Октябрь 1997 г. **Том 167, № 10**

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Взрывные лабораторные устройства для определения динамической сжимаемости пористых веществ в области давлений от 0,1 до 1 ТПа

А.И. Фунтиков

Ранее, в [1], *описана история создания взрывных лабораторных устройств в Российском Федеральном ядерном центре* (*г. Саров*) *для исследования динамической сжимаемости веществ, однако большинство представленных взрывных измерительных устройств нашло применение в основном для веществ с нормальной начальной плотностью. В настоящей работе приводятся другие взрывные устройства, разработанные в г. Сарове в конце 50-х годов, которые были использованы для определения динамической сжимаемости пористых металлов и пористых ионных соединений в* [2 – 4].

PACS numbers: **28.70.+y**, **47.40.–x**, 62.20.Fe

В исследованиях, выполненных в начале 60-х годов в Российском ядерном центре (г. Саров) по изучению ударного сжатия ряда пористых металлов и ионных соединений [2 – 4], применялись нагружающие взрывные устройства, разработанные специально для этих целей. Отсутствие описания их в [2 – 4] снижало полноту информации о полученных результатах и исключало возможность их проверки и воспроизведения. В настоящее время описание ряда измерительных устройств, применявшихся, в основном, для изучения ударного сжатия веществ с нормальной начальной плотностью, дано в [1]. Однако это касается только одного из таких нагружающих устройств, использовавшихся в [2 – 4].

Измерительные взрывные нагружающие устройства для создания сильных ударных волн в конденсированных веществах основаны на разгоне ударника, помещенного в полость полусферического заряда взрывчатого вещества (ВВ), в котором сходящаяся детонационная волна создается системой специальных инициирующих зарядов, размещенных на внешней сферической поверхности заряда. При распространении детонационной волны к центру вследствие сферичности происходит существенное возрастание давления на фронте детонационной волны, приводящее к увеличению скорости ударника — полусферической оболочки, выполненной из железа (стали с низким содержанием углерода), по сравнению с разгоном плоской пластины зарядом ВВ с плоской детонационной волной. По мере движения к центру скорость оболочки увеличивается за счет действия на нее продуктов взрыва, а также из-за сферичности. Схема первого устройства такого типа была предложена Л.В. Альтшулером, Е.И. Забабахиным, Я.Б. Зельдовичем, К.К. Крупниковым. Отработка измерительного устройства и определение параметров движения оболочки проводились при участии В.И. Жучихина, Б.Н. Леденева, М.И. Бражник.

С помощью этого измерительного устройства, получившего название "Большая модель" (БМ), уже в первых исследованиях ударного сжатия ряда металлов были достигнуты давления, близкие к 0,5 ТПа [5 – 7]. Первоначально в [5] была определена адиабата ударного сжатия железа. Для других металлов измерения ударного сжатия были проведены методом отражения [8], в котором, исходя из зарегистрированного ранее состояния на ударной адиабате материала экрана — железа состояние вещества определялось по скорости ударной волны в нем.

Адиабата ударного сжатия железа измерялась, в основном, по методу торможения [5]. После получения первых результатов, представленных в [5, 8], параметры, необходимые для определения ударной сжимаемости изучаемых веществ, уточнялись в дополнительных измерениях, выполненных А.А. Бакановой, М.И. Бражник, А.И. Фунтиковым, а также в связи с введением поправок, учитывающих, в частности, различие в сходимости, т.е. интенсивности ускорения при движении к центру оболочки в ее свободном движении и ударной волны в материале.

Для измерений сжимаемости пористых веществ, обладающих в исходном состоянии структурной микронеоднородностью, представлялось целесообразным проводить измерения скорости ударной волны в исследуемых образцах на базе измерения 6 – 10 мм, увеличенной по сравнению с базой измерения 3 – 4 мм в сплошных веществах [8, 9]. Это вносило определенные требования к толщине ударника — оболочки на момент ее соударения с экраном, связанные с необходимостью избежать на выбранной базе измерения влияния догоняющей разгрузки, распространяющейся от наружной границы оболочки [10]. Для измерительного устройства БМ это требование выполнялось, так как толщина оболочки, равная 4,8 мм в начальном ее состоянии, увеличивалась к моменту соударения более чем в 3 раза.

