

ИНИЦИИРОВАНИЕ ПОРИСТОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА ПРОДУКТАМИ ПЕРЕСЖАТОЙ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

В. В. Григорьев, Л. А. Лукьянчиков, Э. Р. Прууэл, А. А. Васильев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Приведены результаты экспериментов по инициированию и развитию детонации в цилиндрических зарядах пористого взрывчатого вещества продуктами пересжатой детонации газовой смеси ($C_2H_2 + 2,5 O_2$). Исследовались заряды взрывчатого вещества с насыпной плотностью около 1 г/см^3 в непрочных оболочках. Для зарядов тэна и гексогена определено критическое начальное давление газовой смеси, при котором еще происходит инициирование детонации, приведены также давления, непосредственно воздействующие на заряд. Для тэна впервые проведены измерения критического начального давления и задержки инициирования для зарядов с частицами различного диаметра. Полученная зависимость характеризует аномальное свойство пористых зарядов: существует оптимальный размер частиц, при котором наблюдается максимум чувствительности взрывчатого вещества. Приведены фоторазвертки самосвечения при характерных режимах инициирования. С использованием электромагнитной методики получены профили массовой скорости в волне инициирования на разной глубине заряда.

ВВЕДЕНИЕ

При быстром подводе энергии во вторичное порошковое взрывчатое вещество (ВВ) невысокой плотности удается за короткое время сформировать небольшой макроочаг реакции, из которого в зависимости от дисперсности используемого ВВ за единицы и даже доли микросекунды развивается нормальное детонационное превращение. Для создания первоначального очага обычно используют электрический взрыв проводника или фольги, импульсный искровой разряд и лазерное излучение [1]. Нельзя однозначно утверждать, что во всех этих случаях механизм развития детонации одинаков и проходит те же ключевые стадии, которые обеспечивают дальнейшее самостоятельное развитие детонации независимо от условий в области инициирования.

В работе [1] предполагалось, что ВВ под действием лазерного излучения разлагается в узкой зоне у поверхности, формируя горячий газовый поршень. Такой поршень обеспечивает возникновение детонации по классическому механизму [2], ключевой стадией которого является формирование инициирующей ударной волны. Такой вывод сделан на основе анализа энергетических параметров инициирования и в дальнейшем подтвержден численным модели-

рованием [3] в рамках концепции сплошной однофазной среды. Эти результаты относятся к мелкодисперсному тэну, для которого площадь поверхности составляет $3 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{г}$. Развитие детонации в таком тэне завершается менее чем за 10^{-6} с, и для получения экспериментальной информации о структуре переходной зоны требуются нестандартные методики.

Для штатного и крупнодисперсного ВВ наиболее изучен процесс развития детонации из очага поджига [4]. Он проходит несколько стадий, которые отличаются друг от друга способами переноса зоны химической реакции и характеризуются разными давлениями во фронте и различными скоростями распространения вдоль заряда (рис. 1). Иницирование таких зарядов электрической искрой исследовано в работах [5–8]. Численное моделирование задачи в сходной постановке можно найти в [9–11]. Развитие детонации в зарядах начинается с возникновения режима низкоскоростной детонации (скорость $\approx 1 \text{ км/с}$). В настоящее время существуют различные мнения о природе этого процесса [12, 13]. Так, например, согласно работе [12] это конвективное горение, при котором выполняется часто принимаемая зависимость скорости горения одиночной частицы ВВ от давления: $w \sim p$. Авторы работ [6, 7] считают, что в этом случае инициирование реакции осуществляется ударной волной. В [11] быстрый переход горения в детонацию

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-01-01497).

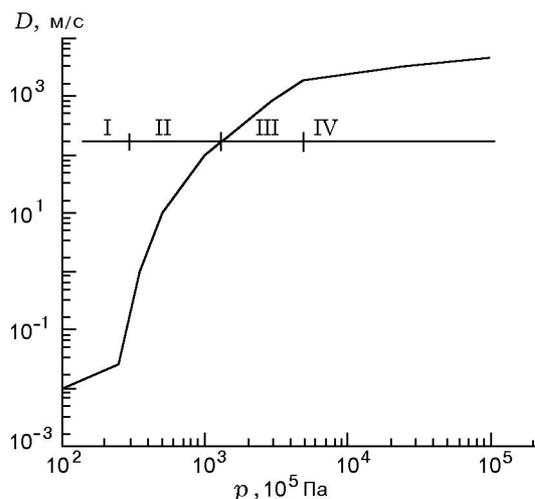


Рис. 1. Схема процесса перехода горения пористого заряда ВВ в детонацию в координатах «скорость фронта — давление во фронте»:

I — послонное горение, II — конвективное горение, III — низкоскоростная детонация, IV — нормальная детонация [4]

объясняется дроблением гранул ВВ в волне сжатия.

