

## ЛИТЕРАТУРА

1. Fraley G. S., Mason R. J. Preheat effects on microballon laser-fusion implosions.— Phys. Rev. Lett., 1975, v. 35, N 8.
2. Mason R. J., Brockway D. V., Lindman E. L. 2-d implosion of structured pellets for laser fusion. Los-Alamos Report LA—VR—76—2319, 1976.
3. Вовченко В. И., Гончаров А. С. и др. Генерация термоядерных нейтронов при лазерном воздействии на конические мишени.— Письма в ЖЭГФ, 1977, т. 26, № 9.
4. Derentowicz H., Kaliski S. et al. Generation of thermonuclear fusion neutrons by means of a pure explosion. II. Experimental results.— Bull. Acad. pol. sci. Ser. sci. techn., 1977, v. 25, N 10.
5. Анисимов С. И., Вовченко В. И. и др. Исследование процесса генерации термоядерных нейтронов при лазерном воздействии на конические мишени.— Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, № 7.
6. Демченко В. В., Холодов А. С. Газовые и конические мишени. Аналитические решения. М.: НТО МФТИ, 1979 (деп. в ВИНТИ. Центр, № Б 821668).
7. Таран М. Д., Тишкин В. Ф. и др. О моделировании схлопывания квазисферических мишеней в твердотельных конусах. Препринт ИПМ АН СССР, 1980, № 127.
8. Белоцерковский О. М., Демченко В. В. и др. Численное моделирование некоторых задач лазерного сжатия оболочек.— ЖВММФ, 1978, т. 18, № 2.
9. Магомедов К. М., Холодов А. С. О построении разностных схем для уравнений гиперболического типа на основе характеристических соотношений.— ЖВММФ, 1969, т. 9, № 2.
10. Самарский А. А., Волосевич П. П. и др. Метод конечных разностей для решения одномерных нестационарных задач магнитной гидродинамики.— ЖВММФ, 1968, т. 8, № 5.
11. Самарский А. А., Попов Ю. П. Разностные схемы газовой динамики. М.: Наука, 1975.
12. Афанасьев Ю. В., Басов Н. Г. и др. Нагрев дейтериево-тритиевой плазмы до термоядерных температур с помощью излучения ОКГ. Препринт ФИАН СССР, 1972, № 66.

*Поступила 15/VI 1984 г.*

УДК 620.178.73

### МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДАРНЫХ АДИАБАТ НИЗКОПЛОТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Л. В. АЛЬТШУЛЕР, Г. С. ДОРОНИН, С. В. КЛОЧКОВ*

*(Москва)*

Исследование хода ударных адиабат материалов с пониженной начальной плотностью дает возможность судить о состоянии вещества в области высоких давлений и температур. Обычно при определении ударных адиабат используется «метод отражения» [1]. В образец из экрана с известной ударной адиабатой вводится ударная волна. Регистрируется скорость ударной волны в экране и исследуемом образце. Массовая скорость в исследуемом материале определяется на основании измеренных значений скорости ударной волны и ударной адиабаты материала экрана. Давление  $p$  и степень сжатия  $\sigma$  вещества на ударной адиабате определяются по законам сохранения:

$$p = \rho_0 D u, \quad \sigma = \rho / \rho_0 = D / (D - u),$$

где  $\rho_0$  — исходная плотность исследуемого материала;  $\rho$  — плотность материала за фронтом ударной волны (ФУВ);  $D$  — скорость ударной волны;  $u$  — массовая скорость.

Используются и другие методы [2, 3], когда в исследуемом материале при помощи нескольких электромагнитных датчиков определяются скорость ударной волны и массовая скорость.

Все эти методы дают хорошие результаты при определении ударных адиабат слабосжимаемых веществ. При исследовании низкоплотных материалов, обладающих значительной сжимаемостью, методами [1—3] не удается точно определить степень сжатия вещества на ударной адиабате. Дело в том, что в низкоплотных материалах значения скорости ударной волны  $D$  и массовой скорости  $u$  близки между собой, поэтому при независимом измерении этих величин их разность определяется с большой ошибкой. Это в свою очередь приводит к значительным ошибкам в определении степени сжатия вещества за фронтом УВ.

