

слоя расчета может дать оценку суммарного изменения распределения частиц по размерам с учетом слияний частиц.

Полученные в работе решения определяют изменения функции распределения частиц в стационарном и нестационарном двухфазных потоках при горении СТТ и изменения среднемассового диаметра частиц, вступающих в зону горения (в стационарном и нестационарном случаях), необходимые для расчета процесса горения и для управления им.

Автор выражает глубокую благодарность О. И. Лейпунскому за внимание к работе, обсуждение результатов и замечания.

*Поступила в редакцию
27/VI 1973*

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М., «Наука», 1972.
2. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М., «Наука», 1967.
3. С. Челмен, Г. Каулинг. Математическая теория неоднородных газов. М., ИЛ, 1960.
4. Л. Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. М., Физматгиз. 1959.

УДК 662.215.4+532.593

ИНИЦИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ВОДОНАПЛНЕННОМ ГРАНУЛИРОВАННОМ ТРОТИЛЕ

*К. К. Шведов, А. Н. Дремин, А. Л. Кривченко,
Н. А. Мурашова, В. С. Козлов
(Москва)*

В настоящее время трудами многих исследователей установлено, что инициирование детонации ударными волнами в гомогенных (жидких) и гетерогенных (твердых) ВВ осуществляется различными путями [1]. Для жидких ВВ характерно наличие периода индукции адиабатического теплового взрыва, после которого формируется детонация в скатом веществе позади фронта инициирующей ударной волны. В твердых же ВВ (немонокристаллах) инициирующая ударная волна УВ практически без задержки вызывает частичное разложение ВВ в очагах. Вследствие этого УВ с самого начала вызывает реакцию, но из-за малого процента разложения ВВ и передачи энергии на фронт процесс развития идет медленно и имеет сравнительно большую протяженность в пространстве и во времени.

Частичное разложение пористых твердых ВВ в очагах, приводящее к детонации, может быть вызвано при сравнительно небольших давлениях (10—20 кбар), тогда как для разложения гомогенных ВВ необходимы давления порядка 100 кбар [1, 2].

Водонаполненные ВВ по структуре можно рассматривать как некоторую промежуточную между жидким и пористым ВВ систему, поэтому при возбуждении в них детонации ударной волной могут проявиться особенности, характерные для жидких или пористых ВВ.

В работе [3], посвященной в основном решению практических вопросов инициирования детонации водонаполненных ВВ, предпочтение отдается механизму инициирования жидкых ВВ, а в работе [4] обнаружен плавный рост скорости детонации инициирующей ударной волны до детонационной, как в твердых ВВ.

Детальных исследований инициирования детонации водонаполненных ВВ не проводилось. В данной работе в водонаполненном тротиле с разным размером и качеством зерна ВВ изучалось развитие ударных волн различной начальной амплитуды (18—88 кбар) до установления детонации. Исследовалось также разложение водонаполненного тротила и гексогена за времена $\approx 2,0$ мкс под действием ударных волн различной амплитуды.

Постановка эксперимента

Опыты проводились на зарядах цилиндрической формы диаметром 60 мм в тонкой прешпановой оболочке, предварительно пропитанной парафином с целью предотвращения разбухания. В основных сериях экспериментов использовался выпускаемый промышленностью гранулированный тротил сферической формы, размером 2—3 мм, плотность зерен составляла 1,54—1,57 г/см³, каждое зерно содержало внутри воздушную каверну. Средняя плотность насыпного заряда из таких частиц составляла 0,94 г/см³, а водонаполненных зарядов $\sim 1,32$ г/см³.

Пористость водонаполненных зарядов составляла около 5,5%. Некоторые опыты были проведены с зарядами из частиц тротила неправильной формы размером около 4 мм и плотностью около 1,64 г/см³. Такие частицы имели меньшую дефектность, чем зерна гранулированного тротила и не содержали воздушных каверн.

