

В заключение отметим следующее.

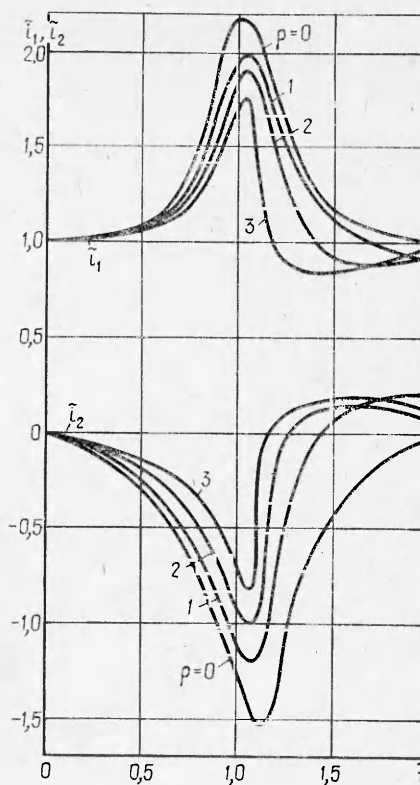
1. Для ускорения идеально проводящего тела до заданной скорости с помощью бегущей магнитной волны необходимо сообщить волне вдвое меньшую скорость и выполнить условие захвата тела волной (1.4).

2. Условием захвата идеально проводящего тела бегущей магнитной волной является требование, чтобы величина энергии магнитного поля, переносимой волной, с учетом коэффициента связи с ускоряемым телом была достаточна для сообщения этому телу кинетической энергии, соответствующей движению тела со скоростью волны.

3. Передача механического импульса от бегущей магнитной волны к ускоряемому телу имеет упругий характер, если это тело идеально проводящее и его относительная масса ниже критической. При этом конечная скорость тела вдвое превышает скорость магнитной волны.

4. Ускорение тела с конечной электропроводностью бегущей магнитной волной имеет характер неупругого взаимодействия, мерой которого является относительное активное сопротивление тела. При этом сохраняет смысл понятие критической массы тела, превышение которой приводит к срыву процесса увлечения тела магнитной волной. С ростом активного сопротивления критическая масса и конечная скорость ускоряемого тела снижаются.

5. Величина переносимой волной энергии магнитного поля, требуемой для ускорения тела или макрочастицы, сильно зависит от максимального достижимого значения коэффициента связи между катушками ускоряющего поля и частицей $(W_m \sim (\frac{v}{c} - 1) \frac{mv^2}{2})$.



Ф и г. 5

Поступила 14 V 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Манзон Б. М. Ускорение макрочастиц для управляемого термоядерного синтеза. — УФН, 1981, т. 134, вып. 4.
2. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.

УДК 537.581

ЭМИССИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ВЫХОДЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ИЗ ПОРОШКА В ВАКУУМ

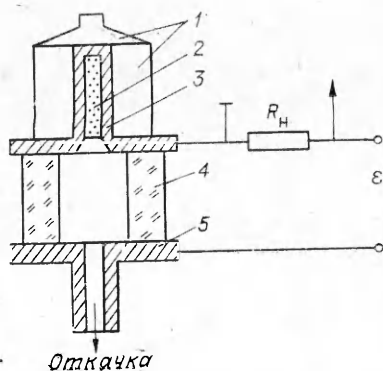
А. И. Лямкин, А. И. Матыцин, А. М. Ставер
(Новосибирск)

1. Изучение процесса разлета вещества при выходе ударной волны на свободную поверхность является одним из методов получения информации о состоянии вещества за фронтом ударной волны. Кроме того, выход мощной ударной волны сопровождается рядом интересных физических явлений: свечением свободной поверхности [1, 2], образованием плазмы [3, 4], испарением вещества в волне разгрузки [5]. Из-