Для повышения точности определения степени сжатия вещества за ФУВ предлагается метод, позволяющий непосредственно измерять временной интервал, пропорциональный разности  $(D - u)$ . Для этого в исследуемый образец из экрана вводится ударная волна с постоянными параметрами за фронтом, а в образце на расстоянии  $h_0$  от экрана помещается игла из токопроводящего материала, динамическая жесткость которого значительно превышает динамическую жесткость материала образца. Такая игла за фронтом ударной волны обтекается ударно-сжатым веществом и прак-

тически остается неподвижной. Измеряется время  $t_1$  прохождения УВ от экрана до острия иглы и время  $\Delta t$  от момента подхода фронта УВ к острию до соприкосновения иглы с поверхностью раздела экран — образец. Диаграмма  $x-t$  распространения УВ по исследуемому образцу показана на рис. 1, а ( $OA$  — траектория фронта ударной волны,  $OB$  — траектория движения поверхности раздела экран — образец).

Скорость ударной волны и массовая скорость в образце определяются по формулам

$$D = h_0/t_1, \quad u = h_0/(t_1 + \Delta t).$$

Из  $x-t$ -диаграммы следует  $\Delta t = h_0/u - h_0/D$ , тогда  $D - u = \Delta t Du/h_0 = h_0 \Delta t/[t_1 \times (t_1 + \Delta t)]$  и степень сжатия вещества за фронтом ударной волны

$$(1) \quad \sigma = \rho/\rho_0 = D/(D - u) = (t_1 + \Delta t)/\Delta t = t_1/\Delta t + 1;$$

давление за фронтом ударной волны

$$(2) \quad p = \rho_0 D u = \rho_0 h_0^2/[t_1(t_1 + \Delta t)].$$

Легко показать [4], что при нахождении ударной адиабаты по методам [1—3] относительная ошибка  $\varepsilon(\sigma)$  в определении степени сжатия вещества описывается формулой

$$(3) \quad \varepsilon(\sigma) = (\sigma - 1) \sqrt{\varepsilon^2(D) + \varepsilon^2(u)},$$

где  $\varepsilon(D)$  и  $\varepsilon(u)$  — относительные ошибки измерения скорости ударной волны и массовой скорости в исследуемом материале. При использовании предлагаемого метода ошибка  $\varepsilon(\sigma)$  определяется соотношением

$$(4) \quad \varepsilon(\sigma) = \sqrt{\varepsilon^2(t_1) + \varepsilon^2(\Delta t)},$$

где  $\varepsilon(t_1)$  и  $\varepsilon(\Delta t)$  — относительные ошибки в определении временных интервалов  $t_1$  и  $\Delta t$ . Точность значений  $t_1$ ,  $\Delta t$ ,  $D$ ,  $u$  примерно одинакова, т. е. подкоренные выражения в формулах (3) и (4) равны между собой. Относительная ошибка степени сжатия по предлагаемому методу не зависит от степени сжатия вещества, а в методах [1—3] она пропорциональна величине  $(\sigma - 1)$ . Поэтому при степенях сжатия  $\sigma > 2$ , т. е. при сжатии низкоплотных материалов, точность определения ударной адиабаты по предлагаемому методу будет выше, чем у методов [1—3].

При выводе формул (1) и (2) предполагалось, что игла за фронтом УВ остается неподвижной. Смещение иглы в ударно-сжатом веществе вносит систематическую ошибку в результаты измерений. Оценим величину ошибки, вносимой в определение степени сжатия смещением иглы.