С целью проверки указанных гипотез в работе экспериментально исследуется инициирование зарядов тэна одной пористости, но с различным диаметром частиц. В представленной работе пористые заряды инициировались продуктами пересжатой газовой детонации. Особенностью данного метода является то, что параметры воздействующих продуктов детонации: давление, плотность и температура газа на торце заряда — хорошо известны и могут варьироваться в широких пределах при изменении начального давления (p_0) и состава газовой смеси. При использовании пересжатия требуются меньшие начальные давления по сравнению с инициированием пористого ВВ продуктами детонации Чепмена — Жуге.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 2. Прочная газодетонационная труба, герметично соединенная с зарядом исследуемого ВВ, перед опытом вакуумировалась и заполнялась смесью ацетилена с кислородом ($C_2H_2 + 2,5 O_2$) до требуемого давления. Опыты проводились в диапазоне $p_0 = 0,5 \div 4$ атм. При распространении детонационной волны (ДВ) в сужающемся конусе происходило ее пересжатие от нормальной скорости

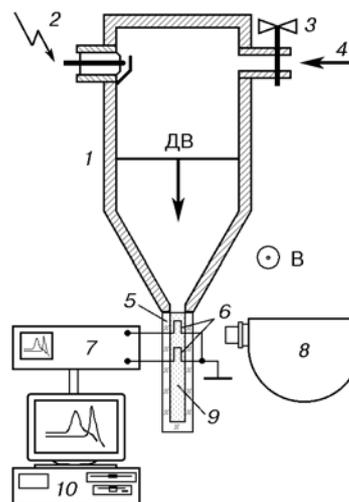


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — цилиндрический канал с конусом для формирования пересжатой детонационной волны в газе; 2 — свеча для инициирования газовой смеси; 3, 4 — система для откачки воздуха и напуска взрывчатой газовой смеси; 5 — корпус заряда; 6 — датчики массовой скорости; 7 — осциллограф; 8 — СФР; 9 — заряд пористого ВВ; 10 — ЭВМ

детонации $D_{g,0} = 2,4$ км/с до $D_g = 2,9$ км/с. Использование пересжатой ДВ позволило значительно повысить воздействие продуктов детонации на инициируемый заряд.

Пересжатая ДВ воздействовала на торец порошкового заряда исследуемого ВВ. Заряд был заключен в плексигласовую трубку с внутренним диаметром 4 мм и толщиной стенки 1 мм. По оценке прочность такой оболочки невелика, максимальное статическое давление, которое она может выдержать, ≈ 200 атм; $p = 2(\Delta/d)\sigma$, где Δ — толщина стенки, d — внутренний диаметр, σ — предел прочности материала оболочки. Поэтому уже через небольшой промежуток времени (≈ 10 мкс по данным фоторегистрации) процесс инициирования может стать существенно неоднородным.

При такой постановке эксперимента инициирующий газ безусловно попадал в поры заряда. Чтобы выяснить, влияет ли он на инициирование, были проведены модельные опыты, в которых ВВ было заменено инертным порошком с близким размером частиц. Никакого проникновения свечения в инертный порошок не наблюдалось, вплоть до максимальных значений давлений p_0 . Можно утверждать, что присутствующий в порах заряда газ мало влияет на инициирование.

