

25. А. Н. Дремин, О. К. Розанов. Изв. АН СССР, сер. хим., 1964, 8, 1513.
26. A. N. Dremín, O. K. Rozanov, V. S. Trofimov. Comb. and Flame, 1963, 7, 153.
27. В. С. Трофимов, А. Н. Дремин. ФГВ, 1966, 2, 3, 19.
28. Р. И. Солоухин. Ударные волны и детонация в газах. М., Физматгиз, 1963.
29. Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин. Докл. АН СССР, 1959, 125, 1, 110.
30. R. A. Strehlow. Comb. and Flame, 1968, 12, 2, 81.
31. А. А. Васильев, Ю. А. Николаев. ФГВ, 1976, 12, 5, 744.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ
СИЛЬНОРАЗБАВЛЕННЫХ ПОРИСТЫХ ВВ.
I. ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНОЙ ДОБАВКИ
НА ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ**

*К. К. Шведов, А. И. Анискин, А. Н. Ильин,
А. П. Дремин
(Черноголовка)*

Изучение процессов детонации пористых ВВ с добавками представляет большой интерес для развития теории и практического использования энергии взрыва. Введение в ВВ различных добавок дает возможность регулировать энергетику и параметры детонации, критический диаметр и чувствительность к инициирующему импульсу. Управление этими характеристиками и их предсказание невозможно без детального изучения поведения добавок в детонационной волне, которое до настоящего времени недостаточно ясно. В [1] отмечалось, что при детонации сильноразбавленных пористых ВВ наблюдаются некоторые особенности, носящие не только количественный, но и качественный характер и затрагивающие важнейшие стороны теории детонации.

Данная серия работ является продолжением начатых в [1, 2] исследований детонации пористых ВВ с инертными добавками. В ней сделана попытка проследить влияние инертных добавок на критический диаметр, зависимость параметров детонации от диаметра заряда, структуру детонационной волны, время реакции, а также рассмотреть вопрос о расчете параметров детонации смесей ВВ с инертной добавкой.

**Влияние добавки
на критические условия распространения детонации
в смесях на основе тротила и гексогена**

При определении критического диаметра (слоя) и критических параметров стационарность процесса детонации устанавливалась по отпечаткам на пластине-свидетеле или измерениями параметров детонации на зарядах различной длины. Длина зарядов достигала 40 калибров, что позволило обнаруживать затухание детонации, которое иногда не заметно на коротких (5—10 калибров) зарядах. В этих опытах отмечено влияние металлической подложки на стационарность процесса детонации и критический диаметр. Так, наличие стальной подложки толщиной 2—6 мм в слоевых зарядах ТНТ — NaCl заметно снижало $\Delta_{кр}$ в смесях с содержанием NaCl до 50%, а при 75% NaCl влияние подложки не отмечалось: в слоях с $\Delta = 20$ мм детонация затухает, а при $\Delta = 25$ мм она распространяется устойчиво независимо от наличия или отсутствия подложки. В смесях гексогена с 85% NaCl стальная подложка толщиной 4 мм снижает $d_{кр}$ приблизительно на 5 мм (в слоях с $\Delta = 20$ мм без подложки детонация затухает, а с подложкой распространяется устойчиво). Полученные результаты показывают, что степень влияния подложки

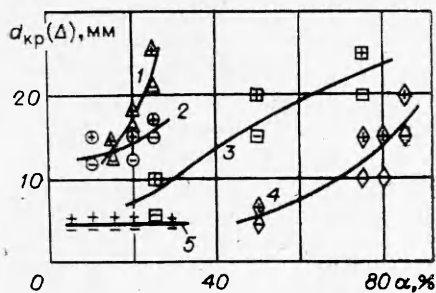


Рис. 1. Зависимость $d_{кр}$ от процентного содержания добавок в смесях:

1 — ТНТ-тальк (данные Л. Н. Стесика); 2 — ТНТ-парафин [3]; 3 — ТНТ-NaCl, слой-вой заряд; 4 — гексоген — NaCl, цилиндрический заряд; 5 — гексоген — парафин [3].

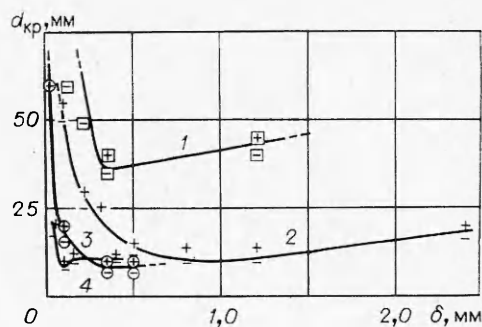


Рис. 2. Зависимость критического диаметра от размера частиц добавки.

1 — гексоген+75% B_2O_3 ; 2 — гексоген+75% NaCl; 3 — гексоген+75% Al_2O_3 ; 4 — ТНТ+25% SiC.

в слоевых зарядах или оболочки в цилиндрических зависит не только от природы ВВ, но и от процентного содержания добавки α и уменьшается по мере ее роста.

