

практически не зависят от величины δ_0 . Результаты для $\delta_0=0,1$ мм, по-видимому, ненадежны, поскольку в этом случае $\kappa=0,08$ и условие $\kappa \ll 1$ выполняется еще недостаточно строго, что подтверждается расчетом величины p_m , которая несколько превысила значение p_x . Возрастание ϑ наблюдается при увеличении M и k и уменьшении R . Значительный рост температуры происходит при увеличении $|\omega_0|$. Возрастание теплопроводности жидкости оказывает влияние лишь на величину ϑ_2 , вызывая ее уменьшение.

Из результатов расчета этого варианта следует, что с уменьшением плотности или теплоемкости жидкости разогрев ϑ_1 возрастает, а ϑ_2 — снижается в силу увеличения коэффициента температуропроводности вещества. Увеличение вязкости жидкости приводит к возрастанию ϑ_2 и уменьшению ϑ_1 . Объяснение этого факта заключается в том, что с ростом вязкости возрастает сопротивление движению ударника со стороны слоя, вследствие чего деформация прослойки $\xi_k^{1/2}$ уменьшается; в результате заметно снижается теплоотвод на границе слоя.

Авторы благодарны А. М. Когану и В. Л. Бодневой за проведение расчетов.

Поступила в редакцию
19/Х 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Б. Харитон. Сборник статей по теории взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1940, стр. 177.
2. Ф. П. Боден, А. Д. Иоффе. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М., ИЛ, 1955, стр. 51.
3. Э. И. Андрианкин. ПМТФ, 1966, 5.
4. M. I. Booth, W. Hirst. Proc. Roy. Soc., Lond., 1970, 316, ser. A, p. 391, 415.
5. Э. И. Андрианкин, В. К. Боболев, А. В. Дубовик. ФГВ, 1972, 8, 3.
6. Л. Э. Эльсгольц. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М., «Наука», 1969.
7. Л. Г. Болховитинов. Канд. дисс., ИХФ АН СССР, М., 1960.
8. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.

УДК 622.215.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОЙ ВОЛНЕ СЖАТИЯ

С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, В. М. Титов
(Новосибирск)

При экспериментальных исследованиях ударных волн в конденсированных средах наряду с методами дискретных измерений, в которых сигнал относится к определенному моменту времени и точке пространства, используются методы непрерывной записи изменения состояния вещества на фронте ударной волны и за ним. В обзоре [1] ко второму классу отнесены магнитоэлектрический метод для непроводящих сред и манганиновый датчик для металлов. Диапазон регистрируе-

мых давлений этого датчика достигает 350 кбар, но его использование при давлении выше 150 кбар оказывается неудобным из-за возникновения проводимости изоляции, а увеличение ее толщины ухудшает время разрешения манганинового датчика.

Необходимость проведения непрерывных измерений в большом диапазоне давлений возникает в связи с разработкой вопросов квазиизэнтропического сжатия вещества [2, 3]. Газодинамический метод низкотемпературного сжатия [2] предполагает распространение ударной волны в легкую прокладку, помещенную в среду с большой динамической жесткостью, при этом многократная циркуляция ударных волн в прокладке приводит к ее квазиизэнтропическому сжатию. При таком методе создания давления необходимо регистрировать ступенчатую структуру волны сжатия или скорость нарастания давления в диапазоне до нескольких мегабар.

В настоящей работе проведены исследования возможностей метода непрерывной записи давления, основанного на использовании контактного электрического эффекта, основные свойства которого установлены в экспериментах с ударными волнами [4—6]. Эффект заключается в возникновении электрического сигнала, когда ударная волна проходит через контакт двух металлов, включенных последовательно с измерительным сопротивлением.

Поскольку напряжение возникает за счет изменения контактной разности потенциалов за фронтом ударной волны [7] и для некоторых пар металлов устанавливается линейная зависимость э.д.с. от пикового давления на фронте ударной волны, то предлагается использовать данный метод для проведения непрерывной записи давления. Зарегистрированные времена включения источника э. д. с. при плоском падении ударной волны на контакт составляют ≈ 10 нс, что обеспечивает высокое временное разрешение такого датчика. Это свойство было использовано в [6] для регистрации многоволновой структуры ударной волны в висмуте и германии.