Условия и результаты экспериментов

| Начальное давление газовой смеси, 10^5 Па | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,3 | 2 | * |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Давление за фронтом пересжатой детонационной волны, 10^5 Па | 36 | 44 | 52 | 60 | 66 | 74 | 96 | 147 | — |
| Максимальное давление в отраженной волне, 10^5 Па | 160 | 200 | 230 | 260 | 300 | 330 | 430 | 650 | — |
| Давление с протеканием в отраженной волне, 10^5 Па | 120 | 150 | 170 | 190 | 210 | 240 | 300 | 480 | — |
| ТЭн: | | | | | | | | | |
| $500 < d < 700$ мкм | — | — | 0/1 | 0/1 | — | — | 0/1 | 0/1 | 0/1 |
| $300 < d < 500$ мкм | 1/3 | 3/3 | — | 3/3 | — | 3/3 | — | — | — |
| $100 < d < 200$ мкм | 0/3 | 1/3 | 2/3 | 3/3 | 3/3 | 3/3 | — | — | — |
| $75 < d < 250$ мкм | 0/3 | 0/3 | 2/3 | 3/3 | 3/3 | 3/3 | — | — | — |
| $50 < d < 100$ мкм | — | — | 0/3 | 1/3 | 2/3 | — | 3/3 | — | — |
| Гексоген, $75 < d < 150$ мкм | 0/1 | 0/2 | 1/3 | 2/3 | 3/3 | 1/1 | — | — | — |
| Октоген, $75 < d < 150$ мкм | — | — | — | 0/1 | 0/1 | — | — | 0/1 | 0/1 |

Примечания. Числитель — число иницирований, знаменатель — полное число экспериментов. В последней колонке (*) отмечена возможность иницирования навеской ВВ с интенсивностью воздействия $\approx 2 \cdot 10^4$ атм. Плотность зарядов $\rho = 1$ г/см³. Во второй строке приведены расчетные давления, возникающие за фронтом пересжатой детонационной волны в газе, в третьей и четвертой — давления, возникающие при отражении волны от жесткой стенки и при условии фильтрации газового потока в заряд со скоростью 400 м/с соответственно.

В опытах распространение самосвечения фиксировалось фоторегистратором. Примененные электромагнитной методики позволило измерить массовую скорость на разной глубине заряда от поверхности иницирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовались заряды тэна пяти фракций, полученные просеиванием штатного ВВ, а также заряды гексогена и октогена одной фракции. Во всех случаях плотность ВВ была насыпной и составляла 1 г/см³. Результаты экспериментов приведены в таблице. Отказы и срабатывания легко определялись, так как в первом случае оболочка заряда оставалась целой. За критическое начальное давление (p_{cr}) принималось давление газовой смеси, при котором частота срабатывания составляла ≈ 50 %.

Как видно из таблицы, чувствительность пористого тэна аномально зависит от размеров частиц и увеличивается с укрупнением частиц ВВ в заряде. Для начальных давлений, меньших критического, происходит отказ, причем на фоторазвертке видна только первая область

фильтрации горячих газов в ВВ. При этом оболочка заряда в большинстве опытов не разрушалась, а сам заряд уплотнялся со стороны иницирования так, что его длина уменьшалась примерно на 5 мм независимо от его начальной длины. Полученные значения p_{cr} хорошо согласуются с данными экспериментальной работы [14].

Результаты экспериментов представлены на рис. 3 в виде зависимости критического давления иницирования от диаметра частиц ВВ.

Развитие детонации исследовалось по фоторазверткам СФР (рис. 4). Типичная регистраграмма для заряда тэна с размером частиц $75 < d < 250$ мкм представлена на рис. 4, б. Очаг горячих газов, иницирующий ВВ, образуется на границе порошка при отражении пересжатой детонационной волны и наблюдается там в течение 15 мкс. Это свечение не проникает внутрь порошка. В интервале времени до 5 мкс возникающий в ВВ светящийся фронт сильно размыт и о скорости процесса судить трудно, но она не превышает нескольких сотен метров в секунду. Затем скорость преддетонационного процесса за время не бо-

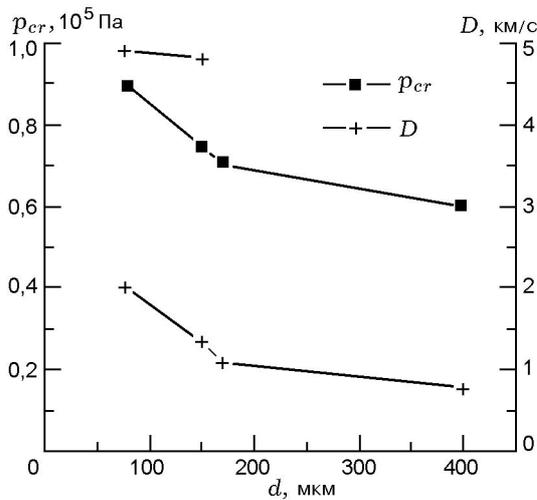


Рис. 3. Зависимость критического давления инициирования тэна и скорости детонации от размера частиц в заряде:

