

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЗГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В СМЕСЯХ МЕТАЛЛ — СЕРА

Ф.-Х. Джетте<sup>1</sup>, С. Горошин<sup>1</sup>, А. Дж. Хиггинс<sup>1</sup>, Дж. Дж. Ли<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет МакГилла, Монреаль, Канада, andrew.higgins@mcgill.ca

<sup>2</sup>DRDC-Suffield, Рэлстон, Канада

Изучалась возможность непрерывного распространения ударной волны за счет реакции в образцах из смесей цинк — сера и марганец — сера, нагружаемых ударной волной от взрыва заряда пентолита. Исследовались образцы различной номинальной плотности (62 и 86 % от теоретически возможной), диаметром 50 мм, помещенные в легкую оболочку. По длине образцов ( $\leq 280$  мм) устанавливались пьезоэлектрические игольчатые датчики. Результаты экспериментов показали, что во всех четырех типах образцов ударная волна, введенная в образец, быстро затухает и переходит в акустическую. Более того, в высокоплотных образцах часть образца, максимально удаленная от взрывчатого вещества, оставалась целой и непрореагировавшей, что ясно свидетельствует о том, что волна после прохождения 100 мм вдоль образца не в состоянии инициировать реакции. На основании этого сделано заключение, что энергии, передаваемой от реакции вперед в ударную волну, недостаточно для предотвращения ее затухания при распространении по образцу.

Ключевые слова: безгазовая детонация, ударная волна, смеси Zn + S, Mn + S.

### ВВЕДЕНИЕ

В начале 1990-х годов авторы работ [1, 2] предложили методы приближенного расчета адиабаты Гюгонно продуктов реакций для ударной волны (УВ) в порошковых реагирующих смесях, таких как термиты и СВС-композиции. Они обнаружили, что в ряде случаев, даже когда реакция предполагалась безгазовой, кривая Гюгонно продуктов реакций на плоскости давление — удельный объем ( $p-v$ ) лежит выше начального состояния непрореагировавшей смеси. Было установлено, что это происходит: при относительно небольшой начальной пористости смеси, при достаточно высокой экзотермичности реакции, при достаточно большом объемном расширении. Во всех этих случаях существует классическое решение для скорости детонации Чепмена — Жуге (см. [3]) на основе законов сохранения массы, импульса и энергии.

Существование такого решения стимулировало проведение экспериментов с целью зарегистрировать такую безгазовую детонацию. В работе [4] справедливо отмечалось, что трудности проведения экспериментов связаны со

степенью изученности кинетики реакции: не зная кинетику, нельзя оценить минимальный размер заряда, при котором реакция завершается до того, как боковая разгрузка снижает давление и температуру\*. Кроме того, ударное давление и длительность импульса для инициирования реакций также зависят от кинетики. Авторы [4] провели предварительные эксперименты с прессованными зарядами Ti + C + Al + парафин (массовое содержание компонентов 48:12:90:12 %) диаметром 50 мм и длиной 200 мм, которые инициировались зарядом ТНТ. Наблюдалось затухание УВ с последующим ее ускорением от 1.6 до 2.5 км/с. В этих экспериментах парафин служил источником газа, поэтому авторы полагали, что хотя то, что они наблюдали, не было полностью безгазовой реакцией, результаты все же можно рассматривать как предварительное свидетельство существования безгазовой детонации.

Позднее авторы [6] зарегистрировали тра-

\*Заметим, что верхний предел для времени реакции можно получить, если полагать, что реакция определяется диффузионным механизмом. При использовании простых расчетов, как в [5], для порошков с размером частиц порядка  $10^{-6}$  м получены времена реакций больше  $10^{-2}$  с. Если скорость звука в материале порядка  $10^3$  м/с, то простые «размерные соображения» говорят о том, что критический диаметр, необходимый для наблюдения распространения, должен быть намного больше метра.

F. Jetté<sup>1</sup>, S. Goroshin<sup>1</sup>, A. J. Higgins<sup>1</sup>, J. J. Lee<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>McGill University, Montréal, Québec, Canada.

<sup>2</sup>DRDC-Suffield, Ralston, Alberta, Canada.

