

массы элемента при ускорении. Относительно сильная деформация элемента связана с большим временем разгона и растеканием материала ударника после его выхода из обтюлятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Баум, Л. П. Орленко и др. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
2. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др. ЖЭТФ, 1960, 38, 3, 790.
3. Г. И. Канель, А. М. Молодец, А. А. Воробьев. ФГВ, 1974, 10, 6, 884.
4. В. А. Огородников, С. Ю. Пинчук и др. ФГВ, 1981, 17, 1, 133.
5. В. М. Титов, Ю. И. Фадеев, И. С. Титова. Докл. АН СССР, 1968, 180, 5, 1051.
6. В. Ф. Лобанов, С. М. Караханов, С. А. Бордзиловский. ФГВ, 1982, 18, 3, 90.

Поступила в редакцию 22/XI 1985

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И МАССОВОЙ СКОРОСТИ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ¹

И. А. Ургьев, Р. М. Эрикссон, Б. Хейс, М. Л. Паркер²

(Ливермор)

Для описания свойств материалов с помощью уравнения состояния надо знать, и как можно детальней, как они ведут себя в условиях динамического нагружения. Длительное время единственными были измерения скорости ударной волны (УВ), которые в некоторых случаях не очень чувствительны к изменениям других, более важных параметров,— давления p и массовой скорости u . Особенно это относится к случаям, когда поток за фронтом УВ не стационарный, а зависящий от времени в связи с возникновением новых процессов, вызванных УВ.

Параметры нестационарной реагирующей среды могут быть довольно сложными и потребовать тончайших измерений и высокоточной аппаратуры. Необходимость измерения u и p в реагирующей среде как раз и послужила стимулом для выполнения данной работы.

Манганиновые датчики давления и датчики массовой скорости были применены для измерений в реагирующей среде, а также для подробного изучения формы волны Тейлора в детонирующих мощных ВВ.

В особых случаях, когда рассматриваются прозрачные среды и движение свободной поверхности в вакуум, массовая скорость регистрируется оптическим измерителем скорости Фабри — Перо. Оптические приборы имеют следующие преимущества: их не нужно соединять с экспериментальной сборкой, они дают высокое временное разрешение и точность. Кроме того, использование фольгового датчика на той же контактной поверхности позволяет проводить независимые измерения, которые затем можно использовать для перекрестной проверки результатов.

В работе [1] приведено описание сегнетоэлектрического датчика. В отличие от манганинового он прост в применении, не требует источника питания и не нуждается в обширной калибровке.

Системы фольговых датчиков для измерения массовой скорости

Магнитные поля и рентгеновские лучи, по-видимому, единственно широко используемые типы излучения, способного проникать в области с высокой плотностью, которые создаются под действием ударных волн и детонации. Системы тонких фольговых датчиков на основе этих эффек-

¹ Перевод Т. П. Савельевой под ред. С. М. Караханова.

² Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса, Калифорния, США.

тов непосредственно связаны с уравнением неразрывности

$$\rho \frac{dp}{dt} + \frac{\partial u}{\partial r} + n \frac{\partial u}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

где $n = 0, 1$ и 2 для плоской, цилиндрической и сферической геометрии соответственно; ρ — плотность (другие обозначения общеприняты). К сожалению, невозможно получить рентгеновские снимки с разрешением во времени; это жесткое ограничение приводит к получению качественных, а не количественных данных. Тем не менее в [2] удалось извлечь полезную информацию из дважды экспонированной пленки по определению смещения набора тонких фольг. В отличие от этого, электромагнитные датчики для измерения массовой скорости позволяют получить сигналы с высоким временным разрешением.

Электромагнитный датчик массовой скорости из-за того, что ранние результаты, полученные с его помощью, оказались неточными, в течение длительного времени находил весьма ограниченное применение. Идея метода принадлежит Е. К. Завойскому. В работе [3] вновь применена эта методика, а в [4, 5] она доработана. Эти датчики используются как стандартная диагностическая методика в экспериментах, проводимых на четырехдюймовой пушке.

Нами применяются два типа датчиков массовой скорости: Фарадея и Лоренца. Оба они преобразуют скорость смещения в эквивалентное электрическое напряжение. Причина разделения их на два типа заключается в том, что датчик Фарадея представляет собой устройство с низким импедансом, которое может работать в проводящих продуктах детонации без защитной изоляции, а датчик Лоренца должен быть армирован защитным пластиком для поддержания его целостности в агрессивной среде. Дополнительное пластиковое покрытие увеличивает толщину датчика, что, в свою очередь, приводит к повышению инерционности системы и к ограничению временного разрешения до долей микросекунд, в отличие от желаемых нескольких наносекунд.

Работа датчика Фарадея основана на том, что при изменении во времени магнитного потока внутри замкнутого проводящего контура возникает циркулирующий электрический ток:

$$I = \frac{1}{Z} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

где Z — импеданс контура; $\Phi = \oint \vec{B} \cdot \vec{N} dG$ — магнитный поток; \vec{B} — плотность потока; \vec{N} — единичный вектор нормали; G — геометрия контура. Считая, что импеданс цепи Z есть конечная нагрузка линии, передающей сигнал датчика, и используя прямоугольный проводящий контур, в котором площадь изменяется пропорционально скорости фольги, имеем

$$V = hBu \quad (3)$$

(h — расстояние между выводами).

Чтобы получить эквивалентное выражение для датчика Лоренца, отметим, что сила, связанная с разделением электрического заряда, может быть записана как

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}). \quad (4)$$

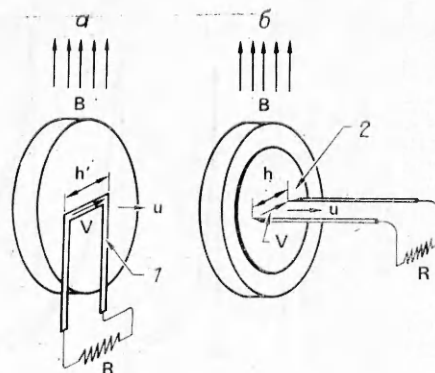
В (4) напряженностью электрического поля \vec{E} можно пренебречь по сравнению с членом Лоренца $\vec{u} \times \vec{B}$; \vec{F} — сила; Q — электрический заряд. Для прямоугольной геометрии имеем

$$F/Q = V/h' = \vec{u} \times \vec{B} \quad (5)$$

(h' — среднее расстояние между выводами контура). Чтобы сделать выражения для датчиков Лоренца и Фарадея эквивалентными, необходимо

Рис. 1. Схемы датчиков Лоренца (а) и Фарадея (б) для измерения массовой скорости, используемых при исследованиях ударно-волновых и детонационных процессов.

1 — тонкая медная фольга; 2 — тонкий медный диск.