$\rho = 1 \text{ г/см}^3$, верхняя ветвь скорости — нормальная детонация, нижняя — низкоскоростная

лее 2 мкс возрастает до 10^3 м/с. Из этой области начинает распространяться фронт свечения в обратном направлении с близкой скоростью. Массовая скорость в первые моменты времени не превышает 200 м/с, поэтому реализуемого сжатия недостаточно для инициирования заряда за счет быстрой деформации. По свойствам эта волна очень похожа на скоростное конвективное горение (СКГ), обнаруженное в работе [13]. Далее волна продолжает разгоняться, и при $D \approx 1,5 \cdot 10^3$ м/с формируется резкий ударный фронт, который в течение следующих 10 мкс возрастает до скорости нормальной детонации $D \approx 4,5 \cdot 10^3$ м/с. Во всех случаях при отказе детонации СКГ в заряде не возникало, поэтому его возникновение можно считать критерием инициирования.

Для зарядов с различным размером частиц реализуются разные варианты развития детонации (см. рис. 4). Заряды с относительно крупными частицами ($500 < d < 700$ мкм) в исследованном диапазоне начальных давлений инициировать не удалось. Более того, инициирование такого заряда с помощью навески тэна, обладающей значительно большей мощностью, вызывало в нем нестационарный процесс, который затухал на некотором расстоянии от области инициирования. Можно сделать вывод, что при таких диаметрах частиц в используемых оболочках СКГ не распространяется и инициировать его невозможно.

При $d = 200 \div 400$ мкм в зарядах тэна инициируется СКГ, которое распространяется, не затухая и не переходя в детонацию на всей длине заряда (см. рис. 4,а). Зависимости скорости волн низкоскоростной и нормальной детонации от диаметра частиц изображены на рис. 3.

При инициировании зарядов с еще меньшим диаметром частиц ($d < 200$ мкм) процесс низкоскоростной детонации становится неустойчивым и развивается до достижения им скорости стационарной детонации (см. рис. 4,б,в). Для зарядов с $d < 100$ мкм переходная область низкоскоростной детонации отсутствует, наблюдается постоянное ускорение процесса до скорости стационарной детонационной волны (см. рис. 4,г).

Как отмечалось выше, в качестве критерия инициирования было принято возникновение СКГ. На фоторазвертках об этом свидетельствуют резкое увеличение интенсивности свечения и возрастание скорости распространения волны. Это позволяет оценить глубину возникновения детонации и временную задержку. Зависимости этих величин от диаметра частиц ВВ и начального давления приведены на рис. 5.

ИЗМЕРЕНИЕ МАССОВОЙ СКОРОСТИ

Использование электромагнитной методики для измерения массовой скорости позволило получить дополнительные сведения о преддетонационных процессах. В частности, удалось зарегистрировать зависимости массовой скорости конденсированной фазы от времени на разной глубине в заряде. Недостатком методики в данном случае является невозможность измерения массовой скорости одновременно во многих точках заряда. Приведенные массовые профили — это результаты измерений в отдельных опытах. Сопоставление фоторазверток и профилей массовой скорости в различных экспериментах при одинаковых начальных условиях свидетельствует об их неоднозначной воспроизводимости, несмотря на тщательность сборки. Все же на рис. 6 можно проследить изменение профиля массовой скорости в волне от момента инициирования до момента образования детонации со стационарной скоростью.

В первые моменты после инициирования наблюдается некоторое затухание волны инициирования; фронт растягивается по време-

ни, достигая максимальной ширины на глубине 4 мм. В дальнейшем амплитуда волны монотонно растет, а время нарастания массовой скорости уменьшается. Следует отметить, что включительно до области низкоскоростной детонации (см. рис. 6, *г*) длительность фронта составляет несколько микросекунд. Это означает, что во фронте отсутствует ударная волна с интенсивностью, достаточной для ударного инициирования. Только при достижении скорости волны $\approx 1,5 \cdot 10^3$ м/с (см. рис. 6, *д*) наблюдается резкий фронт, характерный для ударного инициирования.