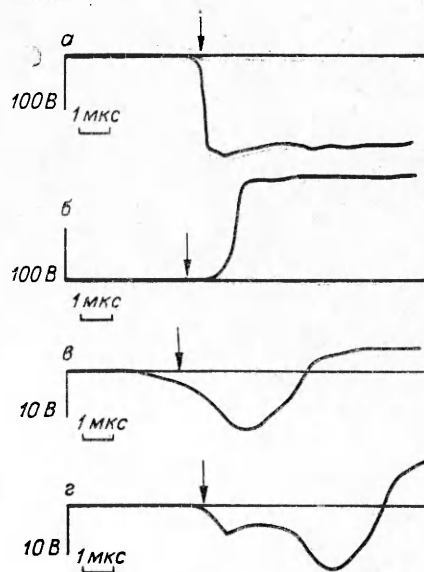
вестны также работы по изучению эмиссии заряженных частиц при высокоскоростном соударении тел [6]. В данной работе предпринята попытка наблюдения известного явления термоэлектронной эмиссии в условиях разлета вещества при выходе мощной ударной волны на свободную поверхность порошка. Постановка задачи и некоторые результаты сообщены в [7].

2. Экспериментальная сборка (фиг. 1) представляла собой вакуумный диод, катодом которого служил помещенный в дюралюминиевый контейнер 3 порошок химически чистого железа 2 плотностью $4,6 \text{ г/см}^3$, фракции $0,1-0,5 \text{ мм}$. Толщина стенок контейнера 1 мм , внутренний диаметр 10 мм , высота 50 мм . На свободной границе порошка помещалась металлическая сетка с ячейкой $0,1 \text{ мм}$. Расстояние между поверхностью порошка и анодом 5 в различных экспериментах $22-42 \text{ мм}$. Откачка воздуха производилась через дюралюминиевый анод, электрически изолированный от катода тефлоновым либо плексигласовым кольцом 4 с внутренним диаметром $20-30 \text{ мм}$. Особое внимание уделено определению давления воздуха в сборке непосредственно перед подрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ) 1. В разных экспериментах оно менялось от $0,13$ до 13 Па . Цилиндрический заряд ВВ (сплав тротил — гексоген $1 : 1$) располагался снаружи контейнера с порошком. В экспериментах по регистрации сигналов амплитудой $\sim 10 \text{ В}$ сборка экранировалась медной фольгой. На вакуумный промежуток и соединенное последовательно с ним нагрузочное сопротивление R_H величиной $5 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^5 \text{ Ом}$ подавалось постоянное напряжение различной полярности $\sim 200 \text{ В}$. Регистрировалось падение напряжения на этом сопротивлении осциллографом ОК-33 с входным сопротивлением 1 МОм (см. фиг. 1). В другой схеме без использования источника постоянного напряжения осциллографом регистрировалась разность потенциалов непосредственно между катодом и анодом. В некоторых экспериментах одновременно регистрировались электрический сигнал и свечение, возникающее при разлете вещества, с помощью скоростного фоторегистратора (СФР). В этом случае в экране вырезалась щель для наблюдения свечения. Щель СФР шириной $0,1-0,3 \text{ мм}$ располагалась вдоль оси сборки; скорость развертки изображения по пленке 3 мм/мкс . Точность измерения амплитуд электрических сигналов и скоростей не хуже 10% .

3. Детонация заряда ВВ со скоростью $7,6 \text{ км/с}$ возбуждала в порошке ударную волну, имевшую вид усеченного конуса, ось которого совпадала с осью сборки. Эта ударно-волновая конфигурация перемещалась со скоростью детонации [8]. Эксперимент организован таким образом, что боковая часть этого конуса — кося ударная волна — выходила на свободную поверхность порошка в момент окончания детонации. Прямая (маховская) ударная волна диаметром $3 \pm 1 \text{ мм}$ выходила на $1,2 \pm 0,2 \text{ мкс}$ позже, что определено в отдельных опытах.

