

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

А. Н. Дремин, О. К. Розанов, В. В. Якушев

(Москва)

Известно, что прохождение сильных ударных волн вызывает электрическую поляризацию полярных диэлектриков [1-2] и ионных кристаллов [3-6]. Для экспериментального наблюдения этого явления используется электрическая цепь, схематически показанная на фиг. 1. Цепь состоит из плоско-параллельного конденсатора, через одну из пластин которого в исследуемое вещество входит ударная волна, и нагрузочного сопротивления R , с которого снимается электрический сигнал.

Зависимость поляризационного тока $I(t)$ от геометрии образца, параметров ударной волны, а также электрических характеристик исходного и ударносжатого вещества теоретически рассматривалась Аллисоном [7] и Я. Б. Зельдовичем [8]. В обоих работах постулируется, что фронт ударной волны создает начальную поляризацию вещества P_0 , уменьшающуюся при удалении от фронта. Аллисон [7] предполагает, что убывание P_0 во времени происходит экспоненциально с характеристическим временем механической релаксации τ . Я. Б. Зельдович [8] рассматривает распад P_0 через компенсацию связанных зарядов свободными носителями тока.

Прямое экспериментальное определение времени механической релаксации τ во многом должно облегчить отыскание электрических характеристик ударносжатого вещества, а также позволит оценить применимость в каждом конкретном случае того или иного теоретического приближения.

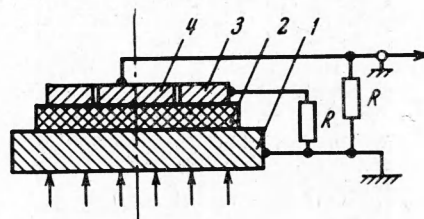
Величина τ может быть получена непосредственно по характеру уменьшения поляризационного тока после прохождения ударной волны по образцу, при условии исключения отражения ударной волны от второй обкладки конденсатора [5,9]. Экспериментально это условие можно осуществить применяя образцы, в которых роль электрода (фиг. 1) выполняет тонкая металлическая фольга, плотно зажатая между двумя (основной и вспомогательной) пластинами исследуемого диэлектрика [9]. Соответствующая осциллограмма поляризационного и релаксационного сигналов плексигласа, полученная при давлении 150 кбар, приведена на фиг. 2, а.

1. Поляризация плексигласа в отраженных ударных волнах. При постановке поляризационных экспериментов по обычной схеме (фиг. 1) после достижения ударной волной металлического электрода назад по сжатому веществу начинает распространяться отраженная ударная волна. Поляризационный сигнал, возникающий в отраженной волне, будет в этом случае накладываться на релаксационный сигнал, показанный на фиг. 2, а. При заданной интенсивности прямой волны p_1 , давление в отраженной волне p_2 зависит от соотношения динамических жесткостей исследуемого вещества и материала электрода. Применяя электроды из различных металлов (Cu, Mg), можно менять величину этого давления.

На фиг. 2, б, в приведены типичные осциллограммы поляризационных сигналов плексигласа, возникающих в прямой ($p_1 = 150$ кбар) и отраженных ударных волнах различной интенсивности.

Неожиданным фактом является то, что отраженная волна, распространяясь в направлении, противоположном направлению прямой волны, вызывает поляризацию плексигласа того же знака, что и прямая. Особенно наглядно это видно, если разделить во времени выход прямой волны на электрод и приход отраженной волны. Для этого достаточно в опытах по измерению τ [9] на вспомогательный слой диэлектрика поместить массивную металлическую пластину — отражатель. Осциллограмма, полученная в подобном эксперименте, приведена на фиг. 2, г. Заметим, что как следует из фиг. 2, а, в случае прихода в исследуемый образец со стороны свободной поверхности вспомогательной пластины диэлектрика волны разрежения, фиксируется сигнал противоположной полярности.

2. Электрические явления при динамическом нагружении неполярных веществ. Изучение поляризации в отраженных ударных волнах может дать дополнительную информацию о свойствах ударносжатого вещества. Наиболее простым и в то же время интересным объектом исследования с этой точки зрения являются диэлектрики, молекулы которых в исходном состоянии не имеют постоянного дипольного момента.



Фиг. 1. Схема экспериментального устройства: 1 — металлическая пластина — экран (первая обкладка конденсатора), 2 — исследуемый диэлектрик, 3 — охранный слой, 4 — электрод (вторая обкладка конденсатора). Стрелками показано направление движения фронта ударной волны