Зная скорость фронта и массовую скорость, можно оценить давление в волне: $p = \rho u D$. Вычисленное таким образом давление в области перехода от низкоскоростной детонации к обычной составляет $(2 \div 3) \cdot 10^8$ Па. Это хорошо соответствует давлению инициирования детонации ударной волной в заряде тэна, полученному в работах [15, 16].

Отсюда следует, что до скорости фронта $1,5 \cdot 10^3$ м/с интенсивности волны сжатия недостаточно для инициирования химической реакции и за перенос зоны химической реакции ответственны другие механизмы, которые определяют процесс разложения ВВ в волне конвективного горения и низкоскоростной детонации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование однозначно указывает, что при инициировании пористых ВВ горячим газовым потоком возникновению ударной волны с интенсивностью, достаточной для ударного инициирования, предшествует СКГ, возникающее через микросекунды после начала воздействия потока на частицы ВВ. Как было показано в работе [17], за столь короткое время поверхность ВВ не успевает прогреться на глубину, достаточную для выполнения твердофазных условий зажигания. По этой причине в расчетах работ [9–11] задержки возникновения детонации завышены, и для правильного описания развития детонации необходимо использовать более интенсивные механизмы горения. Требуемое увеличение скорости регрессии конденсированной фазы можно объяснить развитием неустойчивостей в тонком слое расплава на поверхности гранул [17].

При воздействии продуктов детонации на поверхности заряда образуется область повышенного давления; из нее начинает фильтроваться газ, скорость которого вначале возрастает.

Если скорость потока достигает и превышает критическое значение [17], становятся возможными резкое увеличение газообразования с поверхности ВВ и дальнейшее развитие процесса, в противном случае фильтрация затухает и внутри заряда не возникает никакого самоподдерживающегося режима. Характер изменения профилей массовой скорости свидетельствует о том, что ударно-волновой механизм становится определяющим только при скорости волны $D = 1,5 \cdot 10^3$ м/с и не может доминировать на более ранних стадиях.

При инициировании искровым разрядом интенсивное свечение высокотемпературной плазмы засвечивает зону, в которой формируется волна скоростного горения, способная устойчиво распространяться в оболочке малой прочности. При падении пересжатой волны на торец заряда первичное свечение локализуется на границе насыпного ВВ, и не мешает наблюдать за развитием самосвечения внутри. Слабая зависимость начальной скорости СКГ от амплитуды инициирующей волны вблизи предела инициирования вполне коррелирует с установленной в [5] слабой зависимостью кинематики развития самосвечения от мощности разряда. При инициировании зарядов с мелкодисперсным ВВ переход к детонации происходит быстрее и процесс внешне может выглядеть так же, как в работе [1].

Полученные экспериментальные данные важны для апробации различных механизмов горения частиц ВВ в волне конвективного горения.