Предположим, что средняя скорость смещения иглы постоянна и равна  $\alpha u$ ,  $\alpha$  — постоянный коэффициент ( $0 < \alpha < 1$ ). Тогда величина смещения иглы за время  $\Delta t'$  равна  $\Delta x = \alpha u \Delta t'$ ,  $x-t$ -диаграмма ударно-волнового процесса в образце с учетом смещения иглы приведена на рис. 1, б. Обозначения те же, что и на рис. 1, а. Из  $x-t$ -диаграммы следует

$$\alpha u \Delta t' + h_0 = u(t_1 + \Delta t'),$$

отсюда

$$\Delta t' = (h_0/u - t_1)/(1 - \alpha),$$

но  $h_0/u = t_1 + \Delta t$ , тогда  $\Delta t' = \Delta t/(1 - \alpha)$ . Истинное  $\sigma$  и видимое  $\sigma'$  значения степени сжатия вещества в ударной волне имеют вид

$$\sigma = t_1/[\Delta t'(1 - \alpha)] + 1, \quad \sigma' = t_1/\Delta t' + 1.$$

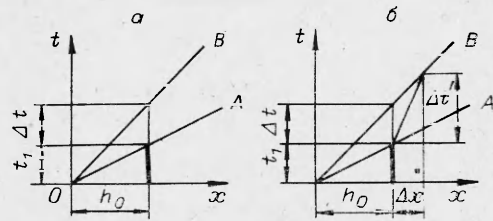
Систематическая ошибка, вносимая смещением иглы в определение степени сжатия,

$$(5) \quad \varepsilon(\alpha) = \frac{\sigma - \sigma'}{\sigma} = \frac{\alpha}{1 + \frac{\Delta t'}{t_1}(1 - \alpha)} = \frac{\sigma - 1}{\sigma} \alpha.$$

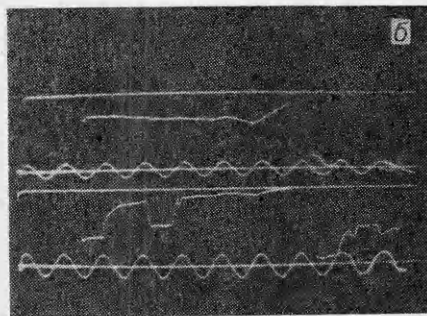
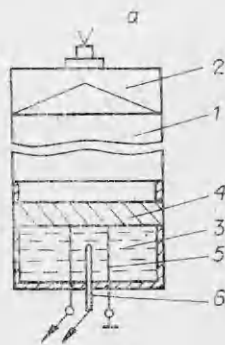
Из выражения (5) следует, что при  $\sigma > 2$   $\alpha/2 < \varepsilon(\alpha) < \alpha$ .

Для оценки влияния смещения иглы на точность определения параметров ударной адиабаты экспериментально найдена средняя скорость смещения стальной и вольфрамовой игл за фронтом ударной волны в воде. По средней скорости смещения рассчитывалась систематическая ошибка, вносимая в определение степени сжатия вещества за фронтом УВ.

Схема экспериментальной сборки показана на рис. 2, а. При детонации заряда 1 диаметром 84 мм и высотой 100 мм, инициируемого плосковолновым генератором 2



Р и с. 1



Р и с. 2

в слое воды 3, отделенном от заряда воздушным зазором и экраном 4, возбуждается ударная волна с постоянными параметрами за фронтом амплитудой 9,19 ГПа. На границе экрана с водой расположен П-образный электромагнитный датчик 5 из алюминиевой фольги толщиной 0,07 мм. На расстоянии  $h_0$  от экрана между ножками датчика размещена игла 6 из стали или вольфрама диаметром 1 мм. Вся сборка помещалась в однородное магнитное поле напряженностью 450 Э.

Как показано в [5], вода в ударной волне с амплитудой  $\sim 9$  ГПа частично диссоциирует на ионы. При подходе фронта ударной волны к острию иглы возникает разность потенциалов между иглой и алюминиевым датчиком как между электродами из разных в электрохимическом отношении металлов. При наколе датчика на иглу эта разность потенциалов исчезает.