екторию фронта реакции, используя ионизационные датчики в высокоплотных (с низкой пористостью) смесях  $Mn + S$  (диаметр 25 мм, длина 100 мм), инициируемых зарядами нитрометана, сенсibilизированного 15 % диэтилентриамина. Смесь  $Mn + S$  представляется достаточно перспективной для использования, благодаря большому теплу реакции ( $\Delta H = -2.46$  кДж/г для реакции  $Mn + S \rightarrow MnS$ ) и образованию безгазовых продуктов при умеренных давлениях. В одном эксперименте [6] наблюдался эффект, который авторы интерпретировали как повторное ускорение фронта в твердой смеси  $Mn + S$  от 1.8 до 2.2 км/с после 40 мм пробега по образцу. Авторы [7] повторили подобные эксперименты с образцами большего диаметра (50 мм) и с более мощным инициирующим зарядом (С-4). Движение УВ отслеживалось пьезоэлектрическими игольчатыми датчиками. Ускорения УВ не обнаружено, вместо этого наблюдалось затухание скорости ударного скачка от значения, большего 4 км/с, до 1.36 км/с на дистанции 50 мм.

Несмотря на это, авторы [8] полагают, что ускорение УВ в системе  $Mn + S$  в конце концов должно наблюдаться, тогда как авторы [9] считают, что смесь  $Mn + S$  не вполне подходит для безгазовой детонации. Конечно, авторы [9] представляют, что  $MnS$  испытывает необратимый фазовый переход при высоких давлениях, который не допускает, чтобы плотность продуктов была меньше, чем плотность исходной смеси. Эта усадка может компенсировать объемное расширение, вызванное высвобождением химической энергии, и препятствовать передаче энергии к ударной волне. Наконец, в работе [10] была получена оценка скорости\* детонации в смеси  $Mn + S$ , которая составила около 2.77 км/с, и проведено ее сопоставление со скоростью фронта реакции из работы [6].

Одна из последних попыток получить безгазовую детонацию в смеси металл — сера предпринята авторами [11]. В работе регистри-

\*Теоретическая модель Болховитинова и Бацанова состоит в нахождении замены для отношения удельных теплоемкостей  $\gamma$  в решении для скорости детонации Чепмена — Жуге в идеальных газах  $D^2 = 2Q(\gamma - 1)$  в виде  $\gamma = 2b - 1$ , где  $b$  — тангенс угла наклона линейной аппроксимации адиабаты Гюгонио продуктов реакции на плоскости «ударная скорость — массовая скорость». При этом не принималась во внимание начальная плотность непрореагировавшей смеси. В модели этих авторов одна и та же скорость детонации может быть получена вне зависимости от того, была исходная смесь совершенно непористой или сильнопористой.

ровались времена входа и выхода УВ, проходящей по смеси порошков  $Zn + S$  (размер частиц  $3 \div 5$  мкм) плотностью  $59.4 \div 71.6$  % от теоретически возможной, в цилиндрических образцах диаметром 16.5 мм и длиной  $40 \div 200$  мм, которые инициировались зарядами тротил/гексоген (высота 35 мм, диаметр 40 мм). Из сравнения средних скоростей УВ в образцах разной длины сделано заключение, что ударная скорость сначала уменьшалась до 1.3 км/с в образцах длиной менее 60 мм, но затем увеличивалась от 1.4 км/с до значений, осциллирующих вблизи 2.2 км/с, в образцах длиной более 100 мм. Ускорение УВ «рассматривается как экспериментальное доказательство появления твердофазной детонации в исследуемой системе» [11]. Заметим, что экзотермичность реакции  $Zn$  с  $S$  подобна экзотермичности реакции  $Mn$  с  $S$  ( $\Delta H = -2.09$  кДж/г для реакции  $Zn + S \rightarrow ZnS$ ).

Однако, если средние скорости, зарегистрированные в [11], использовать для построения  $(x-t)$ -диаграммы движения волны в образцах, то по ним очень трудно обнаружить систематическое ускорение или торможение волны (рис. 1). Разброс данных [11] скорее может быть результатом большого изменения начальной плотности образцов или, возможно, ложных сигналов от использованных контактных датчиков, нежели следствием ускорения и осцилляций скорости ударного фронта. Тем не менее, в последующих работах [9, 10, 12] предприняты попытки сопоставить полученное в