показать, что $h = h'$. Эксперименты, ранее не публиковавшиеся, выполнялись с датчиками, помещенными в тефлон. Показано, что при тщательных измерениях и условии точности изготовления может быть достигнута разница в результатах $\approx 1\%$. В настоящее время используются датчики, показанные на рис. 1. Их можно изготовить в зависимости от назначения из меди или алюминия. Заметим, что медь, хотя она не так хорошо согласуется по импедансу, в продуктах детонации работает лучше, чем алюминий.

Использование данных по массовой скорости

Профили массовой скорости полезны для обоснования теоретических моделей. Эксперименты с набором датчиков дают информацию на преддетонационном участке, а также данные, связанные с волной разгрузки за детонационным фронтом. Результаты, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о нарастании скорости УВ на преддетонационном участке. На рис. 3 показаны данные эксперимента с набором датчиков в детонирующем ВВ, которые сопоставлены с расчетными результатами по нашей модели скорости реакции.

Точные профили массовой скорости за детонационным фронтом обеспечивают дополнительную информацию об изменении удельного объема v и давления по гидродинамическим линиям тока, и эти данные легко преобразуются в соответствующие профили v и p . Хотя принципы такой трансформации уже описаны в [6], для внедрения их в практику сделано очень немного.

Анализ возможен только при условии, что детонационная волна (ДВ) распространяется с постоянной скоростью. Это позволяет преобразовать уравнения неразрывности и сохранения

импульса в частных производных в обыкновенные дифференциальные, которые, в свою очередь могут быть преобразованы в замкнутые алгебраические выражения для v и p как функции массовой скорости по линиям тока за волной.

Основные предположения, касающиеся детонационного процесса, показаны на $x-t$ -диаграмме

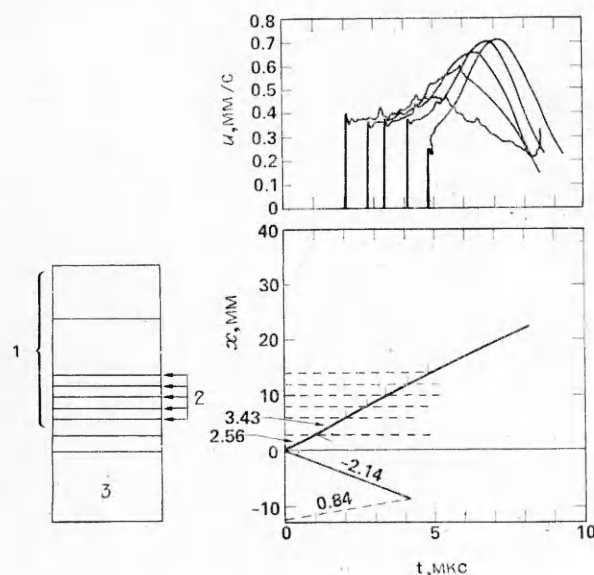


Рис. 2. Эксперимент с набором датчиков для измерения u (в мм/мкс).

1 — ВВ; 2 — датчики Лоренца; 3 — тефлон.

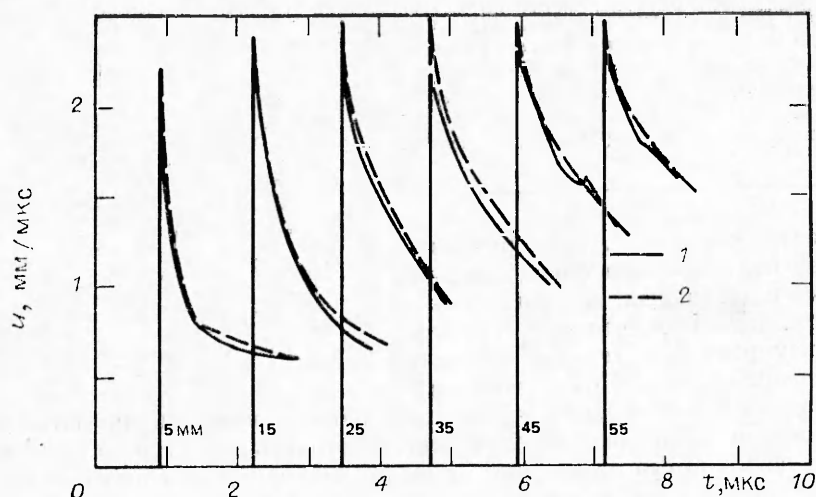


Рис. 3. Сравнение экспериментальных записей массовой скорости с расчетными профилями в детонирующем ВВ (ВХ-26-АФ). 1 — эксперимент; 2 — расчет. Датчики: 50 мкм тефлон, 25 мкм алюминий, 50 мкм тефлон. Цифры указывают положение датчиков в ВВ.

(рис. 4). Считается, что этот процесс одномерный с детонационной волной, движущейся с постоянной скоростью, а ДВ состоит из УВ, распространяющейся в непрореагировавший материал, за которой следует стационарная зона реакции.

Основной пункт анализа состоит в том, что уравнение неразрывности (только в одномерном случае) можно записать в полных дифференциалах в случае, если скорость детонации рассматривается как постоянная фазовая скорость массовой скорости Чепмена — Жуге:

$$\frac{d(v/v_0)}{d(u/D)} + \frac{X}{X_{CJ}} = 0, \quad (6)$$

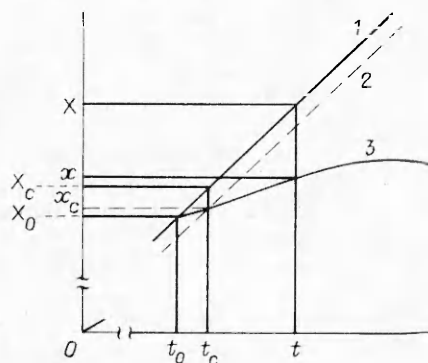
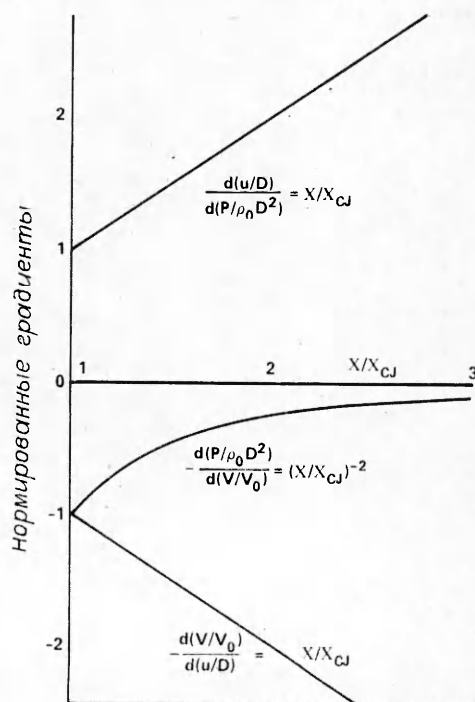


Рис. 4. $X-t$ -диаграмма движения детонационной волны, проходящей через произвольную точку X_0 . Заглавные буквы относятся к условиям на фронте, строчные используются для внутренних областей. Нижний индекс нуля относится в отдельной частице, а c к точке, связывающей установившуюся область зоны реакции и неустановившуюся область разгрузки справа от D' .