Нами исследовался датчик на основе пары медь — константан в диапазоне давлений 0,2÷1,0 Мбар. Датчик был применен для регистрации ступенчатой структуры волны сжатия в металлическом экране при сжатии его тяжелым ударником через прокладки с малым динамическим импедансом. В качестве прокладок использовались пенополистирол, жидкий азот и жидкий водород, поэтому предварительно снимались калибровочные зависимости сигнала э. д. с. от давления при различных начальных температурах датчика.

Для изготовления датчика бралась пара медь — константан как обладающая наименьшим разбросом. Конструкция датчика описана в [5]. Опыты проводились при нормальных условиях и температурах жидкого азота и жидкого водорода. Для охлаждения датчика в медном радиаторе заливались криогенной жидкостью. Ударная волна пропусклась через образцы из константана длиной 1,5 мм, $\varnothing=6$ мм, длительность калибровочного импульса составляла ≈ 300 нс при длительности фронтов 10÷20 нс. Одна из калибровочных осциллограмм приведена на рис. 1 (медь-константан, $t_0=20,5^\circ\text{K}$, развертка 50 нс/дел, чувствительность 20 мВ/дел). Пик напряжения на переднем фронте сигнала длительностью ≈ 50 нс достигает 20% амплитуды сигнала. Поскольку в дальнейших экспериментах давление менялось в течение ≈ 1 мкс и измерения датчиком проводились в этом временном диапазоне, то э. д. с. определялась по полке сигнала. Давление в образце рассчитывалось по методике [5]. Ударная адиабата константана рассчитывалась в аддитивном приближении [8] по результатам динамической сжимаемости никеля и меди [9].

Калибровочная зависимость э. д. с. от давления в константане при различных начальных температурах представлена графически на рис. 2

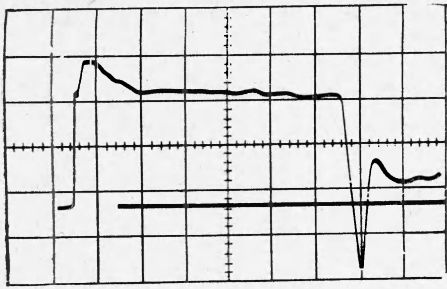


Рис. 1.

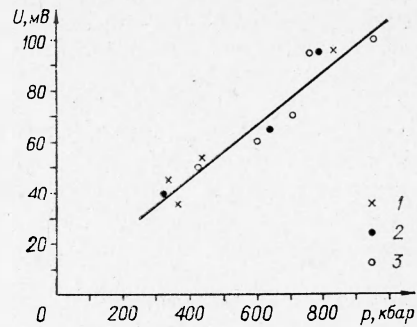


Рис. 2.

(1 — н. у., 2 — 77° К, 3 — 20,5° К). В пределах точности и экспериментального разброса зависимость э. д. с. от начальной температуры не устанавливается. Предполагая линейную зависимость э. д. с. от давления, экспериментальные результаты описываются

$$U (\text{мВ}) = (0,11 + 0,01)p (\text{кбар}) + (4 \pm 6). \quad (1)$$

Постановка экспериментов. На рис. 3 представлена схема и $(x-t)$ -диаграмма опыта. Заряд ВВ с генератором плоской волны метает ударник 1 толщиной δ со скоростью w . Прокладка 2 из пенополистирола или криогенной жидкости ограничена со стороны ударника медной фольгой толщиной 0,1 мм, а со стороны датчика — медным экраном 3 толщиной 0,65 мм. К поверхности экрана прижат константановый образец 4, $\varnothing = 10$ мм, длиной ≈ 8 мм. Размеры прокладки l и ударника δ , а также материал ударника менялись.

При столкновении ударника с прокладкой в ней возникает ударная волна D_1 , а внутри ударника распространяется волна D_{1y} . На стенке экрана образуется отраженная ударная волна D_2 , а в глубь экрана и на контакт распространяется волна D_{1a} . Ввиду равенства массовых скоростей и давлений на границе ударник — прокладка состояния за фронтом волны D_1 и D_{1y} равны в $p-u$ -представлении (рис. 4, 1). Из граничных условий на стенке экрана следует равенство состояний за фронтом волн D_2 и D_{1a} (рис. 4, 2). При прохождении ударной волны через контакт медь — константан (предлагается равенство динамических импедансов металлов пары) на внешнем нагрузочном сопротивлении R регистрируется напряжение, связанное с давлением в волне D_2 . Величина давления вычисляется по выражению (1). Если состояние прокладки, образующееся после отражения волны D_2 от ударника, обозначить номером 3, то в следующем цикле датчик регистрирует давление, соответствующее состоянию 4, а затем — все четные состояния. Длительность переднего фронта сигнала T характеризует время нарастания давления в экране.