Ряд экспериментов выполнен с водонаполненными и парафинонаполненными зарядами из монокристаллических ($\rho_0=1,8$ г/см³) частиц гексогена размером $\approx 0,5$ мм.

Проводилось два типа экспериментов. В экспериментах первого типа изучалось развитие ударной волны до детонационной путем измерения скорости фронта (D) и профиля массовой скорости $u(t)$ на различных расстояниях (l) от места входа ударной волны в исследуемый образец.

Эти параметры определялись одновременно электромагнитным методом [5]. Ударные волны в исследуемых образцах, создаваемые детонацией активного заряда диаметром 80 мм, проходили через воздушный зазор и парафиновую прослойку (рис. 1). В исследуемом образце создавались ударные волны прямоугольного профиля.

В такой же постановке проводились эксперименты второго типа по изучению разложения ВВ путем измерения торможения границы раздела в результате разложения ВВ и повышения давления в ходе реакции [6]. Принципиальная схема опыта не менялась; датчик ставился на границу раздела ($l=0$), а амплитуда ударной волны варьировалась активным зарядом, размерами зазора и парафиновой прослойки. Диапазон изменения давления в исследуемых образцах составлял от 18 до 111 кбар, длительность прямоугольного участка от 4,7 до 2,0 мкс.

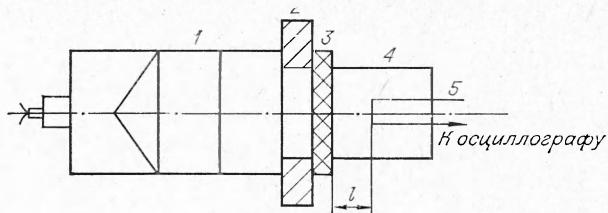


Рис. 1. Схема опыта.

1 — активный заряд; 2 — экран с воздушным зазором; 3 — парафиновая прослойка; 4 — исследуемый образец; 5 — электромагнитный датчик.

Принципиальная схема опыта не менялась; датчик ставился на границу раздела ($l=0$), а амплитуда ударной волны варьировалась активным зарядом, размерами зазора и парафиновой прослойки. Диапазон изменения давления в исследуемых образцах составлял от 18 до 111 кбар, длительность прямоугольного участка от 4,7 до 2,0 мкс.

Результаты опытов и их обсуждение

Развитие ударной волны до детонационной. На рис. 2 приведены графики зависимости u на ударном фронте от расстояния до границы раздела при различных амплитудах падающей ударной волны. Характерным для всех амплитуд является непрерывный рост параметров фронта, как это всегда имеет место в негомогенных ВВ. Заполнение пор водой не приводит к качественным изменениям картины формирования детонационной волны при ударном воздействии. Для сравнения на рис. 3 приведены графики зависимости давления на фронте волны от расстояния в водонаполненном и литом тротиле.

Давление рассчитывалось по экспериментальным значениям и ударной адиабате смеси, для которой в $D-u$ -координатах $D=1,5+2,36 u$. Она получена на основе измерения D и u на границе раздела под действием ударных волн различной амплитуды в экспериментах 2-го типа

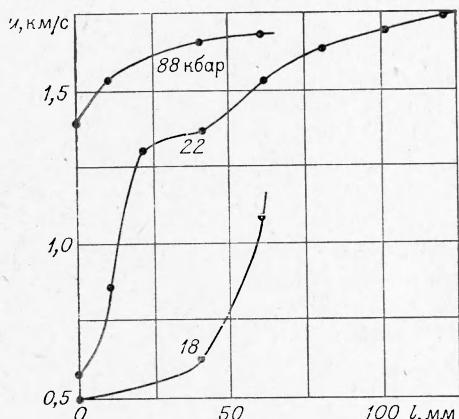


Рис. 2. Зависимость массовой скорости на ударном фронте от расстояния до границы раздела парафиновая прослойка — ВВ. Цифры на кривых — начальное давление на границе раздела.