Траектории: 1 — фронта УВ $\frac{dX}{dt} = D$; 2 — состояния Чепмена — Жуге (D'); 3 — частицы $\frac{dx}{dt} = u$.

Рис. 5. Графическая интерпретация дифференциальных уравнений для одномерных волн разрежения по Хейсу [6].



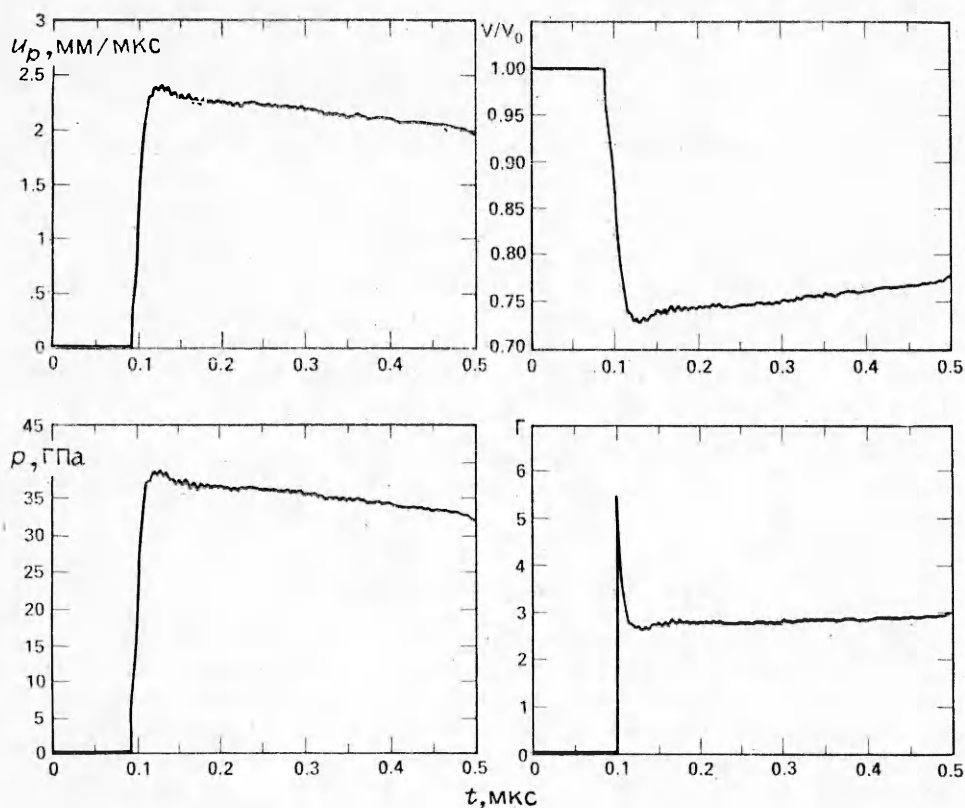


Рис. 6. Преобразование записи массовой скорости в профили удельного объема, давления и коэффициента Γ .

где $D = dX/dt = \text{const}$ — скорость детонации; X — положение фазового фронта относительно некоторой начальной величины; $v = 1/\rho$. После цифровой обработки качественного профиля массовой скорости на основе численных методов можно определить относительный удельный объем v/v_0 с помощью выражения (6). Пренебрегая массовыми силами и силами переноса, можно преобразовать уравнение импульса к виду

$$\frac{d(u/D)}{d(p/\rho_0 D^2)} - \frac{X}{X_{CJ}} = 0, \quad (7)$$

которое используется при расчете профиля p вдоль линии тока. Комбинация одномерного уравнения неразрывности с уравнением импульса приводит к простому выражению

$$\dot{p}v + \dot{u}^2 = 0, \quad (8)$$

где точка обозначает полную производную по времени. Полная система одномерных дифференциальных соотношений для постоянной фазы детонационной волны показана на рис. 5, где начальная величина абсциссы есть единица, соответствующая концу стационарной зоны реакции. По экспериментально найденным величинам p и v опреде-

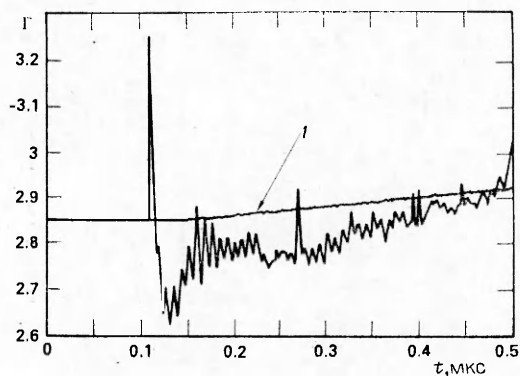


Рис. 7. Сравнение экспериментально-го профиля Γ с теоретическим, рассчитанным по уравнению состояния Джоунса — Уилкинса — Ли (1) для ВВ РВХ-9404.

ляется коэффициент Γ . Исходя из соотношений (6) и (8), запишем

$$-\frac{d \ln p}{d \ln v} = \Gamma = \left(\frac{\rho_0 D X_{CJ}}{X} \right)^2 \frac{v}{p}. \quad (9)$$

В плоскости Чепмена — Жуге (9) можно свести к известному выражению

$$\Gamma_{CJ} = D/u_{CJ} - 1.$$

Результаты показывают (рис. 6) изменение во времени параметров u , v/v_0 , p , Γ , которые восстанавливались по одной записи массовой скорости вместе с начальными условиями. Они получены в эксперименте с детонирующим РВХ-9404 (пластическим бризантным ВВ). Коэффициент Γ , будучи очень чувствительным параметром системы переменных, используется в качестве критерия для обоснования различных численных уравнений состояния. Сопоставление полученного результата с уравнением состояния Джонса — Уилкинса — Ли показывает их очень хорошее согласие (рис. 7). Начальный пик экспериментального результата можно не учитывать, так как он соответствует зоне реакции, где данный анализ неприемлем.

Измеритель скорости Фабри — Перо

Чтобы избежать физического контакта с исследуемой поверхностью материала, разработана оптическая система для измерения массовой скорости, отражающей свет поверхности внутри или снаружи исследуемого образца. Она описана в работе [7].