Влияние процентного содержания NaCl с размером частиц 0,1—0,5 мм на критический диаметр (слой) детонации в смесях с тротилом и гексогеном в зарядах насыпной плотности показано на рис. 1. Общей закономерностью, как видно из рис. 1, является постоянство критического размера заряда с увеличением α до определенного состава, а затем — существенный рост. Для смесей ТНТ — NaCl заметный рост $\Delta_{кр}$ наблюдается при $\alpha > 25$, а для смесей гексоген — NaCl при $\alpha > 50$. В смесях тротила с парафином и тальком критический диаметр заметно увеличивается при меньших α , чем для смесей с NaCl. Абсолютная величина критического размера заряда смесей с NaCl при $\alpha \leq 25$ оказывается ниже, чем для смесей с парафином и тальком, и близка к значению для чистого ВВ без добавки. Аналогично в смесях гексогена с парафином и NaCl при $\alpha \leq 50$ критический диаметр остается на уровне индивидуального ВВ. Наблюдаемый вид зависимости критического размера заряда от процентного содержания добавки, исходя из соображений [4], может быть связан с одновременным влиянием нескольких факторов. В основном инертные добавки могут оказывать влияние на процессы детонации и критический диаметр следующими путями: увеличение или сокращение числа «горячих точек» и времени реакции; изменение уравнения состояния и инерционности среды (тяжелая добавка препятствует разлету продуктов); как источник потерь энергии ВВ (сжатие, разгон, прогрев и испарение добавки). Возникает вопрос о том, какие из этих факторов являются определяющими.

Если разбавитель действует, в основном как внутренняя оболочка, то замена его на более тяжелый должна бы приводить к снижению критического размера заряда. Однако замена NaCl ($\rho = 2,16 \text{ г/см}^3$) на $BaSO_4$ ($\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$) в смесях с тротилом (75/25) показала затухание детонации в слоях толщиной 60 мм. Сильное увеличение $\Delta_{кр}$ в этих опытах, вероятно, связано с уменьшением размеров зерна добавки. Размер исходных частиц $BaSO_4$ составлял $\leq 0,2$ мм. Для следующей серии экспериментов применявшаяся поваренная соль марки «Экстра» (исходное зерно 0,5—1,0 мм) была перетерта до размеров зерна, близких к $BaSO_4$. Опыты на тротиле с 75% NaCl этой партии показали затухание детонации в слое 30 мм. Таким образом, при близких размерах частиц роль удельного веса не является определяющей. Сильное влияние размеров частиц добавки на критический размер заряда указывает на ее явное участие либо в создании «горячих точек», либо в поглощении энергии ВВ.

Чтобы разделить эти две возможности, рассмотрим более подробно влияние дисперсности и природы добавки на критический диаметр в зарядах насыпной плотности (рис. 2). Данные для тротила получены при содержании SiC 25%, что соответствует приблизительно минимуму кривой $\Delta_{кр}(\alpha)$ в смесях с NaCl. Результаты по смесям гексогена получены в области роста зависимости $d_{кр}(\alpha)$ ($\alpha = 75\%$). Из рис. 2 видно, что в обоих случаях вид кривых $d_{кр}(\delta)$ подобен. Он характеризуется наличием минимума при некотором характерном размере зерна δ^* . При $\delta < \delta^*$ наблюдается сильный рост $d_{кр}$, а при $\delta > \delta^*$ критический размер заряда постоянен или незначительно возрастает. Подобная кривая получена в работе [5] для смесей NaCl с мелкодисперсным ($\delta \approx 4$ мкм) гексогеном (85/15). Использование добавок с различными свойствами не приводит к качественному отличию в зависимости $d_{кр}(\delta)$ в пористых ВВ, а влияет лишь на численные значения $d_{кр}$.

Наличие минимума на зависимостях $d_{кр}(\alpha)$ и $d_{кр}(\delta)$ имеет некоторую аналогию с жидкими ВВ, подробные исследования которых проведены в [6]. Так, в нитрометане резко (в несколько раз) снижается $d_{кр}$ при увеличении α до 20–30%, появляется достаточно широкое плато при $\alpha = 30 - 60\%$ и сильно растет $d_{кр}$ при дальнейшем увеличении α . Значительно снижается $d_{кр}$ также при введении небольших количеств инертных добавок и в твердых сплошных ВВ [7]. Снижение $d_{кр}$ объясняется увеличением числа очагов и сокращением времени реакции, а рост при большом α — потерями энергии на добавку. В жидких ВВ также наблюдается минимум на зависимости $d_{кр}(\delta)$ при фиксированном α . Наличие его связывается с критическими размерами очагов [8].

Кажется, что с этих позиций можно объяснить наблюдаемые зависимости $d_{кр}(\alpha)$ и $d_{кр}(\delta)$ в пористых ВВ с добавками. Однако нужно отметить следующее. В пористых системах даже при оптимальных α и δ добавка критического диаметра (слой) в основном остается на уровне индивидуального ВВ или растет. Поэтому естественно в первом приближении предположить, что первоначальное число очагов реакции достаточно велико и роль добавки в их создании несущественна. Это, конечно, не отрицает возможности в некоторых случаях и специфического влияния добавки непосредственно на процессы иницирования реакции и в пористых ВВ. Но названные эффекты трудно обнаружить на основе измерений только критического диаметра и необходимы прямые данные по времени разложения.