Профиль массовой скорости на границе вода — экран, регистрируемый электромагнитным датчиком, подается на первый канал осциллографа ОК-33, на второй — подается сумма сигналов с электромагнитного датчика и иглы. Осциллограмма представлена на рис. 2, б. Частота меток времени 1 МГц. Первый скачок сигнала на втором канале соответствует моменту входа УВ в образец, второй — подходу ударной волны к острию иглы, третий — наколу датчика на иглу. По ним находятся интервалы времени  $t_1$  и  $\Delta t'$ .

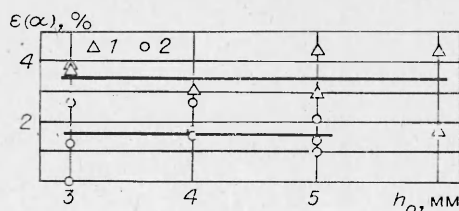
Средняя относительная скорость смещения иглы определяется выражением

$$\alpha = \frac{\Delta x}{\Delta t' u} = \frac{\int_0^{t_1 + \Delta t'} u(t) dt - h_0}{\Delta t' u}$$

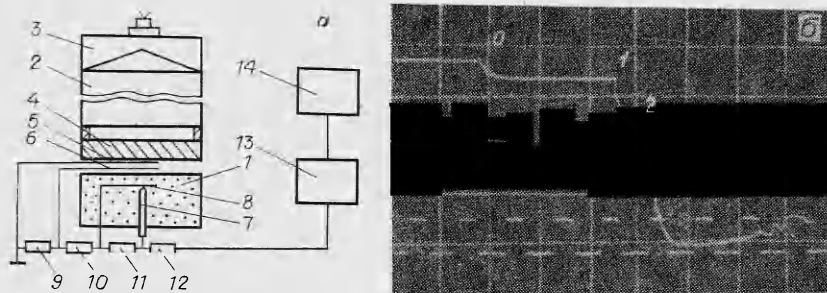
где  $u$  — массовая скорость воды за фронтом ударной волны, регистрируемая электромагнитным датчиком. Интегрирование осуществляется численно по экспериментальному профилю массовой скорости. Установлено, что в воде, движущейся за фронтом ударной волны с массовой скоростью 1,86 км/с, средняя скорость смещения стальной иглы составляет 0,174 км/с, вольфрамовой — 0,080 км/с. Соответственно значения средней относительной скорости смещения иглы  $\alpha$  равны 0,096 и 0,044.

По значениям  $\alpha$  формулы (5) рассчитывалась систематическая ошибка в определении  $\sigma$ , вносимая смещением иглы при различных начальных расстояниях ее от экрана. Результаты, полученные для стальной (точки 1) и вольфрамовой (точки 2) игл, показаны на рис. 3, откуда следует, что ошибка  $\varepsilon(\alpha)$ , вносимая смещением вольфрамовой иглы в воде, в среднем составляет 1,6%. При использовании вольфрамовой иглы для определения ударных адиабат материалов, существенно менее плотных, чем вода, эту ошибку вообще можно не учитывать. С помощью описанного метода определена ударная адиабата пористого полистирола с начальной плотностью  $\rho_0 = 0,1$  г/см<sup>3</sup>.

Схема экспериментальной сборки показана на рис. 4, а. Плоская ударная волна с постоянными параметрами за фронтом вводилась в исследуемый образец 1 при помощи взрывного устройства. Устройство содержит заряд ВВ2 диаметром 84 мм и высотой 100 мм с генератором плоской волны 3 и экран 4, отделенный от заряда воздушным зазором. На поверхности раздела экрана и образца помещен контактный датчик, состоящий из двух медных фольг 5 и 6 толщиной 0,02 мм каждая, разделенных лаковой изоляцией. В случае, если исследуемое вещество за фронтом УВ обладает заметной проводимостью, фольги следует изолировать от образца, чтобы исключить их преждевременное замыкание с контактами второго датчика. Толщина и материал изоляции выбираются из конкретных условий эксперимента. Вторым контактным датчик