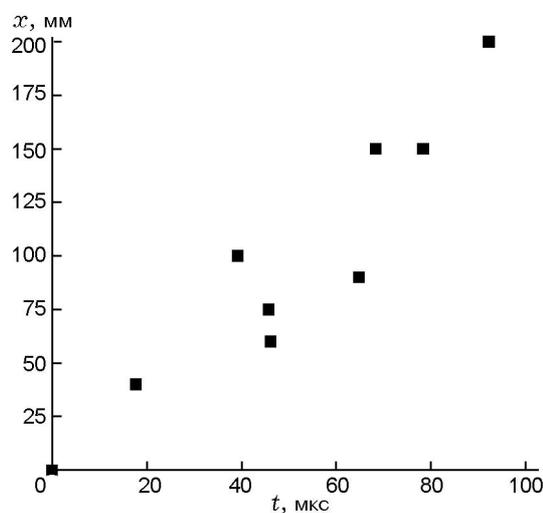


Рис. 1. Значения скоростей из работы [11], представленные в  $x-t$ -координатах

[11] значение скорости (2.2 км/с) с предсказанными скоростями детонации (2.56 км/с для смеси  $Zn + S$ , см. [10]), а также объяснить осциллирующее поведение скорости [9]. Наконец, автор [12] рассчитал, что скорость звука в порошковой смеси  $Zn + S$  должна лежать в диапазоне  $0.53 \div 0.77$  км/с, и пришел к заключению, что измеренная скорость волны 2.2 км/с была сверхзвуковой.

В данной работе основное внимание уделено составам на основе серы. Однако ранее предпринимались аналогичные попытки обнаружить безгазовую детонацию в других безгазовых или с малым выделением газа композициях, таких как  $Zn + Te$  [8] и алюминий + тефлон [13, 14]. Несмотря на то, что результаты некоторых из этих экспериментальных исследований можно рассматривать как существование стационарной или усиливающейся УВ, вызванной выделением химической энергии из этих композиций, реализация самоподдерживающейся волны, распространяющейся со сверхзвуковой скоростью на расстояние, равное значительному числу диаметров заряда, в конечном счете не была установлена.

Таким образом, доказательства существования безгазовой детонации в системах металл — сера (так же, как и в других упомянутых выше системах) не являются однозначными и основаны, главным образом, на отдельных фактах кажущегося ускорения УВ либо фронта реакции или на видимых стационарных скоростях УВ.

В данной работе авторы стремились повторить эксперименты [11] с дополнительными смесями и плотностями. Образцы  $Mn + S$  и  $Zn + S$  высокой плотности (низкой пористости), приготовленные, как описано в [6, 7], а также образцы  $Mn + S$  и  $Zn + S$  низкой плотности (высокой пористости), подготовленные по методике [11], ударно нагружались мощным ВВ, и траектория УВ регистрировалась на расстоянии по меньшей мере 200 мм при помощи пьезоэлектрических игольчатых датчиков (пин-датчиков).

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема экспериментов показана на рис. 2. Стехиометрические смеси  $Mn + S$  и  $Zn + S$  (частицы металла размером  $1 \div 5$  мкм, очищенная сера — 100 mesh ( $<149$  мкм)) готовили в картонных трубах с внутренним диаметром