В [2] отмечалось, что в смесях ТНТ — NaCl при увеличении процентного содержания NaCl с 25 до 75% (см. рис. 1) толщина критического слоя детонации возрастает в 3 раза, но время реакции, определенное по химпику в идеальных режимах детонации, увеличивается мало, несмотря на уменьшение приблизительно в 3 раза давления детонации. Однако в области оптимальных α (10–30%) время реакции смесей ТНТ — NaCl не отличается от времени реакции индивидуального пористого порошка при одинаковом давлении, что свидетельствует в пользу выказанного предположения. На это же указывает, видимо, и то, что критические диаметры в смесях тротила с тальком и парафином при $\alpha < 20\%$ (см. рис. 1, 2) близки между собой и мало отличаются от критического диаметра индивидуального ВВ, хотя, как известно, добавление 10–20% талька при испытаниях к удару на копке увеличивает чувствительность тротила в несколько раз, а парафин является хорошим флегматизатором [9].

При $\alpha > 20$ влияние талька и парафина на $d_{кр}$ качественно противоположно тому, которое можно было ожидать по аналогии с данными копровых испытаний. Незаметна флегматизирующая роль парафина и в пористых системах с гексогеном. Критический диаметр при увеличении процентного содержания парафина от 5 до 28% остается на уровне индивидуального ВВ и совпадает с данными для NaCl. В смесях NaCl с тро-

тилом $d_{кр}$ ниже, чем в смесях с тальком и парафином, по также близок к чистому тротилу. В смесях с тротилом вместо NaCl использовался также карбид кремния (более твердая и тугоплавкая добавка). Однако и в этом случае заметно снизить критический диаметр по сравнению с индивидуальным ВВ не удалось. При оптимальном размере зерна δ^* он оказался близок к значению для NaCl (см. рис. 1).

Более определенно влияние индивидуальных свойств добавок можно проследить в сильно разбавленных смесях с гексогеном (рис. 2, 1—3). При оптимальном размере частиц добавки и равном массовом содержании ее в смеси наблюдается корреляция критического диаметра с температурой плавления добавки. Добавкам с низкой температурой плавления соответствует большой критический диаметр. Так, в смесях гексогена с 75% V_2O_5 ($T_{пл} = 450^\circ C$) критический диаметр составляет около 40 мм, а в смесях с SiC, Al_2O_3 ($T_{пл} = 2700, 2015^\circ C$) он уменьшается до 8 мм. Данные по NaCl занимают промежуточное положение. Использование в качестве добавки частиц сплава церезин — канифоль 15/85 ($T_{пл} = 70^\circ C$, $\delta = 2,5$ мм) приводило к затуханию детонации в зарядах с $d = 80$ мм. Поскольку температура плавления V_2O_5 выше температуры плавления и вспышки ВВ, то в смысле создания очагов реакции эту добавку можно рассматривать как сенсibilизатор. Поэтому увеличение $d_{кр}$ по сравнению с твердыми и тугоплавкими добавками при оптимальном размере частиц связано, видимо, с потерями на прогрев и плавление добавки. Оценки показывают, что на плавлении V_2O_5 расходуется приблизительно в 2 раза больше тепла, чем на NaCl при одинаковой глубине прогрева.

При прочих равных условиях потери на прогрев зависят от площади поверхности. При изменении размеров частиц добавки их поверхность в единице объема смеси меняется как $1/\delta$. Качественно кривая $d_{кр}(\delta)$ похожа на эту зависимость в области $\delta > \delta^*$ (см. рис. 2). В области $\delta > \delta^*$ поверхность слабо уменьшается, а $d_{кр}$ слабо растет. Это кажущееся противоречие объясняется тем, что при $\delta > \delta^*$ потери на прогрев малы по сравнению с теплотой взрывчатого превращения ВВ, и этот фактор практически перестает работать, при этом критический диаметр должен оставаться постоянным. Незначительный рост его связан, видимо, со слабым увеличением плотности смеси, которое в настоящих опытах имело место при увеличении размеров частиц добавки. Таким образом, из приведенных данных и соображений следует, что характерный размер частиц δ^* , при котором критический диаметр минимален, определяется главным образом условиями отсутствия тепловых потерь на добавку. Этот вывод подтверждается данными по зависимости скорости детонации от размера частиц добавки в сильно разбавленных смесях.