Р и с. 3



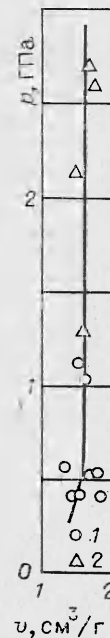
Р и с. 4

помещен в исследуемом образце на расстоянии  $h_0$  от границы с экраном. Один электрод датчика изготовлен из вольфрамовой иглы 7 диаметром 1 мм, направленной перпендикулярно к экрану, второй — из медной фольги 8 толщиной 0,02 мм, изолированной от острия иглы слоем лаковой изоляции. Фольги 5, 6 первого датчика, игла 7 и фольга 8 второго датчика соединены резисторами 9—12 с мостовой схемой и импульсным источником тока 13. Разность потенциалов с диагонали мостовой схемы подается на осциллограф 14. Подача питания на резисторы 9—12 осуществляется схемой синхронизации (на рис. 4 не показана) до прихода ударной волны к исследуемому образцу.

При прохождении УВ по образцу происходит последовательное замыкание контактов 5 и 6 первого датчика, иглы и контакта 8 второго датчика и иглы с контактом 6, движущимся вместе с границей экрана и образца. При этом закорачиваются резисторы 9—11. В моменты замыкания датчиков происходит изменение разности потенциалов в диагонали мостовой схемы. Это приводит к отклонению луча на экране осциллографа. Осциллограмма показана на рис. 4, б. Метки времени 1 МГц. Точка O соответствует моменту входа УВ в образец, 1 — моменту подхода фронта волны к острию иглы, 2 — соприкосновению иглы с границей раздела экран — образец. По моментам отклонения луча определялись интервалы времени  $t_1$  и  $\Delta t$ . Параметры на ударной адиабате рассчитывались по формулам (1) и (2). При определении ударной адиабаты состояние за фронтом УВ в полистироле предполагалось установившимся. Неравновесные процессы (такие как разложение, испарение), возможные в ударно-сжатом пористом веществе, не рассматривались.

На рис. 5 показана ударная адиабата пористого полистирола с начальной плотностью 0,1 г/см<sup>3</sup> в координатах  $p - v$  (удельный объем). Точки 1 получены с использованием метода, описанного в данной работе, 2 взяты из [6]. Они определены «методом отражения» на лабораторных взрывных стендах. Хорошее совпадение полученных результатов с данными [6] подтверждает работоспособность описанного метода.

Приведенная здесь схема регистрации с внешним импульсным источником тока не является единственно возможной. Для фиксирования момента входа УВ в образец, подхода УВ к игле и соприкосновения иглы и границы раздела экран — образец можно использовать различные электрические эффекты, возникающие в ударно-сжатом исследуемом веществе (как это сделано, например, при определении смещения иглы за фронтом ударной волны в воде).



Р и с. 5

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. — УФН, 1965, т. 85, вып. 2.
2. Болховитинов Л. Г., Хвостов Ю. Б. Исследование ударной сжимаемости полистирола различной пористости. — Тр. ВНИИФТРИ, 1979, вып. 44 (74).
3. Абашкин Б. П., Забиров И. Х., Русин В. Г. Динамическая сжимаемость пенополистирола. — Механика полимеров, 1977, № 1.
4. Альтшулер Л. В., Крушников К. К. Динамическая сжимаемость и уравнение состояния железа при высоких давлениях. — ЖЭТФ, 1958, т. 34, № 4.
5. Якушев В. В., Дремин А. Н. Электрохимические эффекты при ударном сжатии диэлектриков. Механизм электропроводности ударно-сжатых жидкостей. — Журн. физ. химии, 1971, т. 45, № 1.
6. LASL shock Hugoniot data/Ed. S. P. Marsh. Berkeley — Los Angeles — London: University of California press, s. a.

Поступила 31/VII 1984 г.