Чтобы расширить область измерений ударного сжатия пористых веществ в сторону больших (до 1 ТПа) и меньших (в области 0,1 – 0,2 ТПа) давлений, С.Б. Кормером, А.И. Фунтиковым, А.И. Куряпиным были разработаны еще два измерительных устройства — КЗ и ДК. В первом из них, аналогичном измерительному устройству БМ, использовалась более толстая, а поэтому более тихоходная разгоняемая стальная оболочка, во втором — двухкаскадная конструкция.

Принцип многокаскадного разгона был рассмотрен Е.И. Забабахиным и первое измерительное взрывное устройство с полусферическим зарядом ВВ было разработано Л.В. Альтшулером, К.К. Крупниковым, М.И. Бражник [1]. В качестве первого каскада использовалась оболочка устройства БМ. Второй каскад представлял собой полусферический слой ВВ, который разгонял стальную оболочку толщиной 2 мм. Скорость оболочки на радиусе измерения $r_{изм} = 0{,}068\ R_{зар}$ составляла 15,7 км/с. На этом двухкаскадном измерительном устройстве для железа были впервые достигнуты давления, близкие к 1 ТПа [11], а также при уменьшении радиуса измерения до $r_{изм} = 0{,}045\ R_{зар}$ измерена ударная сжимаемость железа при давлении 1,3 ТПа [12].

Для проведения измерений ударного сжатия пористых материалов на базе измерения 8 мм был выбран радиус измерения

А.И. Фунтиков. Научно-исследовательский центр теплофизики импульсных воздействий научного объединения ИВТАН,
127412 Москва, ул. Ижорская 13/19
Тел. (095) 484-28-00. Факс (095) 485-79-90

Статья поступила 19 января 1997 г., после доработки 12 марта 1997 г.

© А.И. Фунтиков 1997

Таблица

Устройство	$r_{об}/R_{зар}$	Δ, мм	$r_{изм}/R_{зар}$	W, км/с	Экран	P, ГПа	U, км/с
КЗ	0,523	11	0,21	4,85	Fe	0,146	2,41
БМ	0,4	4,8	0,137	8,64	Fe	0,357	4,26
ДК 1 каскад	0,45	2,8	—	—	—	—	—
ДК 2 каскад	0,227	3,15	0,08	15,45	Fe	0,924	7,67
—"—	0,227	3,15	0,08	15,45	Al	0,493	9,95

$r_{изм} = 0{,}08\ R_{зар}$. В соответствии с указанными выше требованиями толщина оболочки была увеличена примерно в 1,5 раза. Чтобы сохранить высокую скорость оболочки на радиусе измерения, толщина оболочки первого каскада была уменьшена, а ее положение внутри заряда ВВ было оптимизировано. Для улучшения симметрии движения оболочки за счет уменьшения неоднородности материала прокладки второго каскада, выполненного из ВВ, был использован алюминий. Возможность применения инертного материала для разгона оболочки в каскадной конструкции была обоснована Е.И. Забабахиным [13]. Однако применение алюминия в качестве прокладки привело к большему разогреву стальной оболочки второго каскада при ее разгоне.

В качестве экрана при измерении ударного сжатия сплошных и пористых веществ по методу отражения в [2, 4] использовалось железо, а в [3] — алюминий. Параметры исходного состояния в материале экрана на радиусе измерения были определены по скорости ударной волны, а также по скорости ударяющей оболочки с учетом ее нагрева в процессе разгона.

Параметры измерительных устройств, используемых для проведения измерений в пористых материалах, приведены в таблице. Там же указаны относительные радиусы расположения оболочки $r_{об}$ и измерения $r_{изм}$, толщина оболочки Δ, скорость оболочки W, материал экрана, параметры ударной волны в экране (давление P и массовая скорость U).

На разработанном двухкаскадном измерительном устройстве впервые были получены рекордные значения параметров ударного сжатия для алюминия и пяти ионных кристаллов [3], а также для пористых металлов — алюминия, меди, никеля, свинца и вольфрама [2, 4] в области давлений соответственно 0,1 – 0,5 и 0,4 – 1 ТПа.

