

В заключение отметим следующее. Известно, что в ближайшее время, согласно достигнутым договоренностям между странами СНГ и США, предостоят демонтаж определенного количества энергетических установок и их утилизация. При утилизации, как представляется, описанный метод мог бы оказаться полезным.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1725492. Способ получения порошка оксидов / Н.Н. Иванов, А.Н. Иванов, В.И. Соколов, А.Н. Дятлов. Заявл. 29.01.90.
2. Игнатов С.Ф., Шишкин Ю.Н. Легкоплавкая модель для исследования тепломассообмена на газодинамических установках // Уч. зап. НАГИ. — 1989. — XX, № 3.
3. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. и др. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания / Под ред. В.П. Глушко. — М.: ВИНТИ, 1971. — Т. 1.
4. Trunov A.P. and Zavelevich F.S. Gas and particles interaction in a supersonic jet // The Second Japan Soviet Union Joint Sym. Comput. Fluid Dynamics. University Hall of the University of Tsukuba. August 27—31, 1990.
5. Rudinger G. Penetration of Particles Injected into a Constant Cross Flow // AIAA J. — 1974. — 12, N 8. — P. 1138—1140.
6. Putman A. Integratable form of doplet drag coefficient // ARS J. — 1961. — 31, N 10.

125438, г. Москва,
НИИ тепловых процессов

Поступила в редакцию 6/V 1993

УДК 539.63:537.311.3

С.Д. Гилев

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УДАРНО-СЖАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Дан качественный анализ электромагнитных явлений в измерительной ячейке для исследования электрических свойств веществ при переходах в металлическое состояние. Существенное влияние на форму сигнала оказывает геометрия измерительной и силовой цепей, а также система нагружения. Разработана конструкция измерительной ячейки, обеспечивающая надежную регистрацию электропроводности вещества в ударных волнах.

Электрические свойства конденсированных веществ в ударной волне (УВ) могут быть эффективно исследованы путем анализа электромагнитного отклика образца на воздействие УВ [1—3]. При исследовании перехода диэлектрик — металл измерительная ячейка состоит из шунта в виде тонкой металлической фольги и непосредственно примыкающего к нему образца. В эксперименте измеряется напряжение на электродах, подключенных к поверхности раздела шунт — образец.

При исследовании перехода металл — металл ток течет по образцу и шунт как таковой отсутствует. В том и в другом случае имеются, с одной стороны, низкоомная силовая цепь, а с другой — движущиеся металлические проводники, смещающие или деформирующие силовые линии магнитного поля. Движение проводников в магнитном поле приводит к изменению магнитного потока через измерительную цепь, что фиксируется осциллографом как некоторый дополнительный сигнал, не связанный собственно с электрическим откликом образца на воздействие УВ. Для получения достоверной информации об электрических свойствах веществ в УВ необходим анализ электрических процессов не только в ударно-сжатом образце [1], но и во всей измерительной цепи.

Цель настоящей работы — качественный анализ электромагнитных явлений в ячейке, включающей в качестве составной части измерительный контур, цепь запитки и систему нагружения. Обсуждается конструкция

© С.Д. Гилев, 1994.

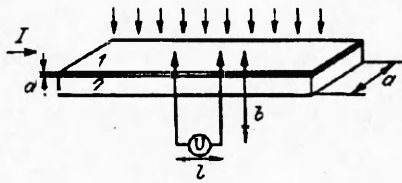


Рис. 1.

измерительной ячейки для исследования электрических свойств ударно-сжатых веществ.

1. Рассмотрим наиболее очевидную конструкцию измерительной ячейки (рис. 1). Электроды в виде тонких иголок подсоединяются к металлической фольге I в ее средней части. Ячейка может использоваться

для регистрации переходов металл \rightarrow металл и диэлектрик \rightarrow металл. В первом случае фольга является исследуемым веществом, во втором — шунтом, к которому примыкает исследуемый образец 2. Стрелками показано направление распространения УВ.