Система Фабри — Перо для измерения скорости включает в себя цилиндрическую и сферическую линзы, интерферометр Фабри — Перо и электронную камеру, работающую в режиме непрерывной развертки. Система регистрирует положение в зависимости от времени интерференционных полос Фабри — Перо, получаемых при доплеровском сдвиге света, отраженного от ускоряющейся мишени. Интерференционные полосы образуются в связи с тем, что интерферометр пропускает свет только под углами, определяемыми расстоянием между зеркалами Фабри — Перо и длиной волны света. Для увеличения интенсивности регистрации используется цилиндрическая линза, которая концентрирует интерференционную картину в две точки на месте каждого кольца. Точки образуются в плоскости щели электронно-оптического преобразователя, работающего в режиме непрерывной развертки. Свет, отраженный от мишени, движущейся с постоянной скоростью, несмотря на доплеровский сдвиг, дает статическую точечную картину. При ускорении мишени из-за доплеровского сдвига частота отраженного луча возрастает, и в результате получается расширяющаяся картина. Изменение интерферограммы связано с эволюцией скорости выражением

$$u(t) = \frac{\lambda c}{4L} \left[\frac{D_1^2(t) - D_{10}^2}{D_{20}^2 - D_{10}^2} + m \right],$$

где λ — начальная длина волны луча; c — скорость света; L — расстоя-

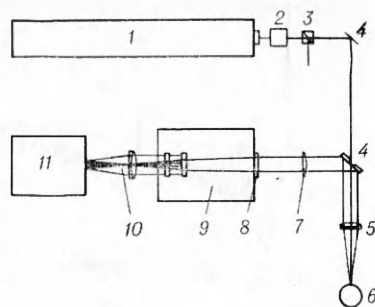


Рис. 8. Экспериментальная схема оптического измерителя скорости Фабри — Перо.

1 — аргонный лазер; 2 — ячейка Поккельса; 3 — поляризационный делитель пучка; 4 — зеркала; 5 — объект; 6 — объектив; 7 — цилиндрическая линза; 8 — фильтр; 9 — интерферометр Фабри — Перо; 10 — сферическая линза; 11 — электронная камера.

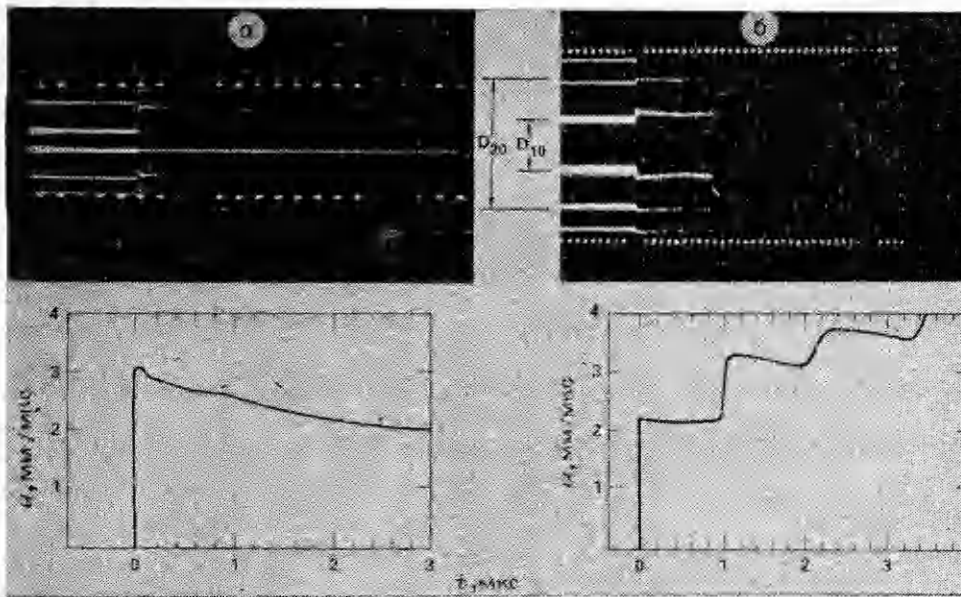


Рис. 9. Типичные записи для плоской пластины, метаемой в воду (а) и вакуум (б) с помощью LX-14, а также соответствующие профили скорости.

ине между зеркалами Фабри — Перо; D_{10} и D_{20} — диаметры смежных пар точек на статической картине; $D_1(t)$ — диаметр расширенной точечной картины. Если сдвиг скорости превышает расстояние между полосами, m есть число пересеченных полос. Расстояние между полосами равно $\lambda c/4L$ и отражает чувствительность устройства. При скоростях в несколько километров в секунду достигается разрешение в 1% по скорости и 7 нс по времени.

Экспериментальная схема оптической системы приведена на рис. 8. В качестве источника излучения используется аргоновый лазер с максимальной мощностью 4 Вт в одномодовом одночастотном режиме при длине волны 514,5 нм. Луч лазера освещает исследуемую металлическую поверхность, предварительно подготовленную так, чтобы получить диффузно отраженный пучок, который фокусируется полевой линзой и направляется в виде параллельного пучка в систему измерителя скорости. Непрерывная запись расстояния между точками позволяет в эксперименте измерить зависимость $u(t)$ (рис. 9). На рис. 9 видна разница временных характеристик для двух случаев. В первом медная пластина толщиной 0,025 мм достигала скорости контактной поверхности в пределах долей

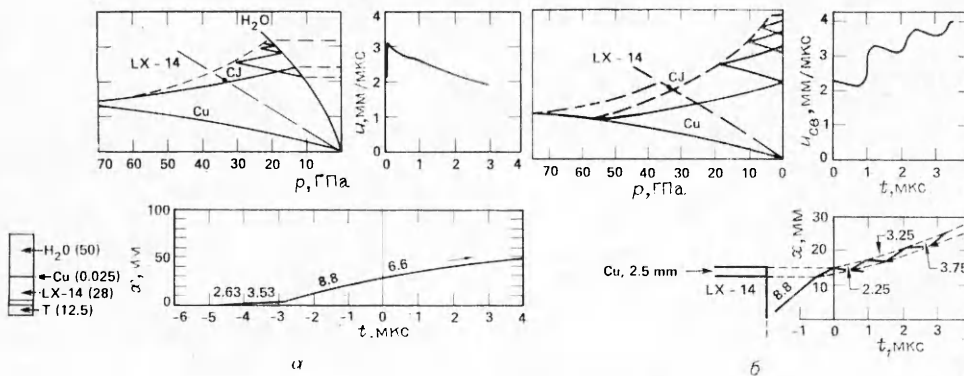


Рис. 10. Диаграммы экспериментов с водой (а) и в вакууме (б), иллюстрирующие физическую интерпретацию явления. Толщина медной пластины 0,025 (а) и 2,5 мм (б).

микросекунды. Во втором случае для медной пластины толщиной 2,54 мм требуется несколько ревербераций, длящихся несколько микросекунд, для достижения окончательной скорости свободной поверхности.