Влияние процентного содержания, природы и дисперсности добавки на скорость детонации в зарядах различного диаметра

Само существование и вид зависимости скорости детонации от диаметра заряда в конденсированных ВВ отражает суть физико-химических процессов, происходящих в зоне реакции, и дает полезную информацию для развития соображений о механизме превращения вещества. Наиболее типичным для несплошных твердых ВВ (литые, прессованные, насыпные заряды) является плавный рост скорости детонации с увеличением диаметра заряда и выход на плато. В некоторых случаях обнаружены S-образные и скачкообразные зависимости скорости детонации от диаметра заряда. Как правило, S-образные зависимости $D(d)$ наблюдаются в смесях ВВ и объясняются различным временем реакции компонентов смеси [10, 11]. Скачки скорости детонации на 350—500 м/с при незначительном изменении диаметра заряда в некоторых смесях гексогена с парафином и тальком связывались в работах [3, 11] с качественным изменением процесса разложения ВВ — переходом от горения с поверхности

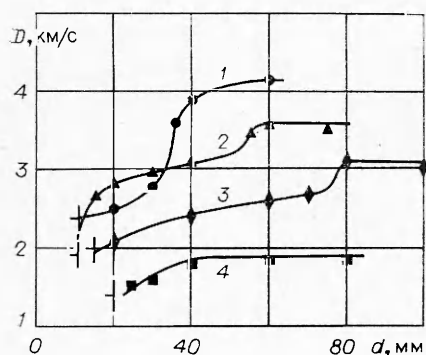


Рис. 3. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда в смесях тротила с добавками. 1 — 25% SiC; 2 — 25% NaCl; 3 — 50% NaCl; 4 — 70% NaCl; знаками \rightarrow отмечен диаметр заряда, при котором детонация затухает для каждой кривой.

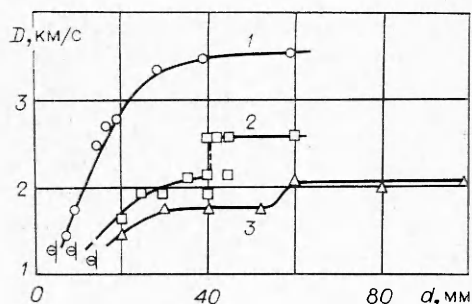


Рис. 4. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда в смесях гексогена с добавками. 1 — 80% Ba(NO₃)₂; 2 — 80% NaCl; 3 — 85% NaCl; знаками \rightarrow отмечен диаметр заряда, при котором детонация затухает для каждой кривой.

к гомогенной реакции в объеме. Типичный пример скачкообразной зависимости $D(d)$ — переход режима нормальной детонации в низкоскоростную в узком интервале изменения диаметра заряда. При этом для пористых зарядов тротила, гексогена, тэна, тетрила насыпной плотности скорость детонации скачком уменьшается приблизительно с 4 до 2 км/с [12, 13]. В пористых системах с инертной добавкой на основе одного и того же ВВ в зависимости от процентного содержания, природы и дисперсности добавки реализуются все перечисленные типы зависимостей $D(d)$. Это указывает, с одной стороны, на сложность физико-химических процессов в зоне реакции смесевых систем, а с другой — на некоторую аналогию с индивидуальными ВВ.

На рис. 3 показано влияние процентного содержания и природы добавки на скорость детонации в смесях с тротилом. В смесях с SiC зависимость $D(d)$ имеет S-образный вид, в смесях с NaCl ($\alpha = 25$ и 50%) она ближе к скачкообразной зависимости. С увеличением α амплитуда скачка и минимальная скорость, при которой он наблюдается, уменьшаются и растет диаметр заряда. В смеси с 75% NaCl в исследованном диапазоне диаметров заряда скачков не отмечается. Подобные зависимости $D(d)$ наблюдаются в смесях NaCl с гексогеном (рис. 4). При $\alpha = 80\%$ и $d \approx 40$ мм наблюдается явно выраженный скачок скорости детонации на 400 м/с, который едва заметен в смеси с $\alpha = 85\%$. В смеси гексоген — Ba(NO₃)₂ 20/80 зависимость $D(d)$ имеет плавный вид с выходом на плато. При этом максимальное значение $D = 3,6$ км/с на 1 км/с превышает скорость детонации смеси с NaCl того же состава, что, возможно, связано с разложением Ba(NO₃)₂ и дополнительным вкладом за счет этого в тепловыделение до поверхности Чепмена — Жуге.

В исследованных смесях использовались полидисперсные добавки с размером частиц больше и меньше характерного размера δ^* кривой $d(\delta)$, за исключением Ba(NO₃)₂. В таблице приведен фракционный состав (в %) NaCl (х. ч., ГОСТ 4233—66) до и после смешения с гексогеном в течение 20 мин на рольбангах. Видно, что при смешивании происходит дробление частиц и существенно увеличивается доля мелких фракций. При обсуждении данных по зависимости $d_{кр}(\delta)$ отмечалось, что характерный для смесей с гексогеном размер частиц NaCl $\delta^* \approx 0,4$ мм. Основная масса смеси имеет размеры боль-

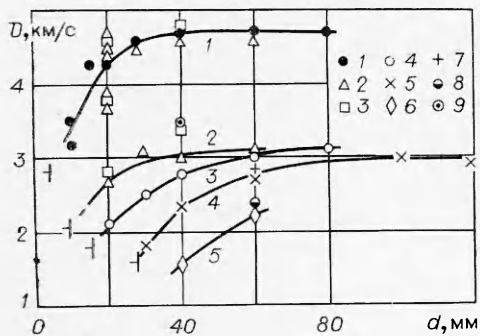


Рис. 5. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда в смесях гексоген-добавка.