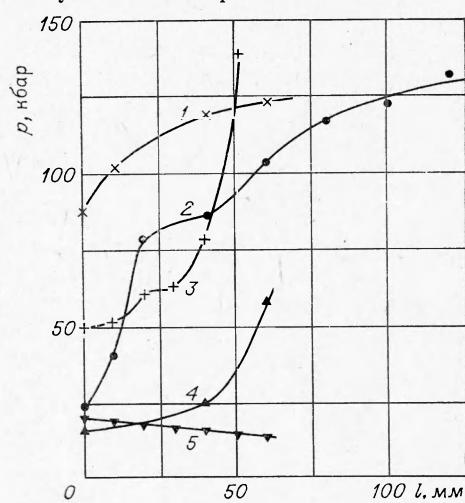


Рис. 3. Зависимость давления на фронте волны от расстояния до границы раздела парафиновая прослойка — ВВ в водонаполненном (1, 2, 4) и литом (3, 5) тротиле.

и справедлива в диапазоне давлений 20—140 кбар с точностью $\sim 10\%$. Данные по литому тротилу заимствованы из работы [7], геометрия зарядов приблизительно одинакова. В литом мелкокристаллическом тротиле ударная волна с амплитудой ~ 20 кбар затухает, тогда как в водонаполненном гранулотоле развивается и при 18 кбар, т. е. водонаполненный заряд оказывается более «чувствительным», чем сплошной. Повидимому, это связано с наличием пор в водонаполненных зарядах и с различием в структуре самих частиц. Однако вполне вероятно, что и при идеальном заполнении пор и совершенно одинаковом качестве зерна полного совпадения со сплошным зарядом не будет из-за различия в динамических жесткостях ВВ и наполнителя и различной концентрации энергии в единице объема. По сравнению же с пористым зарядом водонаполненный менее «чувствительный». Так, по данным работы [8], при тех же диаметрах активного заряда в пористых зарядах ТНТ ($\rho_0 = 1,0 \text{ г}/\text{см}^3$) детонация возникает при давлении инициирующей ударной волны ≈ 10 кбар (диаметр пассивного заряда везде много больше критического).

При больших амплитудах ударной волны (20—50 кбар) кривые $p(l)$ в водонаполненном и литом тротиле имеют некоторые общие черты — участки с быстрым ростом p , затем рост $p(l)$ замедляется и опять ус-

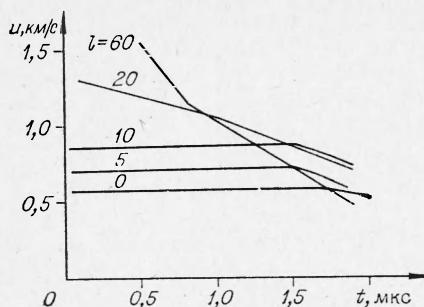


Рис. 4. Характерные профили массовой скорости при развитии ударной волны с начальным давлением 22 кбар на различных расстояниях от границы раздела.

формируется в треугольный, а в области $l=60-120$ мм на осцилограммах $u(t)$ появляется излом, характерный для установившегося режима детонации. На расстоянии 120 мм параметры фронта близки к детонационным ($D=6,0$ км/с), но ширина химпика в этом режиме ($\tau=1,0$ мкс) больше времени химпика стационарной детонации ($\tau=0,5$ мкс).

Окончательное формирование профиля $u(t)$, по-видимому, происходит при достижении D и u максимальных значений или даже несколько позже. Наличие треугольного профиля $u(t)$ в области непосредственного формирования детонации означает, что «догона» или «подпитки» фронта сзади, как предполагалось в работе [3], нет. Основная химическая реакция протекает во фронте волны или вблизи его, как и в случае неводонаполненных твердых ВВ.