Особенностью нагружающих устройств со сферическим сходящимся разгоном оболочек является необходимость введения поправок в результаты измерения параметров ударной волны в исследуемых веществах, связанных с различной интенсивностью ускорения при движении к центру ударной волны от границы экран – образец до середины базы измерения в материале экрана и исследуемом веществе. Это различие, определяемое течением вещества за фронтом ударной волны, может быть установлено из численных газодинамических расчетов в одномерной сферической геометрии, в которых в первом приближении использовались упрощенные уравнения состояния веществ в форме Ми – Грюнайзена с постоянными значениями коэффициента Грюнайзена, отвечающими предельным сжатием.

Другая поправка должна учитывать различие между локальным значением скорости ударной волны на радиусе измерения и средним значением, измеренным на базе измерения. Значения этих поправок возрастают с уменьшением радиуса измерения. Обе эти поправки, по существу, отражают приведение состояний на фронте ударной волны в эталонном и исследуемом веществе на радиус измерения. Для исследованных в [2, 4] образцов с плотностями, близкими к плотности материала экрана, эти поправки, суммарно отнесенные к измеренному значению скорости ударной волны, малы и составляют для измерительных устройств КЗ, БМ, ДК соответственно 0,2, 0,4 и 1,2 %, однако для образцов с плотностью ~3 г/см3 они возрастают до 1 % для устройств КЗ и БМ и 3 % для устройства ДК.

Наконец, третья поправка, которая вводится в результаты измерения при их обработке в методе отражения, должна учитывать различие зависимости давления от массовой скорости для ударной адиабаты однократного сжатия, в первом приближении взятой по методу "зеркального отображения" [14], и изэнтропой расширения или адиабатой двукратного сжатия эталонного вещества экрана. Значение этой поправки возрастает по мере увеличения различия в давлении и массовой скорости в ударных волнах в эталонном и исследуемом веществах.

Разработка лабораторных взрывных устройств с использованием полусферических зарядов ВВ в конце 50-х годов явилась предпосылкой для формирования нового направления динамических исследований экстремальных состояний вещества, в становлении которого основную роль сыграли Я.Б. Зельдович, Л.В. Альтшулер и С.Б. Кормер.

Список литературы

1. Альтшулер Л В и др. *УФН* **166** (5) 575 (1996)
2. Кормер С Б и др. *ЖЭТФ* **42** (3) 686 (1962)
3. Кормер С Б и др. *ЖЭТФ* **47** (4) 1202 (1964)
4. Трунин Р Ф и др. *ЖЭТФ* **95** (2) 631 (1989)
5. Альтшулер Л В и др. *ЖЭТФ* **34** (4) 874 (1958)
6. Крупников К К, Бражник М И, Крупникова В П *ЖЭТФ* **42** (9) 675 (1962)
7. *Свойства конденсированных веществ при высоких давлениях и температурах* (Под ред. Р Ф Трунина) (Арзамас-16: ВНИИЭФ, 1992)
8. Альтшулер Л В, Крупников К К, Бражник *ЖЭТФ* **34** (4) 886 (1958)
9. Альтшулер Л В и др. *ЖЭТФ* **38** (3) 790 (1960)
10. Альтшулер Л В и др. *ЖЭТФ* **38** (4) 1061 (1960)
11. Крупников К К и др. *ДАН* **148** (6) 1302 (1963)
12. Альтшулер Л В и др. *ПМТФ* (2) 3 (1981)
13. Забабахин Е И, Забабахин И Е *Явления неограниченной кумуляции* (М.: Наука, 1988)
14. Альтшулер Л В *УФН* **85** (2) 197 (1965)

Explosive laboratory measurement of the dynamical compressibility of porous substances in the pressure range from 0.1 to 1 TPa

A.I. Funtikov

Pulsed Thermal Physics Research Centre at the Institute of Hight Temperatures, Russian Academy of Sciences
ul. Izhorskaya 13/19, 127412 Moscow, Russia
Tel. (7-095) 484-28 00. Fax (7-095) 485-79 90

Earler [1], an historical review of the Sarov Nuclear Centre work on explosive laboratory devices for dynamic compressibility measurements was given, but most of the devices described there were mainly applied to normal initial densities. In the present work, Sarov explosive devices of the late 50's are described with which the dynamic compressibility of porous metals and porous ionic compounda were determined [2 – 4].

PACS numbers: **28.70.+y**, **47.40.–x**, 62.20.Fe
Bibliography — 14 references

Received 19 January 1997, revised 12 March 1997