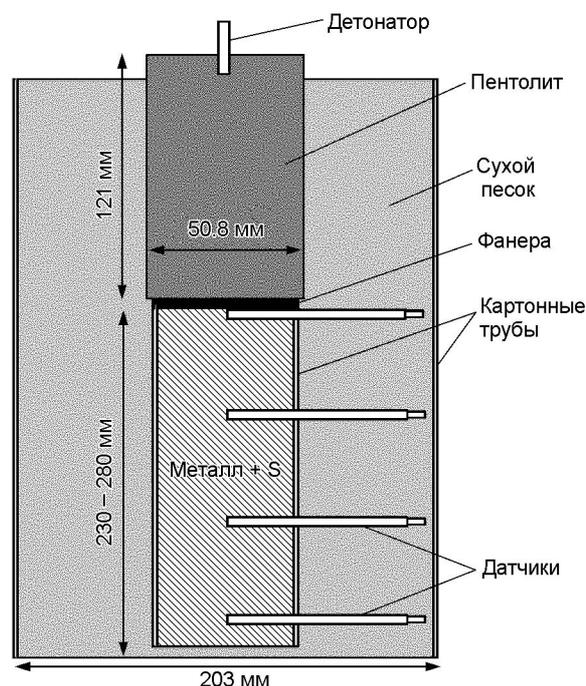


Рис. 2. Экспериментальная сборка

50.8 мм. Образцы высокой плотности готовили так же, как в [15]. Металл и серу хорошо перемешивали в вальцовой мельнице и затем нагревали до тех пор, пока сера не начинала плавиться. Полученную смесь металлического порошка, взвешенную в расплавленной сере, заливали в картонную трубу и оставляли в ней до застывания. Такая технология обеспечивала плотность образцов в диапазоне  $81 \div 88$  % от теоретически максимальной. Образцы низкой плотности готовили ручной прессовкой хорошо перемешанного порошка в картонной трубе, что давало плотность образцов  $59 \div 66$  % от теоретической. Чтобы гарантировать однородную плотность по образцу, порошок загружали порциями по 200 г и каждую порцию прессовали пластмассовым стержнем. Смесь всегда вводили снизу, чтобы гарантировать, что верхняя поверхность образца будет плоской и однородной.

Пьезоэлектрические игольчатые датчики ударной волны (Dynasen SA-1135) устанавливали в различных точках вдоль образца, как показано на рис. 2. В экспериментах с образцами низкой плотности датчики просто вдавливали в образец. При использовании образцов высокой плотности датчики клеивали в нужной позиции перед заливкой образца. Датчики ударной волны устанавливали так, чтобы их

концы, в которых находились пьезоэлектрические кристаллы, были в центре образца, что позволяло регистрировать самое раннее появление искривленного ударного фронта в каждой точке по оси. Установленные таким образом датчики давали сигнал отрицательной полярности при подходе УВ. Поскольку пьезоэлектрический кристалл датчиков нагружался по боковой поверхности, то происходило некоторое уменьшение чувствительности (примерно наполовину) и генерировался сигнал обратной полярности по сравнению с нагружением датчика со стороны верхнего конца (см., например, [16]). В лабораторных тестах отклик датчика, нагружаемого сбоку, был таким же быстрым, как и у датчика, нагружаемого со стороны верхнего конца в ПММА при давлениях ниже 6.5 ГПа. Благодаря высокой чувствительности датчиков (при легком постукивании пальцем по верхнему концу возникал сигнал измеряемой величины), размещение их боком не приводило в наших опытах к заметным потерям чувствительности и/или времени отклика. На тестируемый образец помещался заряд пентолита (50/50 ТНТ/тэн, Dynonobel D45) диаметром 50.8 мм, длиной 121 мм, массой 460 г. Между образцом и зарядом устанавливалась прослойка из фанеры толщиной 3 мм, чтобы исключить контакт между продуктами детонации пентолита и образцом металл — сера. Заряд пентолита инициировали электрическим детонатором. Внутри верхней части пентолитового заряда помещали волоконно-оптический кабель, и фотодиод регистрировал появление детонации. Этот сигнал фотодиода использовался для запуска всей аппаратуры (все приводимые далее данные соотносятся с этим временем запуска). Чтобы уменьшить скорость спада ударного давления из-за боковой разгрузки, заряд и образец помещали внутри картонной трубы диаметром 203 мм и свободное пространство между образцом, зарядом и стенкой трубы заполняли песком. Из-за низкой скорости звука в песке (см., например, [17]) никакие волны-предвестники не могли повлиять на распространение УВ в образцах или исказить показания датчиков до подхода ударного фронта в тестируемом образце. К тому же, песок предотвращал разрушение продуктами детонации коаксиальных кабелей, передававших сигналы датчиков на регистрирующие осциллографы (LeCroy Wavesurfer 424).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сигналы, зарегистрированные в образцах высокой плотности, показаны на рис. 3 (сигналы от разрушенных датчиков обрезаны, чтобы не загромождать рисунок). Очень резкие сигналы, такие как в нижней части рис. 3, *a, б*, были ослаблены в 2–4 раза для удобства воспроизведения. Вертикальное смещение между различными сигналами соответствует номинальному расстоянию между датчиками в дюймах. Например, на рис. 3, *a* первый датчик расположен непосредственно около пентолитового заряда, а другие — на расстояниях 4'' (101.6 мм), 8'' (203.2 мм) и 11'' (279.4 мм) от заряда.