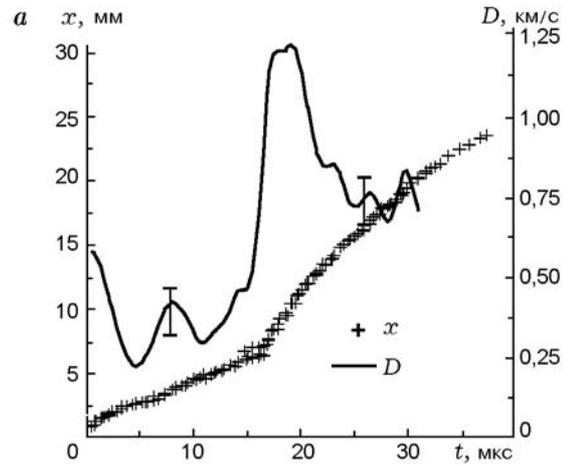
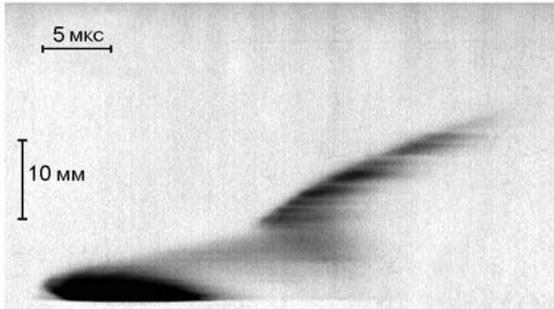
ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова А. А., Зинченко А. Д., Санин И. В. и др. Временные характеристики инициирования тэна лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 5. С. 760–766.
2. Stirpe D., Jonson J. O., Wackerle J. Shock initiation of XTX-8003 and pressed PETN // J. Appl. Phys. 1970. V. 41, N 9. P. 3884–3893.
3. Таржанов В. И., Куропатенко В. Ф., Сапожников А. Т. и др. Математическое моделирование инициирования тэна лазерным излучением // Быстрое инициирование ВВ. Особые режимы / Под ред. В. И. Таржанова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1998. С. 14–20.
4. Сулимов А. А., Ермолаев Б. С. Квазистационарное горение в энергетических материалах с низкой пористостью // Хим. физика. 1997. Т. 16, № 9. С. 51–72.

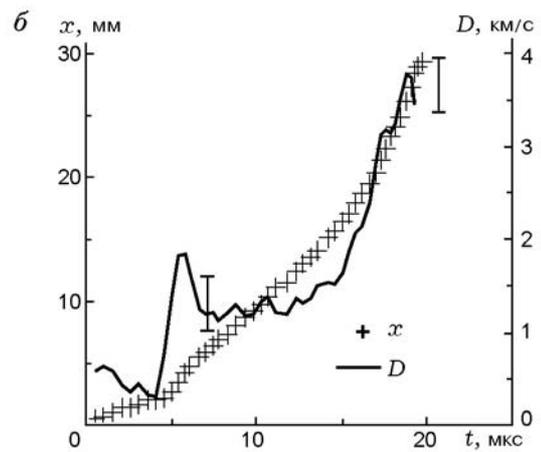
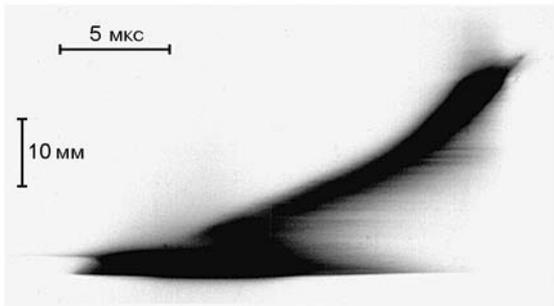
5. **Андреев В. В., Зубков П. И., Киселев Г. И.** Об одном из режимов детонации в порошковых ВВ малой плотности // Динамика сплошной среды. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1972. Вып. 10.
6. **Ащепков Н. В., Стеньгач В. В.** О преддетонационном участке перехода горения тэна в детонацию // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 6. С. 873–876.
7. **Мельников М. А., Никитин В. В.** О предельных условиях детонации в аммонитах, иницируемых слабыми импульсами // Использование взрыва в народном хозяйстве. Киев: Наук. думка, 1970. С. 186–196.
8. **Андреев В. В., Лукьянчиков Л. А.** К механизму распространения детонации с малой скоростью в тэне при искровом иницировании // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 6. С. 912–919.
9. **Ахатов И. Ш., Вайнштейн П. Б.** Нестационарные режимы горения пористых порохов // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 3. С. 53–61.
10. **Нигматулин Р. И., Вайнштейн П. Б., Ахатов И. Ш.** Переход конвективного горения порошковых ВВ в детонацию // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 5. С. 93–97.
11. **Ershov A. P.** Convective combustion of granular explosive after sharp initiation — fragmentation effect // Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Multiphase Flow. 1995. P. CO-27–CO-31.
12. **Андреев В. В.** Ускоренный переход горения порошкового тэна в детонацию // Динамика сплошной среды. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1977. Вып. 29. С. 3–11.
13. **Андреев В. В., Ершов А. П., Лукьянчиков Л. А.** Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 3. С. 89–93.
14. **Андреев В. В., Лукьянчиков Л. А., Митрофанов В. В., Тесленко В. С.** Возбуждение детонации порошковых ВВ взрывом газовой смеси // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 5. С. 153–155.
15. **Беляев А. Ф., Боболев В. К.** Переход горения конденсированных систем во взрыв. М.: Наука, 1973.
16. **Seay G. E., Seely L. B.** Initiation of low-density PETN pressing by a plane shock wave // J. Appl. Phys. 1961. V. 32, N 6.
17. **Григорьев В. В., Лукьянчиков Л. А., Прууэл Э. Р.** Поджигание частиц тэна волной газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 2. С. 133–138.