Рассмотрим ячейку для исследования перехода металл \rightarrow металл. Пусть ток через ячейку равен I . Тогда напряжение, регистрируемое вольтметром, равно $V_0 - \epsilon$, где V_0 — полезный сигнал ($V_0 = IR = I \frac{\rho l}{ad}$, ρ — удельное сопротивление образца, другие обозначения ясны из рисунка), ϵ — дополнительный сигнал, связанный с деформацией измерительного контура ($\epsilon = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = uBl = \frac{\mu_0 I u l}{2\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{a}{2b} \right)$, u — массовая скорость фольги в УВ, B — магнитное поле в точке подсоединения вольтметра). Отношение величины дополнительного сигнала к полезному

$$\frac{\epsilon}{V_0} = \frac{\mu_0 u d}{\rho a} \operatorname{arctg} \left(\frac{a}{2b} \right). \quad (1)$$

При характерных значениях величин $u = 2 \cdot 10^3$ м/с, $d = 5 \cdot 10^{-5}$ м, $a = 10^{-2}$ м, $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом \cdot м (медь) такая оценка приводит к значению $\epsilon/V_0 \approx 0,4$.

Рассмотрим ячейку для исследования перехода диэлектрик \rightarrow металл. Электромагнитные процессы при ударном сжатии существенно зависят от механизма и динамики появления проводимости в веществе. Отметим принципиальную возможность двух крайних случаев: 1) вещество сначала приобретает проводимость, а затем сжимается в УВ; 2) вещество сжимается в УВ, затем в нем появляется проводимость. Электромагнитные процессы в этих двух случаях протекают по-разному: в первом случае, при сжатии уже проводящего вещества, магнитное поле увеличивается в коэффициент сжатия вещества, во втором — магнитное поле «вмораживается» в проводящее вещество и не изменяет своей величины при переходе через ударный фронт. Поскольку фазовые переходы требуют некоторого времени на их протекание, в дальнейшем предполагаем второй из упомянутых случаев.

Определим дополнительный сигнал, связанный с деформацией измерительного контура. Перейдем в систему отсчета, связанную с движущимся веществом. В рассматриваемой системе отсчета вещество от шунта до ударного фронта покоится. ЭДС, действующая в измерительном контуре, обусловлена движением вольтметра относительно вещества. На свободные заряды в проводе, замыкающем контур у вольтметра, действует сила Лоренца $\vec{F} = q\vec{u} \cdot \vec{B}$. ЭДС, регистрируемая вольтметром: $\epsilon = uBl$, где B — магнитное поле в точке расположения вольтметра.

Таким образом, если проводник формируется ударной волной, вклад дополнительного сигнала описывается также соотношением (1), где под ρ теперь следует понимать удельное сопротивление материала шунта, а под V_0 — начальное напряжение на ячейке. Следует отметить, что вклад дополнительного сигнала в ячейке (см. рис. 1) меньше, чем при использовании строго одномерной геометрии поля, например плоской или цилиндрической, как в [4]. Краевые эффекты приводят к появлению в соотношении (1) множителя (арктангенс), который для реальной геометрии ячейки несколько уменьшает влияние постороннего сигнала.

Из сказанного выше ясно, что ударная деформация измерительного контура существенно влияет на регистрируемое напряжение с ячейки, а следовательно, и на точность определения электрических характеристик образца. Корректная регистрация переходов вещества в проводящее состояние должна обеспечивать «расшифровку» получаемого в эксперименте сигнала с целью выделения информации об электрических свойствах исследуемого материала.

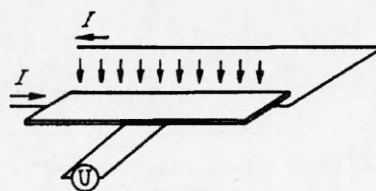


Рис. 2.

2. Относительное движение элементов измерительной ячейки существенно влияет на точность измерений. Поскольку величина соответствующего сигнала пропорциональна магнитному полю в точке расположения вольтметра ($\epsilon = uBl$), то улучшение точности может быть достигнуто размещением вольтметра в области слабого поля. Наилучшим представляется расположение электродов в плоскости фольги. На рис. 2 показана измерительная ячейка для исследования перехода металл \rightarrow металл. В этом случае при воздействии УВ измерительная цепь движется вместе с источником магнитного поля, а неподвижный вольтметр располагается в области слабого поля. Для такой конструкции измерительной ячейки дополнительный сигнал отсутствует вообще за исключением малого времени, связанного с реверберацией волн в материале фольги.