Эти записи вместе с соответствующими $p-u$ - и $x-t$ -диаграммами приведены на рис. 10. На них четко виден процесс в нашей экспериментальной интерпретации, а также показана корреляция между различными физическими плоскостями. Изменяя толщину и материал пластины в эксперименте, проводимом в вакууме, можно получить хорошее представление о ширине зоны реакции детонационной волны. Скорость разветки камеры может быть увеличена, что приведет к разрешению 20 нс/мм или лучше. Эксперименты в воде проводились для получения достаточно хорошего представления об изэнтропе разгрузки за детонационной волной. Вещество подложки предохраняет тонкую медную пластину от разрушения, поэтому запись можно вести в течение большого времени.

Фольговые манганиновые датчики давления

Для полной характеристики поведения материала при ударном нагружении помимо измерения массовой скорости имеет смысл непосредственно измерять давление. Это особенно важно при определении уравнения состояния для реагирующих материалов. Зная, как изменяется давление в зависимости от времени, можно легко проинтегрировать одномерные гидродинамические уравнения для получения скорости выделения химической энергии, а также скорости, при которой простой процесс горения переходит в детонацию.

Принцип действия. Манганин впервые применен для измерения давления в гидростатических приборах [8]. Позже манганиновые проволочки использовали как датчики динамического напряжения в инертных материалах [9, 10]. В [11—13] с помощью датчика изучалось ударное инициирование и профили волны Тейлора в различных ВВ. Авторы работ [14, 15] для проведения измерений в реагирующих и детонирующих бризантных ВВ применяли низкоомный датчик, вытравленный из фольги и изолированный политетрафторэтиленом.

Манганин хорошо подходит в качестве датчика давления, так как имеет достаточно высокий положительный коэффициент изменения сопротивления в зависимости от давления, и его характеристика почти линейная. Еще важнее то, что он имеет очень низкий коэффициент зависимости сопротивления от температуры, которая возникает из-за ударного разогрева. Однако на нем наблюдается слабый гистерезис, т. е. после ударного нагружения фиксируется остаточное изменение сопротивления.

Конструирование датчиков и их изготовление. Манганиновые датчики травились по стандартной методике из отожженной фольги толщиной 25,4 мкм, используемой для шунтов. Массовый состав фольги, %: меди 85,9, марганца 9,5, никеля 4,0, железа 0,5, кремния 0,1. Электрические выводы покрывались слоем меди толщиной 8—10 мкм для уменьшения сопротивления. Так как датчики имеют низкое сопротивление, их необходимо присоединять по четырехточечной схеме.

Использовались две конфигурации (рис. 11): с выводом четырех контактов с одной или с двух сторон (Н-образный). При работе с датчиком первого типа больше возможностей для изменения его положения в мишени. Активные элементы имели размеры $0,7 \times 2,0 \times 0,025$ и $1,5 \times 3,0 \times 0,025$ мм, а их номинальное сопротивление 65 и 32 МОм соответственно.

Один или несколько датчиков, расположенных между слоями тефлона, образовывали так называемую «станцию». Для связки использована пленка из фторэтиленпропилена. Такой «сэндвич» помещается в вакуумированный зажим, а затем вставляется в пресс, предварительно нагретый до температуры плавления связки. Более подробно эта конструкция описана в [15].

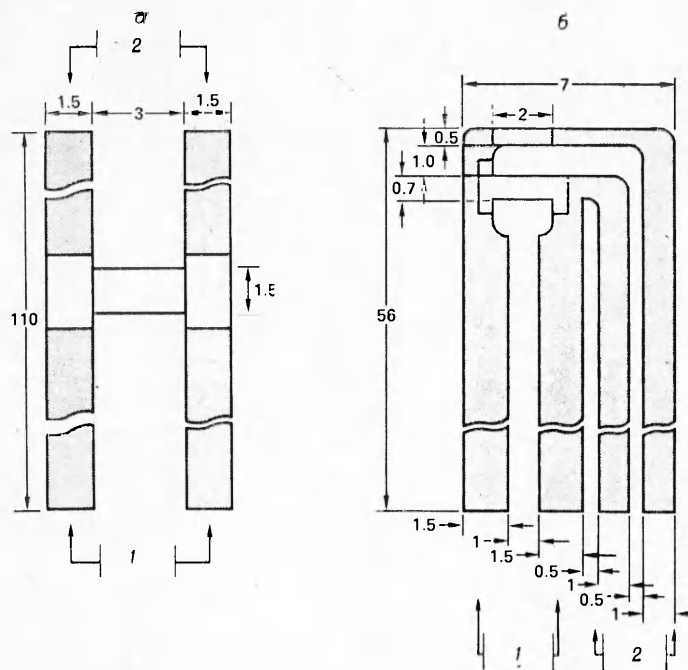


Рис. 11. Две конфигурации манганиновых датчиков: с выводами в две (а) и одну (б) сторону. Датчики вытравлены из манганиновой фольги толщиной 24,5 мкм. На затушеванных поверхностях нанесено медное покрытие толщиной 5 мкм на каждой стороне для снижения сопротивления выводов.
1 — токовые выводы; 2 — сигнальные выводы.

Эксперимент. До прихода ударной волны на датчик подается импульс тока в 50 А, вызывающий появление на нем напряжения V_0 . С приходом УВ создается дополнительное напряжение ΔV . С целью увеличения точности измерений использовалась модифицированная мостовая схема для компенсации напряжения, описанная в [16]. Измеряется также и ток в датчике, а относительное изменение сопротивления связано с измеренными величинами V_0 , ΔV , I и R_0 следующим выражением:

$$\Delta R/R_0 = (V_0 + \Delta V)/IR_0 - 1.$$

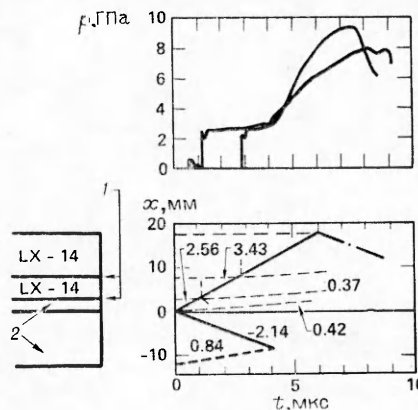
Здесь R_0 — начальное сопротивление датчика, измеренное с точностью до $\pm 0,01\%$; V_0 — начальное напряжение; I — ток, проходящий через датчик; ΔV — изменение напряжения под действием давления.

На рис. 12 показан типичный эксперимент с двумя измерительными «станциями», помещенными в LX-14. Здесь же приведены $x-t$ -диаграмма ударной волны, распространяющейся по ВВ, и соответствующие профили давления для двух датчиков, расположенных в различных координатах и иллюстрирующие рост давления, предшествующий детонации.