Начальная стадия процесса сжатия характеризуется временем прохождения пер-

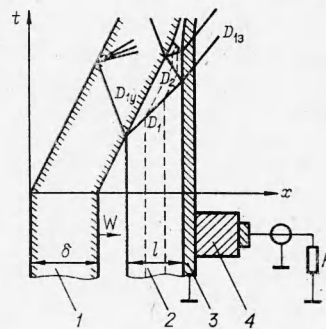


Рис. 3.

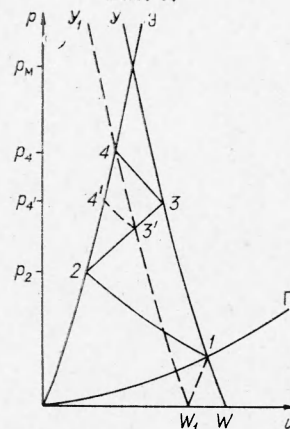


Рис. 4.

вой ударной волны и последующей разгрузки по ударнику

$$\tau = \frac{\delta}{D_{1y}} + \frac{\delta}{c} \approx 2 \frac{\delta}{c}$$

(где c — скорость звука в материале ударника за фронтом волны D_{1y}) и временем прохождения по прокладке двух ударных волн первого цикла

$$t = \frac{l}{D_1} + \frac{l}{D_2} \left(1 - \frac{u}{D_1}\right),$$

где $u \sim w$ — массовая скорость за фронтом волны D_1 . Соответственно отношению этих времен можно выделить два случая:

1) при $t \gg \tau$ процесс сжатия происходит путем многократной циркуляции ударных волн, переводящих вещество прокладки последовательно в состояния 1, 2, 3 и т. д. Максимальное давление определяется точкой пересечения адиабат квазиизэнтропического сжатия экрана Э и ударника У (см. рис. 4);

2) при $t \leq \tau$ на процесс сжатия влияет разгрузка ударника. Если за первый цикл ударник успевает разгрузиться и его скорость уменьшается до w_1 , то состояния 3' и 4', образующиеся во втором цикле, соответствуют ударной адиабате ударника У₁, построенной из точки w_1 . На некотором цикле массовая скорость вещества в прокладке сравнивается со скоростью ударника, процесс сжатия прекращается и начинается разгрузка.

Для оценки давлений в первых двух циклах сжатия проводились графические построения на $(x-t)$ - и $(p-u)$ -диаграммах. Предполагалось, что адиабаты вторичного и многократного сжатия вещества мало отличаются от адиабат однократного сжатия. Данные по жидкому азоту взяты из [10]. Ударная адиабата жидкого водорода, снятая в [11] до 39,5 кбар, была экстраполирована к точке $p=370$ кбар, $\rho=0,45$ г/см³, снятой в [12] при сжатии газообразного водорода цилиндрической оболочкой. Проведенная оценка занижает величины давлений для однократного сжатия, однако больше соответствует квазиизэнтропичности процесса при давлениях выше 40 кбар.

Результаты экспериментов. Сжатие прокладки из пенополистирола с начальной плотностью $\rho_0=0,07 \div 0,1$ г/см³, $l=4,5$ мм осуществлялось стальным ударником ($\delta=2,8$ мм, $w=2,5$ мм/мкс). На осциллограмме опыта (рис. 5, а) сигнал плавно нарастает за 0,7 мкс и затем держится на уровне 45 мВ. Максимальное давление, измеренное на полке сигнала, составляет 370 кбар. Оценка времени

первого цикла была проведена с использованием данных по динамическому сжатию полистирола различной начальной плотности [13]. Длительность первого цикла $t=1,3$ мкс и совпадает с τ .

Осциллограмма опыта с прокладкой из жидкого азота ($\rho_0=0,8$ г/см³, $l \approx 3$ мм) и стальным ударником ($\delta=3,05$ мм, $w=2,5$ мм/мкс) приведена на рис. 5, б. Амплитуда первого фронта напряжения соответствует давлению 280 кбар, затем сигнал плавно нарастает за 1,5 мкс до 550 кбар.