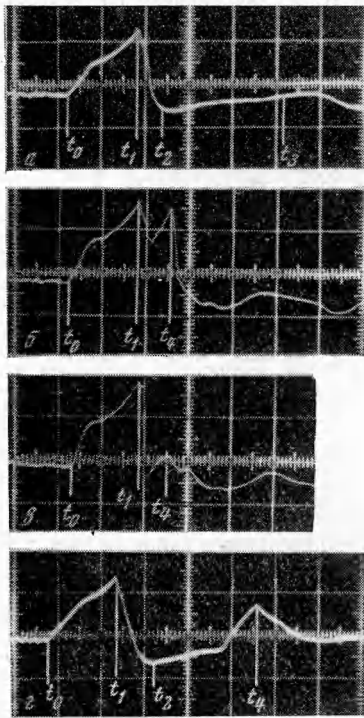
Известно [1], что для таких веществ поляризация в прямой волне не наблюдается. Тем не менее предварительное исследование показало, что, начиная с некоторого давления в CCl_4 , бензоле и некоторых других неполярных веществах, электрический сигнал может возникать после прохождения ударной волны по образцу в момент достижения ударным фронтом второго электрода [10]. Причем амплитуда и знак этого сигнала зависят от свойств металла электрода.

Эксперимент и результаты. Опишем эксперименты, которые были поставлены с целью выяснения природы этого явления в CCl_4 . Основная часть их была выполнена с применением устройства, схематически показанного на фиг. 3. Активный заряд взрывчатого вещества, создающий в CCl_4 начальную ударную волну с плоским фронтом

и требуемой амплитудой, имел диаметр 60 или 80 мм и отношение высоты к диаметру ~ 2 .

Для регистрации возникающих электрических сигналов применялся двухлучевой осциллограф ОЭ-2 конструкции Филлиала ИХФ АН СССР, имеющий усилители с временем установления 0.1 мксек и входным сопротивлением 100 ом.

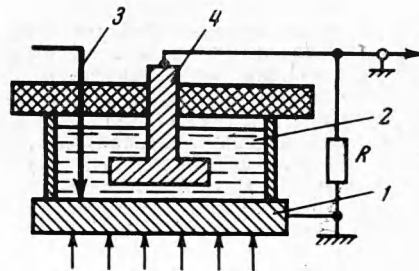
Скорости ударных волн в CCl_4 , необходимые для расчетов, вычислялись по ударной адиабате CCl_4 [11] с использованием известного состояния материала экрана, а также в отдельных опытах определялись непосредственно при помощи фоторегистра по засветке воздушных зазоров.



Фиг. 2. Типичные осциллограммы электрических сигналов плексигласа ($p_1 = 150$ кбар). Масштаб времени — 0.25 мксек/деление. Чувствительность — 7 в/деление. Наложение на релаксационный сигнал поляризационных сигналов, возникающих: а) — в волне разрежения и б) — в отраженной ударной волне. Сигналы, возникающие при использовании схемы, приведенной на фиг. 1: в) — электрод из меди, г) — электрод из магния; t_0 — начало поляризационного сигнала в прямой волне; t_1 — конец поляризационного сигнала в прямой волне; t_2 — начало релаксационного сигнала; t_3 — начало поляризационного сигнала в волне разрежения; t_4 — максимум поляризационного сигнала в отраженной ударной волне

На фиг. 4 приведены некоторые осциллограммы, показывающие изменение характера электрических сигналов в зависимости от различных условий проведения эксперимента: изменения материала электрода (фиг. 4, а, б, в), нагрузочного сопротивления R_e (фиг. 4, в, г), амплитуды входящей ударной волны p_1 (фиг. 4, в, д) и размеров электрода (фиг. 4, б, в). Рассмотрим ряд особенностей фиксируемых сигналов.

Фиг. 3. Схема экспериментального устройства для исследования поляризации жидкостей. 1 — алюминиевый экран диаметром 80 и толщиной 8 мм, 2 — исследуемое вещество, 3 — датчик отметки входа ударной волны в исследуемое вещество, 4 — электрод, выполненный из различных металлов. Стрелками показано направление движения фронта ударной волны. Зазор между экраном и электродом ~ 3 мм



Из экспериментов, выполненных с отметкой момента входа t_0 ударной волны (например, фиг. 4, а) следует, что сигнал возникает через некоторое время t_5 после начала распространения ударной волны по CCl_4 . При давлении $p_1 = 180$ кбар, t_5 совпадает с временем t_6 прохождения этой волны между экраном и электродом. При $p_1 =$

≈ 100 кбар $t_5 > t_6$. В этом случае появление сигнала с достаточной точностью совпадает с моментом начала трехкратного сжатия, т. е. с тем моментом, когда отраженная от электрода волна доходит до экрана. Специальные опыты, в которых применялся дополнительный усилитель УЗ-5, позволили установить, что возможная плотность поляризационного тока в прямой волне при $p_1 = 180$ кбар меньше 10^{-5} а/см², что в наших экспериментах составляет предел чувствительности, определяемый электрическими шумами. В обычной постановке опытов (фиг. 3) поляризационный сигнал в прямой волне при диаметре электрода 23 мм и максимальной чувствительности ОЭ-2 (0.05 в/см) не фиксируется даже при давлении $p_1 = 320$ кбар.

Из фиг. 4, а, б, в видно, что при $p_1 = \approx 180$ кбар для медных и серебряных электродов сигнал имеет положительную полярность, для магниевых и цинковых — отрицательную.