Датчик, размещенный возле пентолитового заряда, зарегистрировал острый пик, харак-

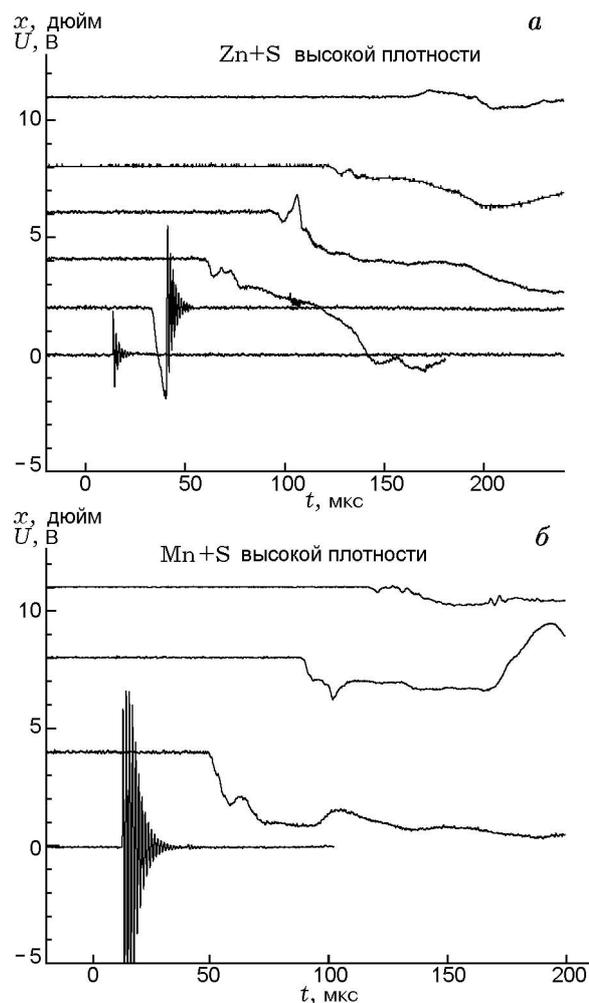


Рис. 3. Сигналы пьезоэлектрических датчиков в экспериментах с образцами Zn + S плотностью  $81 \div 88$  % (*a*) и Mn + S плотностью  $85 \div 88$  % (*б*) от теоретической

терный для разрушения пьезоэлектрического кристалла при воздействии интенсивного скачка давления. По мере движения волны вниз по образцу сигналы становились намного более продолжительными, что означает, что кристалл датчика не разрушался. Поскольку эти сигналы менее резкие, ошибка в определении времени подхода УВ несколько больше, чем при более резких сигналах. Амплитуда сигналов также уменьшалась, что свидетельствует о затухании УВ и ее переходе в акустическую волну.

Сигналы, зарегистрированные в образцах низкой плотности, показаны на рис. 4 (как и на рис. 3, для удобства воспроизведения очень

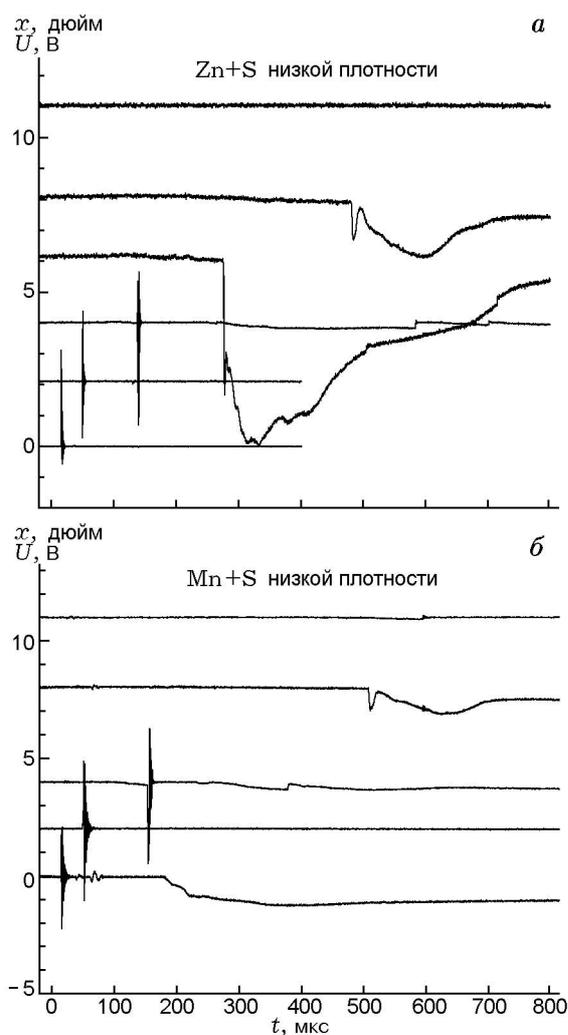


Рис. 4. Сигналы пьезоэлектрических датчиков в экспериментах с образцами Zn + S плотностью  $64 \div 66 \%$  (а) и Mn + S плотностью  $59 \div 61 \%$  (б) от теоретической

резкие сигналы ослаблены в 2–4 раза). Как и в образцах высокой плотности, УВ быстро ослабевает и превращается в акустическую волну с уменьшающейся амплитудой. Затухание было таким, что на самом дальнем от пентолитового заряда датчике (279.4 мм или 11") давление падало ниже уровня регистрации.