1 — Al_2O_3 , $\delta=0,5$ мм; 2 — NaCl , $\delta=0,5$; 3 — NaCl , $\delta=1,2$; 4 — Al_2O_3 , $\delta=0,12$; 5 — SiC , $\delta=0,12$; 6 — NaCl , $\delta \leq 0,2$; 7 — B_2O_3 , $\delta=1,4$; 8 — B_2O_3 , $\delta=0,35$; 9 — смесь Al_2O_3 ($\delta=0,5$) и Al_2O_3 ($\delta=0,12$ мм) 50/50.

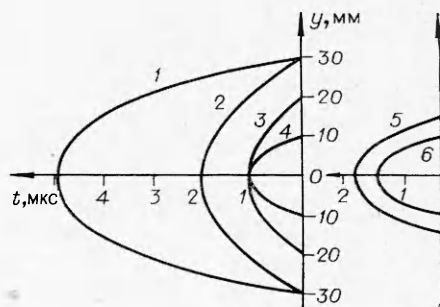


Рис. 6. Кривые запаздывания по времени периферийных участков детонационного фронта при различных размерах заряда.

1 — гексоген — NaCl 15/85; 2—4 — гексоген — $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 20/80, цилиндрические заряды; 5 — TNT-NaCl 25/75; 6 — аммонит 67RB — $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 50/50, слоистые заряды.

ше и меньше характерного, поэтому для выяснения влияния размеров частиц на вид $D(d)$ в сильно разбавленных смесях выбраны фракции с размером частиц выше ($\delta > 0,5$ мм) и ниже ($\delta \leq 0,2$ мм) характерного.

Наиболее подробно исследовались смеси гексогена с Al_2O_3 ($\delta \approx 0,5$ и $0,1$ мм). На рис. 5 приведен график зависимости $D(d)$ для смесей гексогена с Al_2O_3 и другими добавками при постоянном массовом отношении ВВ — добавка 1 : 3. Видно, что в зависимости от размеров частиц Al_2O_3 реализуются два режима детонации, отличающиеся по D в 1,5—2 раза. Поскольку потенциальная химическая энергия зарядов с различной дисперсностью частиц Al_2O_3 одинакова, то этот результат наглядно показывает, что знания ее мало для однозначного предсказания параметров детонации. Различия в скоростях детонации наблюдаются в широком диапазоне изменения диаметров заряда (от критического до предельного) и не связаны с неидеальностью режимов детонации. Для каждого режима зависимость $D(d)$ имеет плавный вид, качественно подобный большинству индивидуальных пористых ВВ.

Данные по другим добавкам, как правило, близки к $D(d)$ для Al_2O_3 ($\delta \approx 0,1$ и $0,5$ мм). Некоторая особенность наблюдалась для смесей с NaCl ($\delta = 0,5$ и $1,2$ мм). Большинство значений D для этих смесей ложится на верхнюю кривую $D(d)$ для Al_2O_3 . Однако в ряде опытов средние данные из 2—4 опытов одной или различных серий с разбросом $\pm 3\%$ получались близкими к нижней ветви зависимости $D(d)$ для Al_2O_3 ($\delta = 0,1$ мм), либо имели промежуточные значения (показаны отдельными точками на рис. 5). Разброс наблюдался при $d = 20—60$ мм, но чаще всего при $d = 20—30$ мм. По существу, это означает наличие скачков скорости детонации в некотором диапазоне диаметров заряда. Таким образом, в смесях с NaCl начальным размером частиц более $0,5$ мм при одном и том же диаметре заряда реализуются различные режимы детонации с максимальной скоростью детонации около $4,6$ км/с. Поскольку измерения D производились на конечной базе ($20—30$ мм), то эти результаты можно было трактовать как следствие закономерных пульсаций самого процесса детонации по мере распространения по заряду, возможность существования которого утверждается в [14] на основе записей профиля массовой скорости.

Попытка зарегистрировать периодические пульсации скорости по длине заряда непрерывной фоторегистрацией свечения в смесях гексогена с NaCl ($\delta = 0,5$ мм) не дала положительных результатов. В большинстве опытов наблюдалась постоянная скорость по всей длине заряда ($l \approx 10d$), а иногда отмечался резкий переход с одного режима на другой вблизи

инициатора. В комбинированных зарядах, состоящих частично из смеси гексогена с Al_2O_3 ($\delta = 0,5$ и $\delta = 0,1$ мм), одновременно наблюдаются отмеченные выше две скорости с резким переходом в месте контакта смесей с различной дисперсностью добавки.