Экспериментальные данные для давления и массовой скорости в реагирующей среде могут быть использованы для расчета развития реакции под воздействием умеренного динамического нагружения. Зная профили p и u в различных лагранжевых координатах

Рис. 12. Результаты эксперимента с манганиновыми датчиками.

1 — манганиновые датчики; 2 — тефлон.



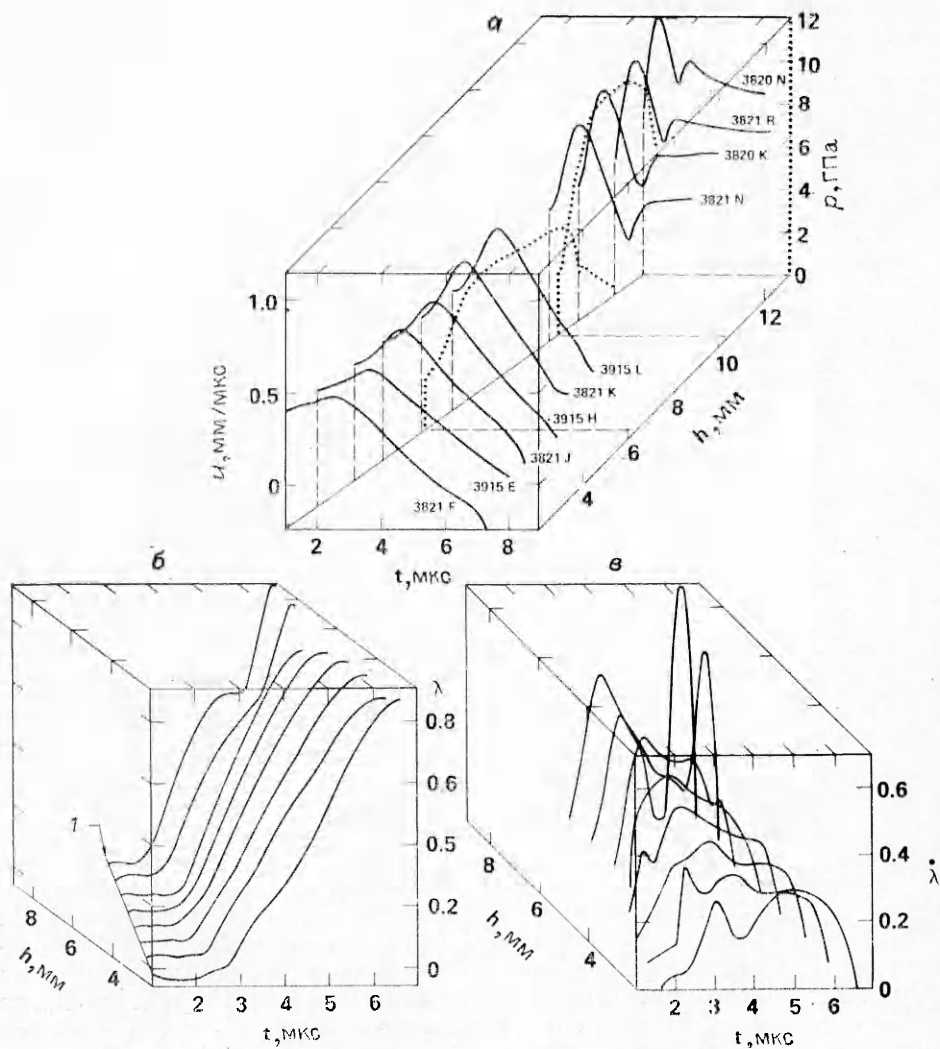


Рис. 13. Лагранжев анализ для RX-26-AF.

а) использованы экспериментальные данные, полученные с помощью двух манганиновых датчиков давления (.....) и десяти датчиков Лоренца (—); б) координата реакции λ ; в) скорость реакции λ . 1 — траектория фронта УВ.

в потоке, можно построить поверхности массовой скорости $u(h, t)$ и давления $p(h, t)$. Эта информация наряду с некоторыми приемлемыми предположениями об уравнениях состояния ВВ и продуктов детонации позволяет рассчитать массовую долю продуктов ВВ

$$\lambda = \frac{M_p}{M_p + M_x} \quad (0 < \lambda < 1)$$

и соответствующую скорость реакции

$$\dot{\lambda} = d\lambda/dt.$$

Здесь M_p и M_x — масса продуктов и ВВ.

Лагранжев анализ реагирующего потока, ранее предложенный в [17], затем детально разработан в [18]. В работе [19] он использовался для некоторых пластических ВВ.

Процесс, происходящий в RX-26-AF при ударном нагружении до $p = 2,46$ ГПа, приведен на рис. 13. Результаты показывают, что в ВВ, состоящем приблизительно из 50% НМХ и 50% ТАТВ, реакция протекает медленнее, чем в чистом НМХ (6 мкс по сравнению с 3,5 мкс),

и профиль скорости реакции имеет два максимума вместо одного резкого, наблюдавшегося в других ВВ на основе НМХ. Эти результаты свидетельствуют о таком интересном явлении, как двухступенчатость реакции в RX-26-AF. Первая — это реакция НМХ, при которой давление нарастает до значения, превышающего 8 ГПа, которое, в свою очередь, возбуждает реакцию в ТАТВ. Результаты [19] согласуются с нашими, согласно которым для ударного инициирования ТАТВ необходимо давление $\approx 7,5$ ГПа.

Датчик давления из PVF₂

Для измерения динамического давления используется датчик на основе PVF₂ (поливинилиденфторид), который находится пока на ранней стадии разработки. Одно из его основных преимуществ — простота действия. В отличие от описанных фольговых датчиков он не требует источника энергии, а располагает своей накопленной энергией, выделяющейся при его сжатии.

Поливинилиденфторид — это полукристаллический полимер, мономер которого CH₂—CF₂, примерно на 50% кристаллический и на 50% аморфный. В работе [20] показано, что этот материал становится сильно пьезоэлектрическим, если сначала подвергается механическому растяжению, а затем действию медленно меняющегося сильного электрического поля. Попытка использовать этот материал как элемент для измерения давления впервые описана в [4].

Рассматриваемый датчик состоит из тонкой поливинилиденфторидной пленки, проложенной между двумя дисками из золота или меди (рис. 14). Толщина материала может меняться. Более тонкие датчики чувствительнее, но в то же время с ними трудно работать, поэтому желательно подобрать их оптимальную толщину. Толщина описываемых датчиков 23 мкм, а активное пространство между двумя дисками равно 3,75 мм в диаметре.

Сильно растянутый и поляризованный материал проявляет сегнетоэлектрические свойства. Его остаточная поляризация может достигать $P_{ост} \approx 40$ мКл/см², а пьезоэлектрический коэффициент $d_{33} \sim 22$ пКл/Н [4]. Поляризация материала проводилась в ходе медленного периодического процесса (0,01 Гц) при комнатной температуре в электрическом поле $5 \cdot 10^8$ В/м.