Особый интерес для данной амплитуды ударной волны представляет область развития $l=0-10$ мм, где, как отмечалось, профиль $u(t)$ остается прямоугольным, а параметры фронта сильно растут. Если такой профиль определяется падающей ударной волной, то можно предположить, что во время существования полки ($\approx 2,0$ мкс) химическая реакция не возникает. В течение этого времени ударная волна должна распространяться по ВВ как в инертной среде, т. е. затухать или в лучшем случае сохранять параметры постоянными. Оценки показывают, что по расстоянию эта область составляет не менее 6 мм. В эксперименте же на расстоянии 5 мм наблюдается рост параметров (см. рис. 4). Это говорит о своеобразии протекания химической реакции, в ходе которой прямоугольный профиль не изменяется.

Контрольные эксперименты в инертной среде (NaCl) показали, что прямоугольный профиль $u(t)$ не разрушается на $l=10$ мм. С другой стороны, при воздействии на ВВ ударной волной треугольного профиля с близкой амплитудой на расстоянии $l=10$ мм наблюдается прямоугольный профиль.

Аналогичная трансформация профиля $u(t)$ наблюдалась при инициировании листого тротила ударной волны с амплитудой 100 кбар [7]. Однако в области формирования прямоугольного профиля параметры фронта заметно не росли.

Из сказанного можно сделать вывод, что физическая картина развития ударной волны до детонационной в водонаполненном тротиле и, видимо, с другими жидкими наполнителями качественно аналогична картине развития ударной волны до детонационной в твердых ВВ. Аналогия состоит в том, что по существу под действием ударной волны любой амплитуды в ВВ возникает без заметной задержки частичная химическая реакция в очагах.

коряется. При давлениях 80—100 кбар параметры фронта в водонаполненном ТНТ монотонно растут, причем скорость роста постепенно снижается.

Наблюдаемые особенности роста параметров фронта естественно связывать с процессами выделения энергии за фронтом и ее поступления на фронт. Некоторые сведения об этом дает анализ профиля $u(t)$ за фронтом волны (рис. 4).

В области 0—10 мм, где происходит сильное ускорение фронта, профиль $u(t)$ остается прямоугольным. На участке 20—40 мм он транс-

Разовьется ли этот процесс до детонации или затухнет, зависит, кроме скорости выделения энергии, и от потерь энергии, определяемых диссипативными процессами в самом фронте ударной волны и действием боковых волн разрежения. Последние зависят как от параметров волн, так и от геометрии заряда. Характерно, что развитие процесса до детонации или его затухания происходит относительно плавно. По-видимому, только в исключительных случаях (частики ВВ — идеальные моно-кристаллы, детонация в которых возникает по типу гомогенного взрыва в жидких ВВ, а наполнитель — гомогенная среда с близкими к моно-кристаллам динамическими и теплофизическими свойствами) путем заполнения пор гомогенным наполнителем можно получить качественное изменение картины инициирования детонации ударной волной по сравнению с пористым зарядом. В реальных же условиях даже при амплитудах воздействия значительно ниже детонационных неминуемо возникновение очагов реакции на дефектах самих частиц, на границах между частицами, на границах ВВ — наполнитель и другими путями, что и определяет во многом плавный характер роста параметров.

Так как на процесс развития ударной волны до детонационной кроме собственно процессов энерговыделения существенное влияние оказывают газодинамические эффекты, но трудно выделить роль первых. Поэтому для более детального выяснения природы очагов реакции и ее развития в наполненных системах был использован метод торможения границы раздела инертная среда — исследуемое ВВ [6]. В этом методе четко контролируется амплитуда и длительность действия инициирующей ударной волны прямоугольного профиля; разложение начинается и происходит за наблюдаемые времена 2—3 мкс без влияния боковых волн разрежения.