На рис. 5 нанесены все данные по регистрации движения УВ в опытах с образцами высокой плотности. Скорость волны быстро уменьшается (меньше чем через 150 мм пробега) до постоянного значения  $\approx 2.5$  км/с для смеси Mn + S и 1.8 км/с для смеси Zn + S (штрихпунктирные линии на рисунке). Никакого повторного ускорения на расстояниях больше 150 мм не наблюдалось.

Расчет аддитивным методом [18] ударной адиабаты инертной смеси Mn + S при 100 %-й теоретической плотности показывает, что линейное приближение к ударной адиабате на плоскости  $U-u$  пересекает ось ординат в точке 2.5 км/с ( $U, u$  — ударная и массовая скорости соответственно). Обычно эта величина близка к скорости звука в материале. Скорость затухающей УВ в наших экспериментах близка к этому значению. Подобная оценка скорости звука в смеси Zn + S составила 2.16 км/с, что несколько больше значения 1.8 км/с, полученного нами в опытах с Zn + S, но мы использовали смеси плотностью немного меньше 100 % от теоретически возможной. В целом представляется, что в обеих смесях волна за-

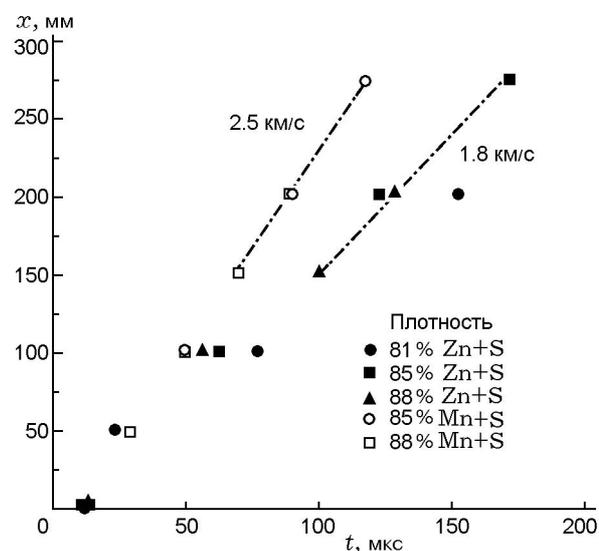


Рис. 5. Все данные по времени прихода УВ на датчики для образцов высокой плотности

тухала до акустической, скорость которой приближалась к теоретической оценке. Интересно отметить (см. рис. 5), что плотность одного образца  $Zn + S$  была меньше, чем двух других. Затухание в этом образце было еще быстрее, а конечная скорость еще ниже, что согласуется с предположением о меньшей скорости звука в менее плотной смеси. Эти данные также показывают, что в образцах различной плотности возможен большой разброс времен прихода УВ.

На рис. 6 нанесены данные по времени подхода УВ, полученные во всех экспериментах с образцами низкой плотности (высокой пористости). Видно (см. штрихпунктирную линию), что в обеих порошковых смесях скорость волны снижается до постоянного значения  $\approx 0.22$  км/с. Так же как и в образцах высокой плотности, повторное ускорение волны не наблюдалось в противоположность результатам, приведенным в [11]. Как упоминалось во введении, в [12] оценка скорости звука в смеси  $Zn + S$  плотностью 67 % от теоретической составила  $0.53 \div 0.77$  км/с. Таким образом, конечная скорость волны, измеренная в настоящей работе, того же порядка, что и теоретическая оценка.