Экспериментальная проверка данной схемы подключения измерительного прибора выполнена в опытах с константановой фольгой, располагавшейся между диэлектрическими пластинами. Константан выбран в качестве тестового материала потому, что его сопротивление практически не меняется при ударном сжатии. Давление падающей УВ в диэлектрике составляло 20 ГПа. На полученной записи напряжения видны следы реверберации волн в константане, малые по сравнению с общим уровнем сигнала. В целом же регистрируемое напряжение остается практически постоянным. Проведенные контрольные опыты дают основания рекомендовать эту конструкцию ячейки для использования в исследованиях электрических свойств ударно-сжатых веществ.

3. Регистрируемый вольтметром сигнал существенно зависит не только от геометрии измерительной цепи, но и от силовой цепи, в частности от расположения обратного токопровода.

В ходе разработки конструкции измерительной ячейки опробованы различные способы размещения обратного токопровода относительно фольги: токопровод располагался параллельно фольге, до нее или после относительно направления распространения УВ. В обоих случаях наблюдался значительный паразитный сигнал, который связан с относительным движением элементов силовой цепи, состоящей из фольги и обратного токопровода. Если силовая цепь деформируется при ударном нагружении, то вольтметр фиксирует дополнительное напряжение $\epsilon = uBl$ (B — магнитное поле, создаваемое обратным токопроводом в области подсоединения измерительных электродов). Фиксируемый сигнал имеет отрицательный знак при сжатии контура и положительный — при его растяжении.

Таким образом, силовая цепь также не должна деформироваться при ударном нагружении. Наилучшим представляется расположение обратного токопровода в плоскости фольги (см. рис. 2).

4. При исследовании однократного сжатия веществ в УВ возникает достаточно тонкий краевой эффект, который рассматривается на примере перехода диэлектрик — металл. Соответствующая измерительная ячейка показана на рис. 3 без обратного токопровода. Образец 3 размещается в обойме из диэлектрика. Если ударные адиабаты образца и окружающего его диэлектрика не совпадают, то массовые скорости движения электродов и шунта не равны и вольтметр фиксирует некоторое напряжение. Паразитный сигнал в этом случае создается в части измерительной петли, непосредственно

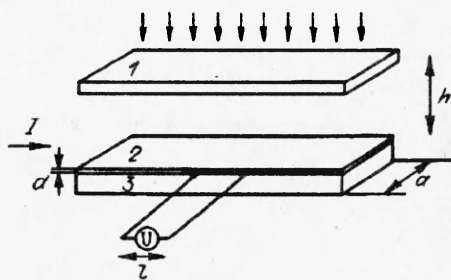


Рис. 3.

примыкающей к шунту 2. Поскольку геометрия существенно отличается от одномерной, трудно дать априорную оценку сигнала. Его величина может быть найдена лишь опытным путем. Тщательный анализ экспериментальных данных, полученных в различных условиях нагружения и для разных толщин шунтов, показывает, что величина дополнительного сигнала, связанного с отмеченным эффектом, в реальных экспериментах составляет

несколько процентов от начального напряжения на измерительной ячейке.

5. Еще одним источником электромагнитных возмущений в измерительной ячейке является система нагружения. Изменение интенсивности УВ в ячейке может быть достигнуто за счет метания металлических пластин различными взрывными устройствами или использования аттенуаторов давления (набора слоев с резко различающимися ударными импедансами). В том и в другом случае имеются движущиеся металлические проводники, которые производят деформацию магнитных силовых линий шунта (пластина 1 на рис. 3). С момента начала движения поверхности пластины, обращенной к шунту, вольтметр фиксирует дополнительное напряжение. Оно имеет отрицательный знак, зависит от массовой скорости пластины 1 и расстояния между пластиной и шунтом 2.

Может быть дано следующее качественное объяснение этого явления. Толщина металлической пластины составляет обычно несколько миллиметров. С использованием импульсной запитки силовой цепи эта толщина существенно превышает глубину скин-слоя, поэтому магнитное поле ограничено областью между шунтом и пластиной. За пластиной магнитное поле близко к нулю. Воспользовавшись методом изображений, можем заменить движущуюся пластину на токовый проводник, аналогичный шунту, но с противоположно направленным током. Тогда во всем пространстве распределение магнитного поля будет таким же, как и в случае пластины (в пренебрежении различием поперечных размеров шунта и пластины). Движение этого фиктивного токового проводника приводит, как ясно из п. 3, к появлению дополнительного сигнала, фиксируемого вольтметром.