Влияние амплитуды ударной волны, размера и качества зерна ВВ на разложение водонаполненных ВВ. На рис. 5 приведены результаты определения профиля $u(t)$ в экспериментах с прямоугольными волнами. В водонаполненном тротиле (рис. 5, а) при давлениях 18—22 кбар профиль $u(t)$ за $t = 2,0$ мкс сохраняется прямоугольным, но это в данном случае не означает отсутствия химической реакции, как было показано выше. С увеличением давления до 70—90 кбар наблюдается линейный спад $u(t)$ с самого начала записи (завал фронта около 0,2 мкс). Это

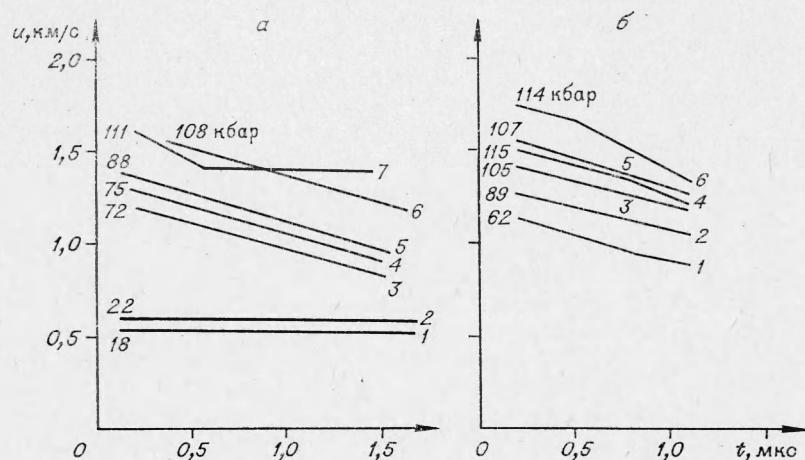


Рис. 5. Профили массовой скорости на границе раздела парафиновая проплойка — ВВ:

а) в водонаполненном тротиле кривые 1, 2, 3, 5, 7 соответствуют размерам зерна 2—3 мм и плотности 1,54—1,57 г/см³, кривая 4 — размерам 1—1,5 мм и плотностью 1,54—1,57 г/см³, кривая 6 — литое зерно размером 3—5 мм и плотностью 1,64 г/см³; б) в водонаполненном (2, 3, 4) и парафинонаполненном (1, 5, 6) гексогене с размером зерна 0,5 мм и плотностью 1,8 г/см³. (Цифрами указаны начальные давления на границе раздела.)

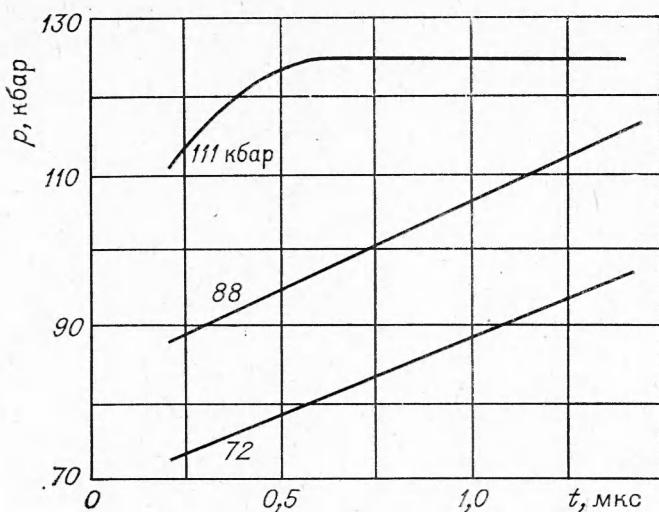


Рис. 6. Зависимость давления от времени за фронтом ударной волны в водонаполненном тротиле при различных начальных амплитудах. (Цифрами отмечены начальные давления на границе раздела.)

означает, что разложение начинается сразу и не заканчивается за время наблюдения. Спад $u(t)$ в данном случае свидетельствует об увеличении давления на границе раздела. Его можно рассчитать по методу отражения, используя ударную адиабату парафина (предполагая, что она совпадает с изэнтропой) и текущие значения $u(t)$.