*Поступила в редакцию 1/III 2000 г.,
в окончательном варианте — 20/VI 2000 г.*

$300 < d < 500$ мкм, $p_0 = 0,6 \cdot 10^5$ Па



$75 < d < 250$ мкм, $p_0 = 0,9 \cdot 10^5$ Па



$100 < d < 200$ мкм, $p_0 = 0,7 \cdot 10^5$ Па

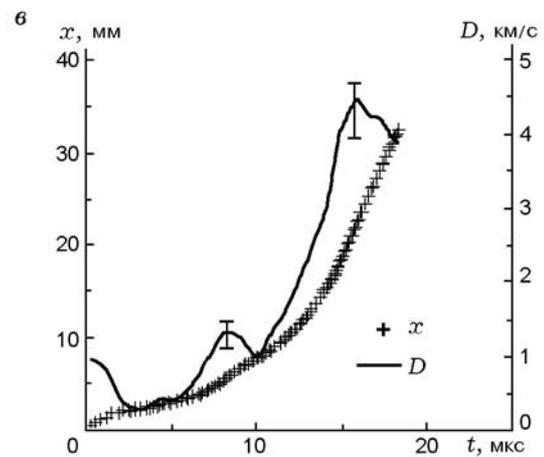
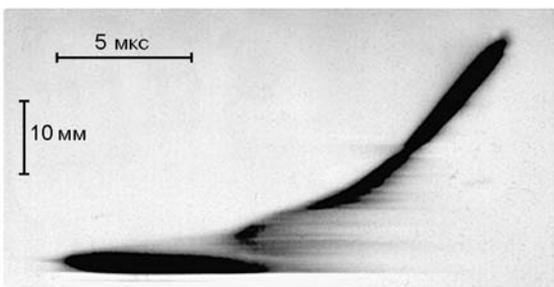


Рис. 4. Иницирование заряда тэна:

корпус — плексигласовая трубка с внутренним диаметром 4 мм и толщиной стенки 1 мм; плотность заряда 1 г/см^3

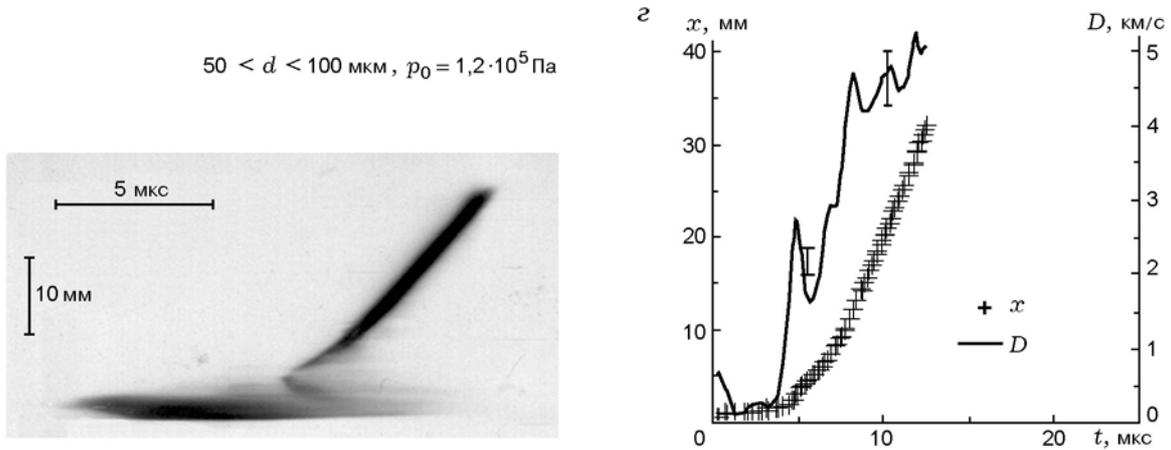


Рис. 4. Иницирование заряда тэна (окончание)