Характерный сигнал, полученный при использовании простой системы ослабления, показан на рис. 4. В момент времени *A* УВ выходит из медной пластины в диэлектрик и осциллограф фиксирует уменьшение уровня сигнала. В момент времени *B* УВ достигает образца. Скорость движения пластины относительно образца уменьшается, что приводит к повышению уровня сигнала. При совпадении ударных адиабат диэлектрика и образца устанавливается начальный уровень напряжения. Если образец имеет меньший ударный импеданс, чем пластина, то скорость движения пластины относительно образца меняет знак и уровень сигнала становится выше начального. На рис. 4 за меткой *B* далее включается проводимость исследуемого вещества, и напряжение поэтому уменьшается.

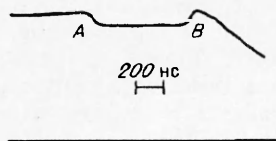


Рис. 4.

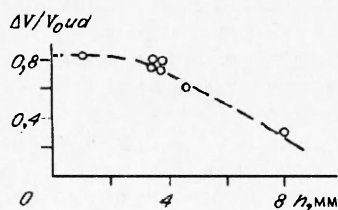


Рис. 5.

Опыт	Материал пластины	u , км/с	$\frac{\Delta V}{V_0}$	d , мм	h , мм	$\frac{\Delta V}{V_0 u d}$, с/мм ²	$\frac{\Delta V}{V_0 u d \cdot \arctg\left(\frac{a}{2h}\right)}$
1	Cu	1,89	0,32	0,2	1	0,83	0,60
2	Cu	1,48	0,11	0,1	3,5	0,75	0,78
3	Cu	1,48	0,10	0,1	3,5	0,74	0,77
4	Д16Т	2,17	0,13	0,2	8	0,30	0,54
5	Д16Т	1,66	0,13	0,1	3,5	0,77	0,80
6	Cu	1,16	0,093	0,1	3,5	0,80	0,83
7	Cu	1,16	0,069	0,1	4,5	0,60	0,72

В таблице представлены результаты экспериментов, проведенных с использованием слоистых систем ослабления УВ. Здесь u — массовая скорость движения пластины (расчет), $\Delta V/V_0$ — относительное изменение уровня сигнала при выходе УВ из пластины в диэлектрик, d — толщина шунта (константан), h — начальное расстояние между пластиной и шунтом.

В таблице для всех экспериментов приведена величина $\Delta V/V_0 u d$. Использование такой комбинации позволяет сравнить значение дополнительного сигнала для разных экспериментальных условий (поскольку $\Delta V \sim u$, а $V_0 \sim 1/d$, то относительный вклад дополнительного сигнала пропорционален массовой скорости и толщине шунта). При одинаковом расстоянии между пластиной и шунтом h найденные значения $\Delta V/V_0 u d$ близки (опыты 2, 5, 6). Вместе с тем данные таблицы показывают, что $\Delta V/V_0 u d$ зависит от расстояния h . На рис. 5 эта зависимость представлена графически. Видно, что для малых h отношение $\frac{\Delta V}{V_0 u d}$ примерно одинаково и уменьшается при увеличении h .

Такое поведение можно объяснить конечной шириной шунта (во всех экспериментах она составляла 10 мм). Если $h \ll a$, то поле в зазоре пластины — шунт близко к одномерному случаю, для больших h поле уже не одномерно и его величина существенно меньше. В последнем случае пластина движется в области, где магнитное поле мало, тем самым уменьшается добавка напряжения, регистрируемая вольтметром.

Предполагая ширину фиктивного токового проводника равной ширине шунта, учтем различие в расстоянии h для проведенных экспериментов. Для этого можно составить следующую комбинацию величин $\Delta V/V_0 u d \times \arctg\left(\frac{a}{2h}\right)$. В идеале это отношение должно оставаться постоянным независимо от h . Действительно, напряжение, регистрируемое вольтметром, за счет движения фиктивного токового проводника пропорционально магнитному полю в месте расположения измерительных электродов, а магнитное поле плоского проводника зависит от угла, под которым видна полуширина проводника (см. (1)). Из таблицы видно, что величина $\Delta V/V_0 u d \cdot \arctg\left(\frac{a}{2h}\right)$ примерно постоянная для всей серии измерений.