На рис. 6 показаны результаты расчетов роста $p(t)$ для трех начальных амплитуд ударной волны. При начальных давлениях на ударном фронте 70—90 кбар давление за фронтом почти линейно растет со временем; разложение, очевидно, протекает в очагах. Суммарный эффект можно рассматривать как разложение ВВ собственно в очагах и распространение реакции из очагов на объем. Оценить влияние этих двух факторов трудно. При давлении ударной волны ≈ 110 кбар характер профиля $u(t)$ или $p(t)$ меняется (см. рис. 5, а) или выход на плато кривой $p(t)$ (см. рис. 6). Очевидно, при этом давлении разложение (или ведущая его стадия) заканчивается за $\sim 0,6$ мкс. При начальной амплитуде фронта ударной волны 88 кбар за $\sim 1,2$ мкс давление за фронтом также достигает ~ 110 кбар. Однако излома на записи $u(t)$ или выхода на плато кривой $p(t)$ нет. Следовательно, давление во фронте ударной волны оказывает решающее влияние на разложение, а не его повышение за фронтом. Очевидно, что в случае существенной роли в разложении ВВ реакции горения из очагов, способ повышения давления с 90 до 110 кбар не должен влиять на результат. При давлении ≈ 110 кбар, по-видимому, велика концентрация очагов реакции, и разложение приближается к гомогенному взрыву. Наличие такого излома на записи $u(t)$ характерно и для стационарной детонации водонаполненного тротила ($\tau=0,5$ мкс, давление на ударном фронте 150 кбар, $D=6,0$ км/с).

Эксперименты по фоторегистрации свечения на боковой поверхности водонаполненного тротила при действии ударной волны ~ 110 кбар показали, что свечение появляется практически без задержки и распространяется со скоростью 5,8 км/с, близкой к скорости фронта установленной детонации.

Таким образом, давления, при которых появляется излом на записях $u(t)$, на границе близки к давлениям инициирования детонации без заметной области развития.

Для выяснения влияния размера и качества зерна ВВ были проведены эксперименты по записи $u(t)$ с водонаполненными зарядами тротила с размером частиц 1—1,5 мм. Результаты этих опытов показаны на рис. 5, а под цифрой 4. Как видно из рисунка, при близких амплитудах ударного воздействия 70—80 кбар, когда реакция протекает явно в очагах изменения размера зерна с 2—3 до 1—1,5 мм, не происходит заметного изменения скорости разложения. В данном случае места контактов между частицами и их удельная поверхность не оказывают существенного влияния на процесс разложения. Это можно связать с большим числом дефектов внутри самих частиц.

Для выявления их роли на возникновение очагов реакции было выбрано литое зерно размером 3—5 мм, содержащее меньше видимых дефектов, плотностью $\rho_0 = 1,64 \text{ г/см}^3$. Профиль $u(t)$ на границе раздела в опытах с водонаполненными зарядами из таких частиц отличается от профиля $u(t)$ в зарядах с гранулированным тротилом при одинаковых давлениях на ударном фронте (рис. 5, а, кривая 6) отсутствием излома. Очевидно для того, чтобы получить, разложение ВВ за $\tau = 0,6 \text{ мкс}$ необходимы более высокие давления.

На зарядах с литым зерном $\rho_0 = 1,64 \text{ г/см}^3$ были проведены также опыты по регистрации профиля $u(t)$ в области развития от ударной волны с давлением на фронте $\approx 22 \text{ кбар}$. Оказалось, что на расстоянии 60 мм от границы раздела парафин—ВВ профиль массовой скорости имел прямоугольный вид с амплитудой на фронте 0,53 км/с. На том же расстоянии от этой амплитуды ударной волны, но для гранулированного водонаполненного тротила отмечался треугольный профиль массовой скорости с максимальным значением и на фронте 1,55 км/с.