При динамическом нагружении в датчиках наблюдается изменение поляризации и появляется электрический заряд, который регистрируется как сигнал $V(t)$, проходящий через резистивную или резистивно-емкостную цепь. В первой цепи регистрируется ток $I(t) = E(t)/R$, который при

интегрировании дает соответствующую величину $Q = \int_0^t \frac{E(t)}{R} dt$. Вторая цепь выполняет интегрирование и непосредственно регистрирует величину заряда в виде

$$Q = E(t)C \cdot (R + R_0)/R_0,$$

где $R_0 = 50$ Ом — нагрузочное сопротивление на входе осциллографа (для согласования с волновым сопротивлением кабеля). На рис. 15 показаны эти режимы, а также относительная точность по времени, требующаяся для записи процесса.

На рис. 16 приведены экспериментальные данные двух типов записи. Эксперимент состоит в симметричном соударении ПММА со снаря-

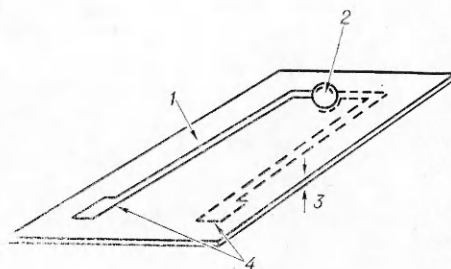


Рис. 14. Датчик на основе PVF₂. 1 — поливинилиденфторид; 2 — активная поверхность 0,11 см²; 3 — толщина 23 мкм; 4 — напыленное золото.

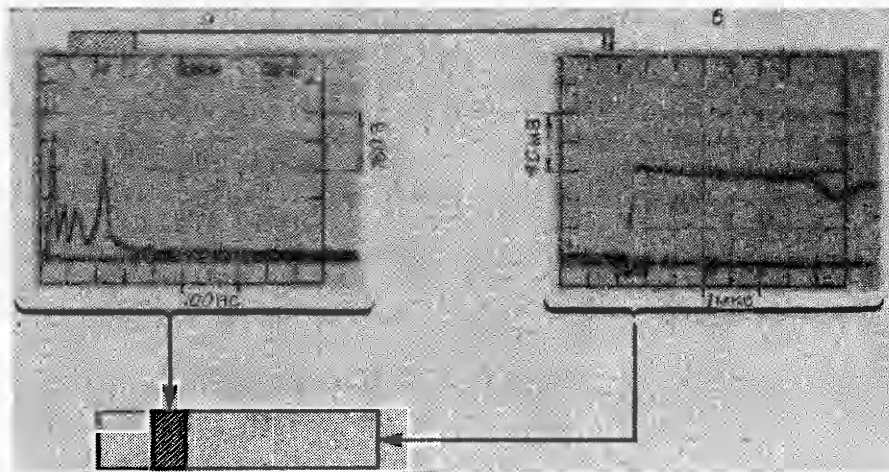


Рис. 15. Два режима проведения измерений заряда Q .
 а) режим тока (резистивная цепь); б) режим заряда (резистивно-емкостная цепь).

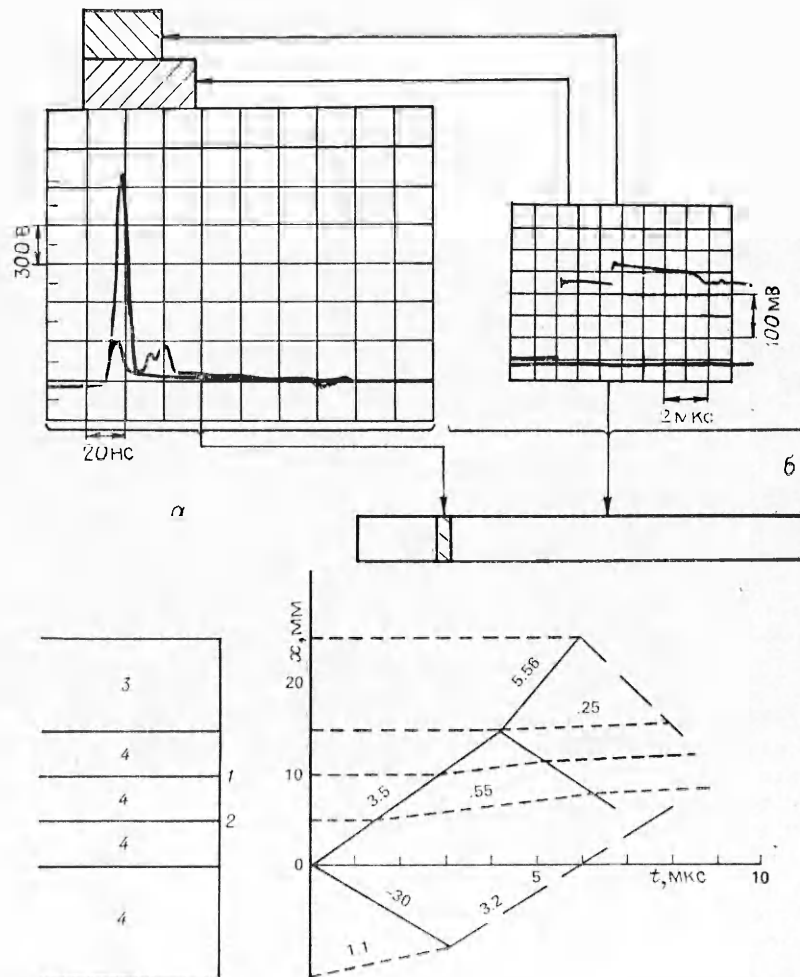


Рис. 16. Эксперимент, иллюстрирующий два типа записей и их связь друг с другом.
 Датчики: 1 — PVF₂, 2 — марганцевый, 3 — Al, 4 — ПММА. ПММА: $\rho_0 = 1,178$ г/см³, $u_s = -3,5$ мм/мкс, $\rho = 2,3$ ГПа.

Рис. 17. Эмпирическая зависимость между давлением и электрическим зарядом при динамическом нагружении.

дом, движущимся со скоростью 1,1 мм/мкс. Под воздействием образующейся при этом УВ давление в материале возрастает до 2,3 ГПа, а при отражении от алюминиевой пластины — до 4,0 ГПа. В режиме тока второе возрастание накладывается на первое, так как осциллограф работал в режиме внутреннего запуска от входного сигнала.