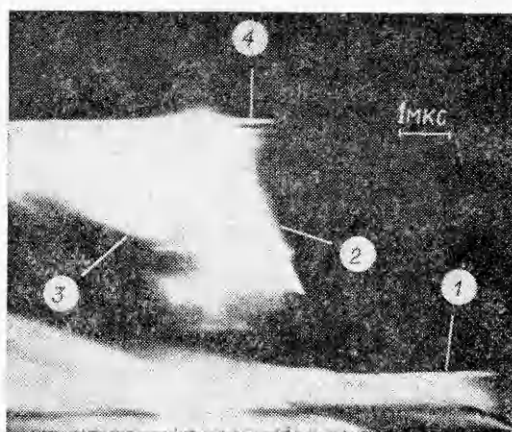


Фиг. 1



Фиг. 2

В экспериментах, выполненных по схеме фиг. 1, зарегистрированы сигналы, приведенные на фиг. 2, а (анод имеет положительный потенциал) и фиг. 2, б (анод имеет отрицательный потенциал). Стрелками отмечены расчетные моменты времени, соответствовавшие выходу маховской волны. В контрольном опыте, выполненном со сборкой без порошка, уровень сигнала по крайней мере в 100 раз меньше. Одновременная регистрация свечения (фиг. 3, 1 — момент окончания детонации, 2 — передний фронт свечения, 3 — задний фронт свечения, 4 — момент достижения свечением анода; направление развертки — справа налево, разлет вещества — снизу вверх) и электрических сигналов (фиг. 2, а, б) показала, что время появления положительного сигнала совпадает со временем достижения анода фронтом светящегося вещества с точностью 0,5 мкс. Максимальный ток, рассчитанный по амплитуде сигнала и сопротивлению осциллографа, в этих опытах 0,3 А.



Ф и г. 3

В другой серии экспериментов, когда на анод специально не подавалось никакого потенциала, сборка-диод подключалась непосредственно по входу осциллографа. После выхода ударной волны на свободную поверхность в такой цепи возникал ток, создававший падение напряжения на входном сопротивлении осциллографа. На аноде при этом появлялся отрицательный потенциал. Сигнал за время 1—2 мкс достигал минимума, а затем менял знак (фиг. 2, в). Длительность отрицательной части сигнала сокращалась с уменьшением межэлектродного расстояния. Одновременная регистрация свечения показала, что минимум потенциала соответствует моменту появления свечения, а перемена знака сигнала — моменту прихода переднего фронта свечения на анод. Расчетное время выхода маховской волны на свободную поверхность совпадает с началом сигнала на осциллограмме. У этого сигнала нередко наблюдался предшествующий амплитудой $\sim 0,5$ В, длительностью 0,5—1,2 мкс. Амплитуда сигнала в различных экспериментах 8—12 В. Изменение давления остаточных газов в сборке в пределах 0,13—13 Па не оказывало влияния на форму, амплитуду и длительность сигналов.

Чтобы выяснить, какую часть анодного тока составляет электронный ток, в одном из таких экспериментов на расстоянии 25 мм от катода размещена электрически связанная с катодом металлическая сетка. Коэффициент пропускания сетки на уровне 50%. Сигнал, полученный в этом эксперименте, приведен на фиг. 2, г. Одновременная регистрация свечения показала, что и в этом случае в пределах погрешности эксперимента минимум сигнала совпадал с моментом появления свечения между анодом и катодом, а прибытие переднего фронта свечения на анод — с переменой знака сигнала. Амплитуда сигнала в данном опыте 7 В, что лишь немногим меньше, чем в экспериментах без сетки. Во всех опытах расстояние между анодом и катодом одно и то же — 42 мм. Максимальный ток в цепи, зарегистрированный в таких опытах, ~ 20 мкА.