Таким образом, повышение плотности зерна и уменьшение его дефектности приводит к более медленному разложению наполненного ВВ при одинаковой амплитуде ударного сжатия на границе раздела и, как следствие этого, к затягиванию развития ударной волны до детонационной. Получение зерна монокристаллической плотности для тротила сопряжено с рядом трудностей. Поэтому был выбран для сравнения монокристаллический гексоген с $\rho_0 = 1,8 \text{ г/см}^3$ с размером зерна 0,5 мм — вещество, в принципе, более чувствительное к удару и ударной волне. На рис. 5, б приведены результаты экспериментов по записи $u(t)$ на границе раздела в водонаполненных и парафинонаполненных зарядах гексогена. Здесь так же, как и в водонаполненных зарядах тротила с литым зерном, при $p = 110—115 \text{ кбар}$ за 1 мкс нет изломов на записях $u(t)$. Заполнение пор водой или парафином практически не сказывается на разложении в очагах. В водонаполненном гексогене, как и в тротиле, при давлениях ниже 110 кбар реакции в очагах за наблюдаемое время развиваются без заметного ускорения. Возможно, что возрастание давления за фронтом в какой-то мере тормозит разложение. Следует отметить, что при исследовании разложения пористых ($\rho_0 = 1,0 \text{ г/см}^3$) образцов тротила и гексогена при низких давлениях (10—30 кбар) [6] было обнаружено сильное ускорение разложения в гексогене на завершающей стадии.

Существенное влияние пористости или дефектности зерна ВВ на разложение в ударных волнах сравнительно небольших амплитуд, по-видимому, связано с возможностью сильного локального разогрева самого ВВ в местах наибольших деформаций и течений.

В заключение отметим, что возникновение детонации под действием ударной волны без заметного участка развития в наполненных системах связано с завершением разложения ВВ в объеме за небольшие времена ($\sim 0,5—1,0 \text{ мкс}$). В свою очередь, такое течение реакции зависит не только от амплитуды (возможно и длительности волны), но и качества зерна. В частности, для водонаполненного гранулированного тротила это давление составляет $\sim 110 \text{ кбар}$, для более совершенного качества

зерна, по-видимому, оно будет больше, но не превысит для разрядов с близкой геометрией критическое давление инициирования жидкого тротила (120—130 кбар [2]).

По-видимому, для верхних оценок критических давлений инициирования детонации без заметной задержки в наполненных системах достаточно воспользоваться данными для ВВ в гомогенном состоянии (жидкое или монокристаллическое).

* * *

1. В водонаполненных зарядах развитие ударной волны с параметрами значительно ниже детонационных происходит плавно, как и в твердых ВВ. Скорость роста параметров тем выше, чем больше давление ударной волны и больше дефектов зерна ВВ.

2. При давлениях ~ 20 —100 кбар в водонаполненных зарядах тротила разложение ВВ начинается сразу в очагах и происходит без заметного ускорения, несмотря на рост давления над фронтом.

3. Возникновение детонации без заметного участка развития в водонаполненных зарядах происходит при таком давлении ударного сжатия, которое обеспечивает практически гомогенное разложение ВВ. Для гранулированного водонаполненного тротила это давление составляет ~ 110 кбар (время $\tau = 0,6$ мкс) и повышается с увеличением плотности и уменьшением дефектности зерна.

*Поступила в редакцию
14/I 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
2. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов, И. И. Воскобойников. Сб. «Взрывное дело», № 68/25, «Недра», 1970.
3. М. Ф. Друкованный, В. М. Комир и др. Использование взрыва в народном хозяйстве. Ч. I. Киев, «Наукова думка», 1970.
4. А. И. Романов, И. В. Карис, Б. А. Игнатьев. Использование взрыва в народном хозяйстве. Ч. I. Киев, «Наукова думка», 1970.
5. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. Методы исследования процессов горения и детонации. М., «Наука», 1970.
6. С. А. Колдунов, К. К. Шведов, А. Н. Дремин. ФГВ, 1973, 10, 2.
7. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
8. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ФГВ, 1971, 7, 1.

УДК 541.12.03

УДАРНОЕ СЖАТИЕ ПОРИСТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ

*A. A. Дерибас, A. M. Ставер
(Новосибирск)*

Интенсивное развитие физики высоких давлений связано с решением одной из главных проблем физики твердого тела — получением материалов с особыми физическими свойствами. Эти исследования идут по пути создания статических устройств высокого давления и разработки