На рис. 6 приведены данные по фотографической регистрации кривизны детонационного фронта в некоторых смесях. Видно, что фронт сильно искривлен, однако пульсаций поверхности также не обнаруживается. Отношение радиуса кривизны к радиусу заряда составило 3,5—4,5, что близко к индивидуальным ВВ [15]. По-видимому, разброс в значениях D для смесей с NaCl ($\delta > 0,5$ мм) связан не с периодическими пульсациями процесса детонации, а с различиями в исходном размере зерна из-за дробления частиц при смешении и подготовке зарядов вследствие малой прочности частиц NaCl . Очевидно незначительный перелом мог привести к снижению размеров частиц основной массы добавки ниже характерного δ^* , что и приводило к резкому снижению скорости детонации при данном диаметре заряда.

При размерах частиц основной массы добавки, несколько больших δ^* , к такому же эффекту приводит снижение диаметра заряда в некотором диапазоне, как и в опытах с полидисперсными частицами (см. рис. 3, 4). По этим же причинам, видимо, не удалось зафиксировать больших скоростей детонации в смесях гексогена с V_2O_5 , $\delta = 0,35$ мм. Скорость детонации в зарядах диаметром 60 мм оказалась близкой к таковой в смесях с мелкодисперсной добавкой. В любых рассматриваемых режимах детонации давление много больше пределов прочности частиц, поэтому они дробятся, что, казалось бы, должно приводить всегда к потерям. Однако при значительных начальных размерах частиц $\delta > \delta^*$ и малых временах разложения ВВ поверхность контакта продуктов за счет вновь образованной поверхности, видимо, существенно не увеличивается. Поэтому важна начальная поверхность, определяемая исходным размером частиц и пористостью заряда. При использовании в рассматриваемых смесях с гексогеном частиц NaCl ($\delta \leq 0,2$ мм, ниже δ^*), как и в смесях с другими мелкодисперсными добавками, стабильно получаются низкие скорости детонации (см. рис. 5, 6). При одинаковых диаметрах заряда абсолютное значение скорости детонации в этих смесях существенно ниже, чем в аналогичных смесях с Al_2O_3 или SiC , $\delta = 0,1$ мм. Вероятно, в этом случае заметную роль в теплотерях играет и вновь образованная поверхность. Помимо временных соотношений, возможно, важен и характер самого процесса разрушения частиц различных добавок во фронте детонационной волны, что может быть предметом самостоятельных исследований.

Таким образом, из приведенных данных следует некоторый общий вывод: наличие в смеси частиц добавки с широким спектром размеров (больше и меньше δ^* кривой $d_{кр}(\delta)$) приводит к S -образной зависимости $D(d)$. Сокращение дисперсии и близость размеров частиц добавки к δ^* дают скачок на зависимости $D(d)$, и, наконец, разграничение размеров частиц добавки (ниже и выше δ^*) приводит к двум ветвям зависимости $D(d)$ смеси с одинаковым массовым составом ВВ. Использование в той же смеси порошков Al_2O_3 с $\delta = 0,1$ и $0,5$ мм в весовом отношении 50/50 дает промежуточный по параметрам детонации режим.

Поскольку при изменении размера частиц добавки в смеси заданного состава структура его практически не меняется (остается большая пористость) и потери на сжатие и разгон добавки одинаковы, то наблюдаемые скачки на зависимости $D(d)$ или ее разделение на две ветви невозможно объяснить качественным изменением механизма разложения ВВ, как это предполагалось в работах [4, 12]. Об этом же свидетельствует и сравнение амплитуды ударной волны, при которой происходит скачок, с давлениями, необходимыми для гомогенного нагрева и разложения ВВ. Как показано в [16], характерное давление p^* , выше которого разложе-

ние твердых ВВ близко к гомогенному взрыву (велика концентрация очагов), существенно зависит от структуры заряда и составляет для пористых зарядов ($\rho_0 \approx 1,0 \text{ г/см}^3$) около 70 кбар ($D \approx 4,0 \text{ км/с}$). Скачки скорости детонации в смесях NaCl (см. рис. 3) наблюдаются при явно меньших параметрах в области одного и того же механизма разложения («горячие точки»). Анализ данных работ [3, 11] показывает, что наблюдавшиеся скачки скорости детонации в смесях гексоген — парафин и гексоген — тальк лежат в области высоких давлений ($D > 6,0 \text{ км/с}$), при которых следует ожидать разложения ВВ в форме, близкой к гомогенному взрыву. Не исключено, конечно, появление скачков скорости и скачков других параметров на зависимостях от диаметров заряда в области давлений, близких к p^* , где осуществляется переход от одного крайнего случая к другому.

Изложенное выше говорит о том, что в появлении скачков конкретный механизм разложения ВВ не является определяющим фактором. По-видимому причина их возникновения есть неустойчивость детонационного режима, связанная со сложной кинетикой физико-химических процессов в зоне реакции. Из теоретического анализа работы [17] следует, что при немонотонном выделении тепла (наряду с экзотермической реакцией разложения ВВ происходят эндотермические процессы) возможно существование нескольких режимов детонации в зарядах бесконечного диаметра как устойчивых, так и неустойчивых относительно перехода одного в другой. Степень влияния эндотермических процессов, связанных с наличием добавок в смеси, зависит от процентного содержания, дисперсности, теплофизических свойств добавок и диаметра заряда (уменьшение d качественно действует так же, как эндотермическая реакция, что приводит к многообразию кривых $D(d)$) (см. рис. 3—5).