Свечение вещества при разлете имело следующие особенности. Сразу после окончания детонации (начала выхода косою волны на поверхность порошка) никакого свечения не наблюдалось, либо наблюдалось слабое свечение, распространявшееся к аноду с постоянной скоростью 3—5 км/с. Через 3—5 мкс на расстоянии 8—15 мм от поверхности порошка возникало сильное свечение, распространявшееся, как правило, с постоянной скоростью и имевшее два резких фронта — передний и задний. Передний

фронт распространялся к аноду со скоростью, имевшей в разных опытах значения от 6 до 20 км/с. Наиболее часто регистрировались значения скорости от 7 до 13 км/с. Влияния давления остаточных газов в указанных пределах, а также разности потенциалов между электродами на вид регистрируемой скорости распространения фронта свечения не обнаружено.

4. Результаты экспериментов свидетельствуют, что в момент выхода ударной волны на свободную поверхность порошка в промежутке между анодом и катодом появляются носители заряда. Характер зависимости сигналов от полярности приложенного напряжения указывает на то, что носители одного знака. Появление носителей только одного знака не может быть вызвано ионизацией остаточных газов. Естественно считать в соответствии с полярностью зарегистрированных сигналов, что носители зарядов появились в результате эмиссии электронов с катода, разогретого ударной волной.

Попытаемся понять, в каких условиях могла происходить эмиссия электронов.

Если воспользоваться ударной адиабатой железного порошка [9], то, согласно оценкам, за фронтом косоугольной ударной волны давления и равновесные температуры составляли соответственно 12—16 ГПа и 1000—2000 К, а за фронтом маховой волны 130—140 ГПа и $(10—12) \cdot 10^3$ К. Внутренняя энергия вещества за фронтом косоугольной волны составляла при этом 30—40 кДж/моль, а за фронтом маховой — 430—470 кДж/моль (причем упругая составляющая равна 90—100 кДж/моль).

Энергия, необходимая для нагрева железа вплоть до температуры кипения, вычисленная по данным [10, 11], составляет 120 кДж/моль, а энергия, необходимая для полной сублимации железа в вакуум — 400 кДж/моль [10]. Поскольку при разгрузке в вакуум часть внутренней энергии вещества пойдет на увеличение его кинетической энергии, то, согласно критерию Зельдовича [12], внутренней энергии даже в маховой волне не хватит для полного испарения вещества. Однако ее, по-видимому, достаточно для того, чтобы кривая разгрузки пересекла в $p - v$ -координатах линию, разделяющую однофазную и двухфазную области. Экспериментально [5] и теоретически [13, 14] показано, что процесс испарения в волне разгрузки является термодинамически равновесным и, следовательно, в волне разгрузки должна быть двухфазная область, состоящая из смеси жидкости и слабоионизованных паров железа. Эмиссия электронов в вакуум осуществлялась, по-видимому, из такой системы, на что указывает экспериментальное значение эмиссионного тока. Действительно, если эмиссия осуществляется с поверхности железа, находящегося в конденсированном состоянии, то величина эмиссионного тока должна ограничиваться пространственным зарядом и по закону «трех — вторых» составлять величину ~ 1 мА для напряжения 200 В и площади катода ~ 3 см² (что соответствует площади поперечного сечения вакуумного промежутка и заведомо больше площади махового диска). Такая величина тока по крайней мере на два порядка меньше зарегистрированной в экспериментах. В случае, когда эмиттирующей поверхностью являются слабоионизованные пары железа, закон «трех — вторых» не имеет места, поскольку отрицательный пространственный заряд частично компенсируется положительными ионами. Если оценить степень ионизации паров железа по формуле Саха, а плотность тока эмиссии по формуле $J = 2 \cdot 10^{-14} n_e T_e^{1/2}$ [15], где n_e — плотность электронов в см⁻³, а T_e — электронная температура, то видно, что наблюдавшиеся в экспериментах токи могла эмиттировать плазма с температурой $(5—10) \cdot 10^3$ К и плотностью $n_e \geq 10^{11}$ см⁻³. Подобные условия вполне могли реализоваться в волне разгрузки, поскольку, как показано экспериментально, разогрев пористых сред при ударном сжатии является неравновесным и температуры при этом могут быть больше равновесных в несколько раз [3, 16]. Подобная особенность разогрева пористых сред при ударном нагружении может быть также ответственна за появление слабого предшествующего сигнала на осциллограмме после выхода косоугольной ударной волны до выхода маховой волны.