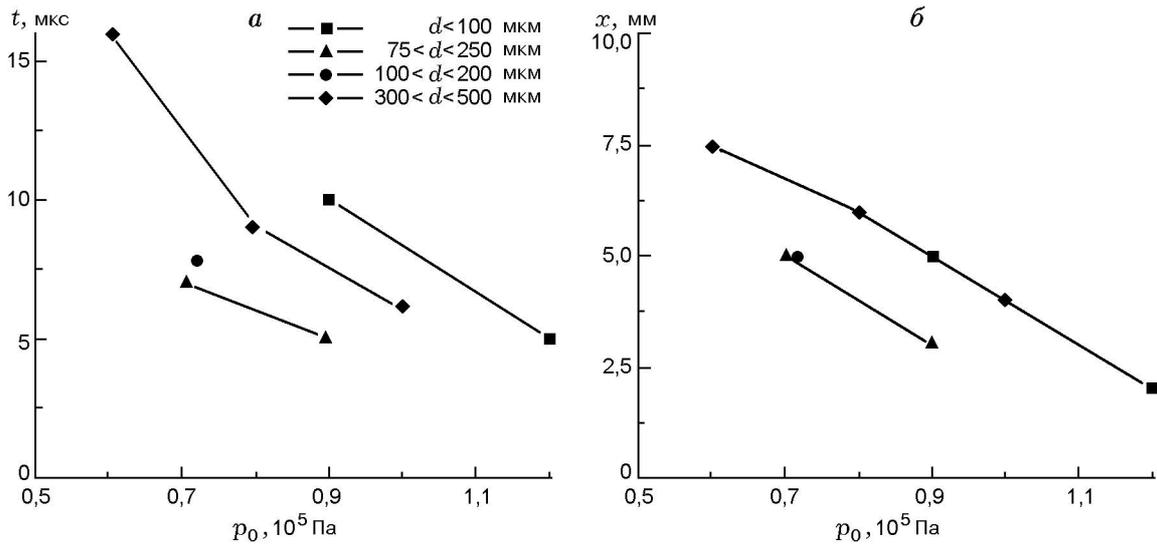


Рис. 5. Зависимости задержки (а) и глубины иницирования (б) от начального давления газовой смеси для зарядов тэна с разным размером частиц

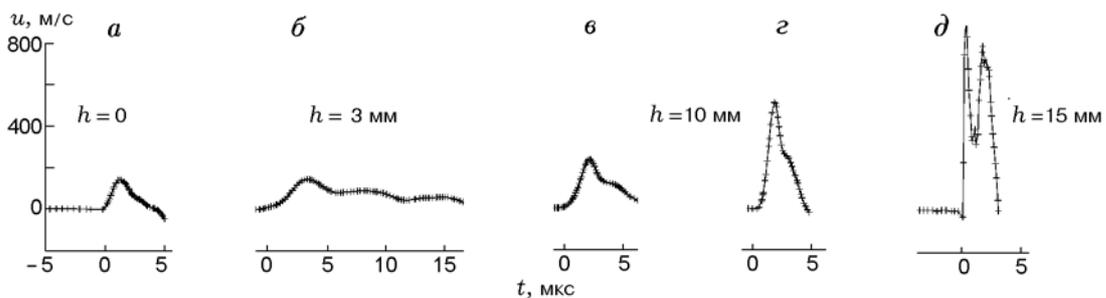


Рис. 6. Профили массовой скорости на разной глубине в заряде тэна, иницируемом перескачкой ДВ при $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$, $75 < d < 250 \text{ мкм}$, $\rho = 1 \text{ г/см}^3$:

давление в волне иницирования: а — $p = 0,2 \cdot 10^8 \text{ Па}$; б — $p = 0,2 \cdot 10^8 \text{ Па}$; в, г — $p = 2,4 \cdot 10^8 \text{ Па}$ и $p = 5,2 \cdot 10^8 \text{ Па}$ соответственно; д — $p = 14 \cdot 10^8 \text{ Па}$