Таким образом, модель фиктивного токового проводника позволяет провести качественный анализ электромагнитных явлений в ячейке с системой нагружения в виде металлической пластины.

6. Из проведенного выше обсуждения следует, что геометрия измерительной, силовой цепей и системы нагружения оказывает существенное влияние на форму и величину регистрируемого сигнала. Оптимальна конструкция измерительной ячейки с электродами, расположенными в плоскости шунта (см. рис. 2, 3). При этом обратный токопровод должен располагаться в той же плоскости, чтобы силовая цепь не деформировалась ударной волной.

Выполненный анализ электромагнитных явлений в измерительной ячейке для исследования электрических свойств веществ в УВ позволяет сделать следующие выводы:

1) движение проводников приводит к появлению дополнительных сигналов, регистрируемых измерительным прибором. Характерная величина сигналов может достигать десятков процентов относительно начального уровня, что приводит к катастрофическому падению точности измерений электрических свойств веществ;

2) учет влияния электромагнитных эффектов может быть выполнен в ряде относительно простых случаев на основе квазистационарного приближения в рамках классической электродинамики;

3) выбором рациональной конструкции измерительной ячейки можно уменьшить вклад паразитного сигнала до достаточно низкого уровня. В целом в результате анализа эффектов, связанных с деформацией контуров или силовых линий магнитного поля, измерения электрических свойств веществ в УВ могут быть выполнены с приемлемой точностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гилев С.Д. Скин-эффект в веществе, приобретающем под действием ударной волны высокую проводимость // Взрывные и нестационарные процессы в сплошных средах. (Динамика сплошной среды). — Новосибирск: ИГиЛ, 1988. — Вып. 88. — С. 31—46.
2. Гилев С.Д., Трубачев А.М. Метод измерения электропроводности вещества в ударных волнах // Материалы IV Всесоюз. совещ. по детонации. — Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1988. — Т. 2. — С. 8—12.
3. Биченков Е.И., Гилев С.Д., Трубачев А.М. Ударно-индуцированные волны проводимости в электрофизическом эксперименте // ПМТФ. — 1989. — № 2. — С. 132—145.
4. Гатилов Л.А., Кулешова Л.В. Измерение высокой электропроводности в ударно-сжатых диэлектриках // ПМТФ. — 1981. — № 1. — С. 136—140.

630090, Новосибирск,
ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию 17/VI 1993,
после доработки — 5/X 1993

УДК 534.222.2

С.А. Ждан

ПРЕДЕЛЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В ТРУБЕ ДЕТОНАЦИИ ВАКУУМ-ВЗВЕСЕЙ

Сформулирована и численно исследована задача о стационарной детонации в вакууме с частицами унитарного топлива, распространяющейся в трубе. Показано влияние трения и тепловода в стенке трубы на структуру дисперсной волны. Определены зависимости скорости детонации от диаметра трубы, размеров частиц топлива и их массовой концентрации, найдены пределы ее распространения.

Структура детонационных волн (ДВ) в газозвесах унитарного топлива исследовалась в работах [1—3]. Установлено, что структура идеальной ДВ качественно соответствует модели [4] Зельдовича — Неймана — Деринга (ЗНД): детонационный комплекс — замороженная ударная волна (УВ), зона релаксации, зона энерговыделения. В [5, 6] проведено качественное исследование особых и стационарных точек системы уравнений, а также серия расчетов гетерогенной детонации в газозвеси горящих частиц. В работах [7, 8] показана возможность существования идеальной ДВ в вакуум-взвесах, исследованы особенности структуры идеальной стационарной и динамика нестационарной ДВ. Установлено, что детонация вакуум-взвесей не соответствует модели ЗНД, так как в детонационном комплексе отсутствует замороженная УВ, а передний фронт ДВ — контактный разрыв. В плоскости воспламенения существует контактный разрыв по газу. Рассчитаны и проанализированы профили параметров в зоне реакции идеальной ДВ.

В данной работе решена задача о структуре неидеальной (с импульсными и тепловыми потерями в стенку) дисперсной ДВ, распространяющейся в трубе

© С.А. Ждан, 1994.