Не совсем понятны особенности свечения, наблюдавшегося в экспериментах: задержка его возникновения, наличие двух резких фронтов и постоянная скорость распространения. Возможно, что начало свечения совпадает с началом какого-либо фазового перехода в волне разгрузки или имеет другую природу. Во всяком случае область свечения является областью повышенных температур и, следовательно, одним из основных источников термоэлектронов. На это указывает совпадение минимума сигнала с появлением свечения, а также совпадение смены знака сигнала с достижением анода фронтом свечения.

Таким образом, причиной появления зарегистрированных сигналов является термоэлектронная эмиссия. Источником термоэлектронов, по-видимому, являются ионизованные пары железа, появляющиеся при разгрузке ударно-сжатого порошка в вакуум и имеющие температуру в несколько раз выше равновесной.

Авторы выражают признательность сотрудникам лаборатории за полезные обсуждения и Н. А. Костюкову за предоставление возможности ознакомиться с результатами экспериментов по расширению в воздух порошка, сжатого маховской ударно-волновой конфигурацией.

Поступила 22 II 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Coleburn N. L., Solow M., Wiley R. C. Shock-induced luminescence.— J. Appl. Phys., 1965, vol. 36.
2. Blackburn J. H., Seely L. B. Light emitted from shocked granular sodium chloride in a vacuum.— Nature, 1964, vol. 202.
3. Беляков Г. В., Родионов В. Н., Самосадный В. И. О разогреве пористого вещества при ударном нагружении.— ФГВ, 1977, № 4.
4. Русаков М. М. Исследование расширения вещества при разлете после прохождения мощной ударной волны.— ТВТ, 1975, т. 13, № 1.
5. Альтшулер Л. В., Баканова А. А. и др. Испарение ударно-сжатого свинца в волне разгрузки.— ЖЭТФ, 1977, т. 73, вып. 5.
6. Акишин А. А., Кирюхин В. И. и др. Электронная и ионная эмиссия при соударении микронных металлических частиц со скоростями 1–5 км/с с поверхности твердого тела.— ЖТФ, 1981, т. 51, вып. 4.
7. Матыцин А. И., Ставер А. М., Лямкин А. И. Эмиссия электронов при действии ударных волн на пористое вещество.— В кн.: III Всесоюз. симп. по импульсным давлениям. Тезисы докл. М., 1979.
8. Дерибас А. А., Ставер А. М. Ударное сжатие пористых цилиндрических тел.— ФГВ, 1974, т. 10, № 4.
9. High velocity impact phenomena. N. Y.— L.: Acad. Press, 1970.
10. Термодинамические константы веществ. Вып. VI, ч. 1. М., 1972.
11. Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
12. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных газодинамических явлений. М.: Наука, 1966.
13. Фортов В. Е., Леонтьев А. А. Кинетика испарения и конденсации при изэнтропическом расширении металлов.— ТВТ, 1976, т. 14.
14. Альтшулер Л. В., Бушман А. В. и др. Изэнтропы разгрузки и уравнение состояния металлов при высоких плотностях энергии.— ЖЭТФ, 1980, т. 78, № 2.
15. Крейнделъ Ю. Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977.
16. Нестеренко В. Ф., Ставер А. М. Определение температуры при ударном нагружении границы раздела металлов.— ФГВ, 1974, № 6.

УДК 534.222

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ ВВ НА ПАРАМЕТРЫ ВОЗДУШНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

В. В. Кореньков, В. Н. Охитин

(Москва)

Экспериментально влияние плотности ВВ на параметры воздушных ударных волн (УВ) впервые исследовано в [1] на примере сферических зарядов тэна и азида свинца. Численный расчет одномерных взрывных волн в воздухе для зарядов стандартной плотности проводился в [2–5].

В данной работе рассмотрена задача о детонации в воздухе сферического заряда тэна различной плотности.