При достаточно большом размере частиц добавки ($\delta > 0,5 \text{ мм}$ в смесях с гексогеном) процессы поглощения тепла за счет прогрева добавки незначительны, и наблюдается типичная для индивидуальных пористых ВВ плавная зависимость $D(d)$, обусловленная влиянием только боковых волн разрежения. При этом не только $D(d)$, но и критическая скорость детонации смеси близка к критической скорости детонации индивидуального пористого ВВ. Так, для зарядов тротила, гексогена и тэна ($\rho_0 = 0,9\text{—}1,0 \text{ г/см}^3$) она составляет для нормальных режимов детонации 3,5—4,0 км/с [12, 13]. В смесях гексогена с содержанием 75% Al_2O_3 критическая скорость детонации близка к 3,3 км/с. В данном случае уменьшение диаметра заряда вплоть до критического и связанное с этим снижение давления на фронте волны, а также увеличение времени разложения не в состоянии перевести режим детонации на нижнюю ветвь зависимости $D(d)$, характерную для смесей с мелкодисперсной ($\delta \approx 0,1 \text{ мм}$) добавкой. В смесях гексогена с мелкодисперсной добавкой даже в идеальных режимах детонации потери на прогрев значительны, и уменьшение диаметра заряда также не приводит к качественным особенностям зависимости $D(d)$ (плавная кривая). Отметим лишь, что критическая скорость детонации, как и в других смесях с мелкодисперсной добавкой, падает до 1,5—2 км/с. Это позволяет заключить, что в пористых зарядах близких структур она определяется суммарным тепловыделением в зоне реакции.

Оба рассматриваемых режима детонации в смесях гексогена с добавками Al_2O_3 дисперсностью 0,5 и 1,0 мм устойчивы к возмущениям, связанным с уменьшением диаметра заряда. Неустойчивость появляется в смесях с широким спектром размеров частиц добавки. Тесная связь этих размеров с δ^* кривой $d_{кр}(\delta)$ указывает на то, что при уменьшении диаметра заряда ниже некоторого малого возмущение газодинамических величин приводит к «включению» тепловых потерь (прогрев, фазовый переход и т. п.) на добавку. Причем влияние этого фактора оказывается гораздо сильнее, чем влияние диаметра заряда, его «породившего». В ре-

зультате потери устойчивости устанавливается новый режим с меньшими параметрами (в соответствии с суммарным тепловыделением). Для него уменьшение диаметра заряда в некотором диапазоне несущественно (низкие параметры, слабый разлет), что обуславливает наличие плато на зависимости $D(d)$ после скачка.

В рассматриваемых экспериментах неустойчивость детонационных режимов наблюдается при изменении только дисперсности добавки и диаметра заряда. Очевидно, соотношение между скоростями протекания экзотермических и эндотермических процессов можно изменять, влияя непосредственно на скорость разложения самого ВВ, например, изменяя размер его частиц при прочих равных условиях, как это имело место при сравнительно низких давлениях в смесях гексоген — тальк 50/50 в работе [11].

Кроме особенностей в виде зависимостей $D(d)$ необходимо отметить сокращение различия между $D_{кр}$ и $D_{ид}$ по мере роста содержания инертной добавки. Как видно на рис. 3, 4, соотношение $D_{кр}/D_{ид}$ достигает 0,8 в смесях с содержанием добавки 75—85%. И это, по-видимому, не предел. Формально по этому критерию по мере увеличения α происходит приближение к жидким и сплошным ВВ, хотя структура заряда остается сильно пористой. Возможно, одна из причин этого состоит в том, что во всех опытах использовалось ВВ с довольно мелким размером частиц (штатный гексоген, $\delta \approx 0,1$ мм; молотый тротил, $\delta < 0,2$ мм). Причем по мере увеличения α ВВ при смешивании могло дробиться до более мелких размеров, становясь однороднее по дисперсности в размерах частиц, что и приводит к увеличению $D_{кр}/D_{ид}$, как и в индивидуальных пористых ВВ с мелкодисперсными частицами. Кроме того, по мере увеличения α , возможно, начинают сказываться и специфические факторы (малая доля ВВ, увеличение инерционных свойств среды, непосредственное влияние добавки на механизм разложения ВВ), что также приводит к увеличению $D_{кр}/D_{ид}$. В принципе, видимо, при некоторых условиях можно плавно перевести режим детонации с верхней ветви ($D_{кр} \approx 3,5—4,0$ км/с) на нижнюю ($D_{кр} = 1,5—2$ км/с), как, например, это удается сделать в пористых зарядах тэна малого диаметра в трубках путем изменения размеров частиц ВВ [18]. Тогда формально $D_{кр}/D_{ид}$ уменьшится до 0,3—0,4. Однако это исключение, а не правило, как и низкоскоростные режимы детонации в твердых и жидких ВВ.