Полезно отметить, что часть образца длиной от 50 до 160 мм, отсчитываемых от нижней его части, сохранялась целой и совершенно непрореагировавшей для каждой исследованной смеси высокой плотности. Для образцов длиной 230 мм сохранялись последние 50 ÷

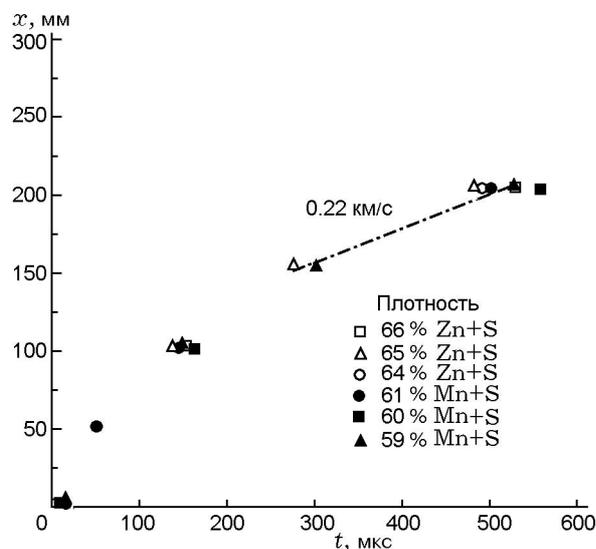


Рис. 6. Все данные по времени прихода УВ на датчики для образцов низкой плотности

90 мм, в то время как для образцов длиной 280 мм — последние 80 ÷ 160 мм. Ослабленная волна была не в состоянии инициировать реакции. К сожалению, образцы из смеси низкой плотности не удавалось сохранить после опытов, так как картонной оболочки и забойки из песка для этого недостаточно. Поэтому невозможно уверенно определить, реагировала ли в опытах часть образца или весь образец.

В экспериментах, проведенных с ампулами сохранения [15], обнаружено, что смесь  $Mn + S$  высокой плотности легко инициируется относительно слабыми УВ ( $\approx 2$  ГПа). В то же время по регистрации светимости установлено [19], что в течение первых 100 мкс после входа УВ в такую же смесь практически никакой экзотермической реакции не наблюдается. Таким образом, как показывают результаты, реакции могут инициироваться ударной волной локально, в отдельных «горячих точках», где существуют неоднородности плотности, однако объемная реакция распространяется как классическое термодиффузионное пламя. Поэтому можно утверждать, что в проведенных сериях экспериментов реакции могли быть инициированы локально вблизи пентолитового заряда, где УВ наиболее сильная, и распространялись медленно по диффузионному механизму. Когда сильная боковая разгрузка растягивала образец, жидкие реагирующие участки были «сдuty» с непрореагировавших частей, при этом оставался непрореагировавший кусок в образцах высокой плотности. Образцы малой плотности сохранить не удавалось, однако если бы окружающая оболочка была более прочной, то мы могли бы сохранить продукты реакции:  $ZnS$  или  $MnS$  так же, как сообщалось в [11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В противоположность результатам работы [11] мы не наблюдали ускорения ударного фронта в образцах  $Zn + S$  (так же, как и в образцах из смеси  $Mn + S$ ) диаметром 50.8 мм, помещенных в легкую оболочку, а, наоборот, регистрировали затухающую УВ, скорость которой быстро устанавливалась вблизи значения скорости звука в материале. Эта затухающая волна была слишком слабой, чтобы инициировать реакции у основания плотных образцов.

Поскольку диаметр образца в наших экспериментах был в три раза больше, чем в экспериментах [8, 11], вероятность наблюдать де-

тонацию в наших экспериментах была выше (т. е. в наших экспериментах была больше вероятность того, что диаметр образца превышал гипотетический критический диаметр, необходимый для детонации смеси). Так как мы не наблюдали детонацию, полученные нами результаты не дают никаких доказательств существования нового типа быстрой реакции или механизма переноса, предложенных в [11]. Точнее, по нашему мнению, все результаты, полученные в нашей работе, могут быть объяснены известными механизмами переноса.

Исследование возможности существования безгазовой детонации путем проведения опытов, подобных тем, которые поставлены в данной работе, требует использования достаточно длинных зарядов, чтобы однозначно наблюдать установившееся распространение, не подверженное влиянию заряда-донора. Так как гипотетический критический диаметр и амплитуда инициирующей УВ, необходимые для детонации этих композиций, неизвестны, то эксперименты должны проводиться со все большими диаметрами и размерами, а также с зарядами-донорами различной мощности, до тех пор пока не будет обнаружена детонация. Следовательно, подобное направление проведения экспериментов нецелесообразно, пока не будут оценены временной и пространственный масштабы детонационного процесса в интересующем материале. Альтернативный подход, заключающийся в попытке измерить время возникновения существенной экзотермической реакции при прохождении УВ через образец для того, чтобы определить, сопоставим ли временной масштаб экзотермической реакции с распространением детонации, может быть более продуктивной стратегией в рамках лабораторных исследований.