Сжатие жидкого водорода ($\rho_0=0,07$ г/см³, $l \approx 3$ мм) осуществлялось стальным ударником с $\delta=3,05$ мм, $w=2,5$ мм/мкс. На осциллограмме рис. 5, в можно выделить три ступеньки (отмечены

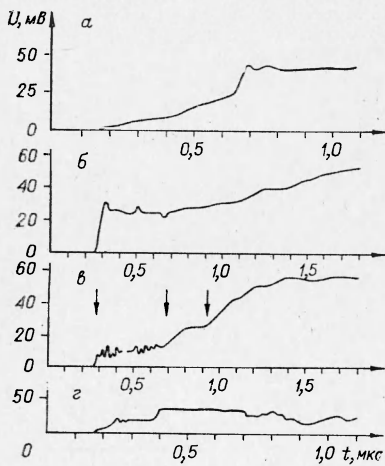


Рис. 5.

стрелками) с амплитудами 45, 180 и 350 кбар. Соответственно увеличению амплитуд ступенек происходит уменьшение их длительности: 0,36; 0,27 и 0,2 мкс. Затем сигнал плавно нарастает за 0,3 мкс до 470 кбар. Плавный фронт второй и третьей ступенек указывает на значительное искривление ударной волны в этих циклах сжатия. В последующих циклах размер кривизны и асимметрии фронта сравнивается с толщиной прокладки и это не позволяет выделить моменты времени, соответствующие отражению ударных волн от экрана.

На рис. 5, г приведена осциллограмма опыта, в котором слой жидкого водорода ($l=3,5\pm 0,5$ мм) сжимался ударником из дюралюминия ($\delta=2$ мм, $\omega=4,6$ мм/мкс). Зарегистрированы два цикла сжатия с амплитудами 100 и 280 кбар. Дальнейший рост напряжения отсутствует. Характер осциллограммы указывает на то, что процесс сжатия прекратился после четырехкратного прохождения ударной волны по прокладке.

Результаты измерения давления по осциллограммам и вычисленные значения p_2 , p_4 и p_{\max} сведены в таблицу, где также указаны двойное время прохождения звуковой волны (τ) по ударнику и измеренные по осциллограммам длительности переднего фронта волны сжатия в экране (T).

Измеренные и рассчитанные давления в экране (кбар)

Материал прокладки	τ , кс	T , мкс	Первая ступенька	p_2	Вторая ступенька	p_4	Полка сигнала	p_{\max}
Пенополистирол	1,3	0,6	—	—	—	—	370	600
Жидкий азот	1,3	1,5	280	240	—	—	550	600
Жидкий водород	1,4	1,1	45	35	180	120	470	600
Жидкий водород	0,8	0,25	100	95	280	230	—	800

Калибровочные эксперименты показали, что метод измерения давления, основанный на использовании контактного электрического эффекта, не чувствителен к изменению начальной температуры металла в диапазоне $20,5\div 300^\circ\text{K}$. С точки зрения свойств контактного электрического эффекта полученный результат обосновывает предположение о зависимости сигнала э. д. с. от давления на контакте и позволяет использовать датчик в области низких температур. При этом облегчается калибровка датчика, которую можно проводить при нормальных условиях, ограничиваясь малым числом экспериментов в области низких температур. Разброс точек калибровочной кривой $\approx 10\%$, что характеризует точность ее определения.

Для сравнения с другими методами непрерывных измерений отметим манганиновый датчик, наиболее разработанные конструкции которого позволяют определить калибровочную кривую с точностью 5% [14]. Оба эти метода не являются высокоточными из-за невозможности тарирования отдельного датчика, но могут быть использованы наряду с другими методами непрерывной записи для проведения качественных измерений. Точность временных измерений, проведенных с использованием контактного электрического эффекта, не ограничивалась разрешением самого датчика, а зависела от геометрии опыта и временного разрешения измерительной аппаратуры.

Конструкция датчика, использованного в работе, позволила применить его для непрерывной записи давления при квазиизотропическом сжатии вещества через прокладку в плоской геометрии. Сравнение результатов экспериментов с прокладками из жидкого азота и жидкого водорода показывает качественное отличие процесса нагружения, вызванное различием их динамических сжимаемостей. При сжатии жидкого азота примерно половина конечного давления создает-