Полученные данные позволяют провести некоторую аналогию в причинах появления скачков на зависимости $D(d)$ в смесях с инертной добавкой и индивидуальными твердыми ВВ (резкий переход от нормальной к низкоскоростной детонации при уменьшении диаметра заряда). Возможность существования в сильноразбавленных смесях стационарных режимов детонации ($D = 1,5—2,0$ км/с) есть прямое подтверждение известных выводов о том, что часть ВВ при низкоскоростной детонации не реагирует за характерные для детонации времена. По существу, такой режим можно рассматривать как детонацию сильноразбавленной смеси («горячие точки» — «инертное» окружение). Непосредственной причиной скачка на кривой $D(d)$ после некоторого участка плавного спада являются, как и в сильноразбавленных смесях, слабые газодинамические возмущения, связанные с уменьшением диаметра заряда. Они приводят к «срыву» реакций в наименее нагретой массе ВВ, который самостоятельно продолжается до тех пор, пока не установится новый квазистационарный режим со своими характеристиками и разложением части ВВ в «горячих точках». Отличие состоит в том, что в смесях с инертными добавками ВВ может реагировать полностью и окружение действительно инертно, что делает возникающие режимы более устойчивыми, чем в индивидуальном ВВ.

В заключение отметим, что на примере детонации сильноразбавленных смесей с инертной добавкой особенно четко видно влияние физико-

химических процессов в зоне реакции на скорость и другие характеристики детонации. Очевидно, подобное явление имеет место и при детонации других систем со сложной кинетикой тепловыделения. В частности, в работе [19] отмечались скачки на зависимости $D(d)$ в системах гексоген — жидкий наполнитель (20—30% по массе). Большинство промышленных ВВ для горных работ и смесей для сварки взрывом относятся к такого типа системам.

Поступила в редакцию
22/III 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Шведов, А. Н. Ильин. Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация, Черноголовка, 1977.
2. К. К. Шведов, А. И. Анискин, А. Н. Дремин. III Международный симпозиум по обработке металлов взрывом. Сб. докладов, т. 2. Марианске — Лазне, 1976.
3. А. Я. Апин, Г. В. Димза. Докл. АН СССР, 1970, 192, 4.
4. Ю. Б. Харитон.— В сб.: Вопросы теории ВВ. Вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1947.
5. Б. Н. Кукиб.— В сб.: Взрывное дело, № 60/17. М., Недра, 1976.
6. Р. Х. Курбангалина. ПМТФ, 1969, 4.
7. А. Я. Апин, Л. Н. Стесик. ПМТФ, 1965, 2.
8. Р. Х. Курбангалина, С. С. Рыбанин, Л. Н. Стесик.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1972.
9. Ф. А. Баум, Б. И. Шехтер, К. П. Станюкович. Физика горения. М., Наука, 1959.
10. А. Я. Апин, И. М. Воскобойников, Г. С. Соснова. ПМТФ, 1963, 5.
11. Г. В. Димза.— В сб.: Взрывное дело, № 74/31. М., Недра, 1974.
12. А. К. Парфенов, И. М. Воскобойников. ФГВ, 1969, 5, 3.
13. К. К. Шведов, С. А. Колдунов, А. Н. Дремин. ФГВ, 1973, 9, 3.
14. В. Г. Хотин, В. А. Пономарев. ФГВ, 1973, 9, 2.
15. М. А. Соок. The Science of High Explosives New — York, Reinhold Publ. Corp. 1958.
16. К. К. Шведов, А. Н. Дремин.— В сб.: Горение и взрыв. М., Наука, 1977.
17. Н. М. Кузнецов. ЖЭТФ, 1967, 52, 1.
18. S. Paterson, P. Lamb. Les ondes de Detonation. Editions du centre national de La Recherche Scientifique. Anatole — France — Paris, 1962.
19. К. К. Шведов, А. А. Кривченко, В. П. Сальников. ФГВ, 1978, 14, 5.

ЗАМКНУТАЯ МОДЕЛЬ ПРЯМОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ С УЧЕТОМ НЕУСТОЙЧИВОСТИ. I. ТОЧЕЧНОЕ ИНИЦИИРОВАНИЕ

В. Ю. Ульяницкий
(Новосибирск)

В настоящее время известен ряд полуэмпирических моделей прямого инициирования газовой детонации, где получены формулы для расчета критической энергии. Качественные характеристики процесса инициирования в большинстве из них либо вообще не рассматриваются, либо весьма далеки от реальных. Наиболее распространенные из этих моделей [1—6] рассмотрены в настоящей работе.

Первая физическая модель инициирования предложена в [1], где в результате учета конечной скорости реакции показано, что скорость инициирующей волны может проходить через минимум, а существование критической энергии определяется задержками воспламенения. В качестве необходимого условия возбуждения детонации предложен критерий: «время действия ударной волны к моменту, когда ее амплитуда равна амплитуде стационарной детонационной волны, должно быть не менее