Работа выполнена при поддержке Канадского департамента обороны (контракт W7702-07R156/001/EDM). Авторы выражают благодарность за содействие Rick Guilbeault из CERL, Оттава, и Malcolm Cairns за помощь в проведении экспериментов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Boslough M. B.** A thermochemical model for shock-induced reactions (heat detonations) in solids // *J. Chem. Phys.* — 1990. — V. 92, N 3. — P. 1839–1848.
2. **Bennett L. S., Horie Y.** Shock-induced inorganic reactions and condensed phase detonations // *Shock Waves.* — 1994. — V. 4. — P. 127–136.
3. **Fickett W., Davis W. C.** Detonation: Theory and Experiment. — Univ. of California Press, 1979.
4. **Merzhanov A. G., Gordopolov Yu. A., Trofimov V. S.** On the possibility of gassless detonation in condensed systems // *Shock Waves.* — 1996. — V. 6. — P. 157–159.
5. **Thadhani N. N.** Shock-induced and shock-assisted solid-state chemical reactions in powder mixtures // *J. Appl. Phys.* — 1994. — V. 76, N 4. — P. 2129–2138.
6. **Jiang J., Goroshin S., Lee J. H. S.** Shock wave induced chemical reaction in Mn + S mixture // *Proc. of the APS Shock Compression of Condensed Matter.* — 1997. — P. 655–658.
7. **Lee J. H. S., Goroshin S., Yoshinaka A., Romano M., Jiang J., Hooton I., Zhang F.** Attempts to initiate detonations in metal-sulphur mixtures // *Proc. of the APS Shock Compression of Condensed Matter.* — 1999. — P. 775–778.
8. **Гурьев Д. Л., Гордополов Ю. А., Бацанов С. С.** Твердофазный синтез ZnTe в ударных волнах // *Физика горения и взрыва.* — 2006. — Т. 42, № 1. — С. 130–137.
9. **Бацанов С. С., Гордополов Ю. А.** Пределы скорости твердофазной детонации // *Физика горения и взрыва.* — 2007. — Т. 43, № 5. — С. 104–106.
10. **Болховитинов Л. Г., Бацанов С. С.** К теории твердофазной детонации // *Физика горения и взрыва.* — 2007. — Т. 43, № 2. — С. 108–110.
11. **Gur'ev D. L., Gordopolov Yu. A., Batsanov S. S., Merzhanov A. G., Fortov V. E.** Solid-state detonation in the zinc-sulfur system // *Appl. Phys. Lett.* — 2006. — V. 88. — P. 024102-1–024102-3.
12. **Batsanov S. S.** An additive method for calculation of the sound velocity in porous materials // *Inorganic Materials.* — 2007. — V. 43, N 10. — P. 1070–1072.
13. **Долгобородов Ю. А., Махов М. Н., Колбанев И. В., Стрелецкий А. Н., Фортов В. Е.** Детонация в смесях алюминий — тефлон // *Письма в ЖЭТФ.* — 2005. — Т. 81, № 7.
14. **Mock W. Jr., Holt W. H.** Impact initiation of rods of pressed polytetrafluoroethylene (PTFE) and aluminum powders // *Proc. of the APS Shock Compression of Condensed Matter.* — 2005. — P. 1097–1100.
15. **Jetté F. X., Goroshin S., Higgins A. J.** Shock reactivity of non-porous mixtures of manganese and sulfur // *Proc. of the APS Shock Compression of Condensed Matter.* — 2007. — P. 1033–1036.
16. **Asch G.** Les Capteurs en Instrumentation Industrielle. — Dunod, 1982.

17. **Oelze M. L., O'Brien, Jr. W. D., Darmody R. G.** Measurement of attenuation and speed of sound in soils // Soil Sci. Soc. Amer. J. — 2002. — V. 66. — P. 788–796.
18. **Batsanov S. S.** Effects of Explosions on Materials. — Springer-Verlag, 1994.
19. **Jetté F. X., Goroshin S., Higgins A. J.** Time-resolved temperature measurements of shock initiation in a manganese-sulfur mixture // Proc. of the APS Shock Compression of Condensed Matter. — 2007. — P. 1037–1040.

*Поступила в редакцию 29/V 2008 г.*

---