Оба режима регистрации данных дают в результате величину заряда, который при делении на активную площадь датчика даст величину, измеряемую в мкКл/см². Зависимость $Q(p)$ может быть получена при воздействии на датчики разными, но известными давлениями, на основе знания адиабат вещества. Несмотря на то что разработка датчика еще не завершена, полученные результаты дают монотонную зависимость между давлением и образовавшимся зарядом. Эти результаты представлены на рис. 17 и описываются эмпирической зависимостью

$$p = 1,12Q^{1,58}.$$

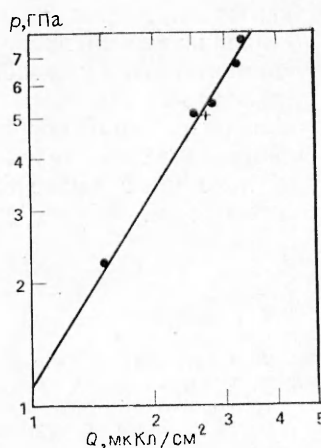
Заключение

Описаны четыре диагностические методики — основные при работе с высокими давлениями в реагирующих и нереагирующих материалах на крупнокалиберной пушке Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса. Их преимущество состоит в том, что они могут использоваться вместе в одном и том же эксперименте и даже в одной и той же плоскости, удовлетворяя требующимся условиям. Это существенно для перекрестной проверки результатов. Исключение составляет комбинация манганинового датчика давления и датчика для измерения массовой скорости, которые нельзя использовать в непосредственной близости друг от друга из-за неизбежной интерференции двух магнитных полей, одно из которых наводится током, необходимым для запитки манганинового датчика, а другое — для работы датчика массовой скорости.

Показано, что набор профилей массовой скорости наряду с некоторыми профилями давления может обеспечивать информацию о реакционной способности исследуемого материала, и как один профиль массовой скорости можно преобразовать в профили других основных параметров процесса. Это преобразование для проверки различных моделей уравнения состояния очень полезно, так как обеспечивает доступ к наиболее чувствительной переменной процесса, а именно к логарифмической производной давления по объему Γ . Как известно, различные модели уравнения состояния для продуктов реакции дают отличающиеся временные зависимости для величины Γ при изменении ее вдоль изоэнтропы разгрузки или волны Тэйлора за плоскостью Чепмена — Жуге.

Оптический доплеровский сдвиг хорошо известных интерференционных полос Фабри — Перо обеспечивает точный расчет скорости в исследуемом образце, а сегнетоэлектрические свойства полимера превращают довольно обычный пластический материал в простой, но надежный датчик для измерения давления.

Постоянно возрастающие возможности вычислительной техники, позволяющие использовать все более тонкие численные модели физических явлений, оказывают существенное воздействие на экспериментальную точность измерений. Выдвигаются не только более серьезные требования к точности измерений во время процесса, но и в течение длительного времени после него. А это накладывает дополнительные ограничения на



диагностику, связанные с прочностью и надежностью. Процесс никогда не прекратится и превращает нашу попытку обогатить и улучшить экспериментальную диагностику в процесс непрерывный и важный.

Авторы выражают признательность доктору К. М. Тарверу и Д. Натту за разрешение использовать их материалы, доктору Ф. Бауэру (ISL, Франция) за обеспечение нас датчиками PVF₂ и помощь в интерпретации явления, а также благодарят Карен Спарлин за содействие в подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Bauer. Proc. 1-st Symp. on Gauges and Piezoresistive Materials, A. D. E. R. A.—Bordeaux, 1981.
2. W. C. Rivard, D. Venable. Proc. Fifth Symp. on Detonation, Pasadena, USA, 1970.
3. A. N. Dremin, S. V. Pershin, V. E. Pogorelov. Comb. Expl. and Shock Waves, 1965, 1, 4, 1.
4. D. J. Edwards, J. O. Erkman, S. J. Jacobs. Naval Ordnance Laboratory Report, NULTR-70-79, 1970.
5. B. Hayes, J. N. Fritz. Proc. Fifth Symp. on Detonation, Pasadena, USA, 1970.
6. B. Hayes, C. M. Tarver. Proc. Seventh Symp. on Detonation, Dahlgren, USA, 1981.
7. D. R. Goseman. Energy and Technology Review, LLNL, 17—28, 1979.
8. P. W. Bridgeman. Proc. Royal Soc. London, 1950, A203.
9. P. J. A. Fuller, J. H. Price. Nature, 1962, 103, 262.
10. D. Bernstein, D. D. Keough. J. Appl. Phys., 1964, 35, 1471.
11. J. Wackerle, J. O. Johnson e. a. Proc. Sixth Symp. on Det., Arlington, USA, 1976.
12. G. I. Kanel, A. N. Dremin. Fizika Goreniya i Vzryva, 1977, 13, 1, 85.
13. K. Burrows, D. K. Chivers. Proc. Sixth Symp. on Det., Arlington, Virginia, 1976.
14. R. C. Weingart, R. Barlett e. a. Proc. Symp. on High Dynamic Pressures, Paris, France, 1978.
15. L. Erickson, R. Weingart e. a. Proc. 10-th Symp. on Expl. and Pyrotechnics, San Francisco, USA, 1979.
16. M. Vantine, J. Chan e. a. Rev. Sci. Instrum., 1980, 51, 116.
17. M. Cowperthwaite, J. T. Rosenberg. SRI International PYU-8443, 1980.
18. H. C. Vantine, R. B. Bainberger e. a. Proc. Seventh Symp. on Detonation, Dahlgren, USA, 1981.
19. G. L. Nutt, L. M. Erickson. J. Energetic Materials, 1984, 2, 263.
20. H. Kawai. J. Appl. Phys., 1969, 8, 975.

Поступила в редакцию 1/II 1986

АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ РАВНОВЕСНОЙ ПЕНЕ

Н. М. Кузнецов, Е. И. Тимофеев, А. В. Губанов
(Москва)

В связи с перспективой использования пен для гашения ударных волн (УВ) при проведении демонтажных работ на воздухе взрывным способом опубликован ряд работ [1—7], посвященных различным аспектам волновой динамики в этих средах. В [1] представлены предварительные экспериментальные результаты по физическим свойствам пен (плотность, скорость истечения жидкости из пены и т. д.) и их влиянию на УВ, создаваемую взрывом заряда ВВ массой $M \leq 1$ кг. В [2] в ударной трубе проведены исследования движения длинных (время действия волны порядка 3 мс) ударных волн в пене при $\sigma_0 = 2 \div 10$ кг/м³. Здесь $\sigma_0 = \varepsilon_0 \rho_l$; ε_0 и ρ_l — объемная концентрация и плотность воды. Скорость длинных УВ при прохождении расстояния до 1,3 м не изменяется [2].

Экспериментальное исследование [1] затухания УВ в пене ($M = 1 \div 5$ г и $\sigma_0 = 15$ кг/м³) подтвердило результаты [3] — более быстрое падение давления в волне в двухфазной среде по сравнению с воздухом. Отдельные эксперименты [3] проведены при $M \approx 1$ кг. В [4] представлены результаты по скорости движения длинных волн и по их взаимодействию с жесткой стенкой, расположенной в пене. Выяснилось, что ско-