемо В. Н., Козак Г. Д., Кондриков Б. Н., Хорошев С. Н. Кинетика химических реакций при детонации смесей нитрометана с серной кислотой // Детонация: Матер. IX Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву, Суздаль, 1989. Черногоровка: ОИХФ АН СССР, 1989.
5. Козак Г. Д., Кондратьев В. В., Кондриков Б. Н., Савкин А. В. Распространение детонации в тонком слое взрывоопасного вещества // I Всесоюз. симпоз. по макроскопической кинетике и химической газодинамике, Алма-Ата, 1984: Тез. докл. Черногоровка: ОИХФ АН СССР, 1984. Т. 1, ч. 2.
6. Козак Г. Д., Кондриков Б. Н., Обломский В. Б. Спиновая детонация в твердых веществах // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 4. С. 86-93.
7. Козак Г. Д., Кондриков Б. Н., Обломский В. Б. Спиновая волна и затухание детонации жидких ВВ // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 2. С. 93-98.
8. Орлова Е. Ю. и др. Руководство к лабораторному практикуму по получению нитросоединений. М.: МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1969.
9. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С. и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
10. Орлова Е. Ю. Химия и технология бризантных ВВ. Л.: Химия, 1973.
11. Габдуллина А. Р., Козак Г. Д., Кондриков Б. Н., Обломский В. Б. Влияние структуры заряда на спиновые явления при детонации пентолита // Детонация: X Симпоз. по горению и взрыву: Тез. докл. Черногоровка, 1992. С. 36.
12. Кондриков Б. Н., Сумин А. И. Уравнение состояния газов при высоком давлении // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23. № 1. С. 114-122.

Поступила в редакцию 6/V 1994 г.,
в окончательном варианте — 5/IX 1994 г.