Максимальная амплитуда сигнала U_{\max} при постоянном давлении p_1 зависит от металла электрода, но в интервале давлений 100 — 180 кбар не превышает по абсолютной величине 1.2 в.

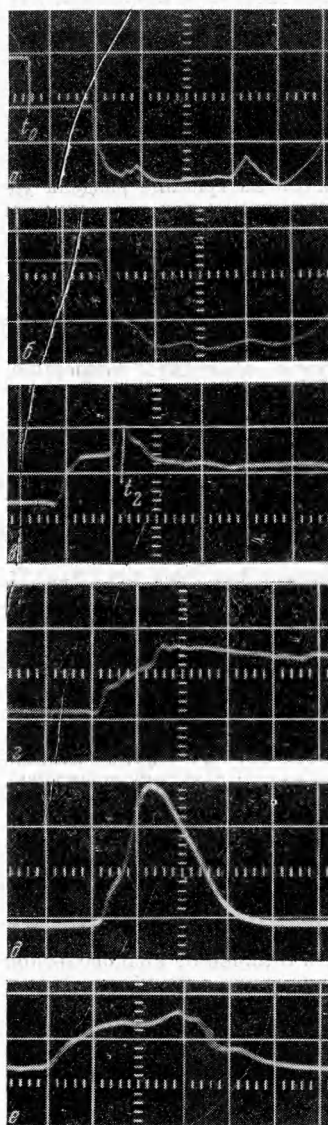
При $p_1 = 180$ кбар амплитуда U_{\max} остается практически постоянной при изменении нагрузочного сопротивления от 35 до 510 ом.

Во всех случаях возникший сигнал не меняет полярности за время наблюдения, достаточное для осуществления нескольких отражений ударной волны от электрода и экрана.

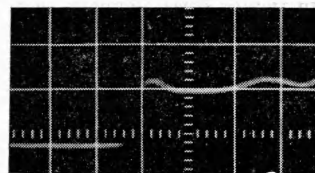
Обсуждение результатов. Экран, электрод, а также ударносжатый слой CCl_4 между ними (в дальнейшем — сжатый слой) можно рассматривать как некоторый эквивалентный генератор, имеющий внутреннее сопротивление R_i и электродвижущую силу (э. д. с.) E . Этот генератор нагружен на активное сопротивление входной цепи прибора R_e . В этом случае для регистрируемого напряжения U имеем

$$U = E / (1 + \alpha) \quad (\alpha = R_i / R_e) \quad (1)$$

В предположении, что R_i равно активному сопротивлению сжатого слоя, его можно вычислить из известной [12] зависимости удельной электропроводности динамически нагруженного CCl_4 от давления.



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Осциллограммы электрических сигналов, возникающих при ударном нагружении CCl_4 в экспериментах по схеме фиг. 3. Масштаб времени: а), б), д), е) — 0.5 мксек/деление; в), з) — 0.25 мксек/деление. Чувствительность: а) — 0.5 в/деление; б) — 0.4 в/деление; в), з) — 0.3 в/деление; д) — 0.4 в/деление; е) — 0.6 в/деление. R_e : а), б), в), д), е) — 50 ом; з) — 510 ом. Диаметр электрода: а), б), в), з), д) — 23 мм; е) — 40 мм. Материал электрода: а) — Mg, б) — Zn; в) — Cu, Ag; з), д), е) — Cu. p_1 : а), б), в), з) — 180 кбар; д), е) — 100 кбар.

Фиг. 5. Осциллограмма электрического сигнала, возникающего при достижении ударной волной ($p_1 = 180$ кбар) электрода из медной фольги. Масштаб времени — 0.5 мксек/деление. Чувствительность — 0.25 в/деление

При $p_1 = 180$ кбар в течение всего времени наблюдения $\alpha \ll 1$. (По данным работы [12] в этом случае сопротивление сжатого слоя CCl_4 диаметром 23 мм порядка 0,5 ом, что соответствует $\alpha \sim 10^{-2}$, и нет оснований считать, что при последующих отражениях сопротивление слоя может увеличиться.) В связи с этим из (1) следует, что $U \approx E$.

Заметим, что R_i может включать в себя и даже определяться сопротивлениями перехода, возникающими на границе раздела ударносжатых фаз металл — исследуемое вещество. Возможно, что именно с этим связано падение напряжения, всегда наблюдающееся в течение некоторого времени при $t > t_2$ для медных и серебряных электродов при $p_1 = 180$ кбар и $R_e = 50$ ом (фиг. 4, е). При достаточно большой величине R_e сопротивления переходов оказываются несущественными и падения напряжения не происходит (фиг. 4, е). Однако для дальнейших рассуждений важно сделать оценку только максимально возможного E , а, как уже отмечалось, U_{\max} от R_e не зависит. Таким образом, при рассматриваемом давлении максимальное значение э. д. с., зависящее от природы металла, не превышает по абсолютной величине 1,2 в.

Вообще говоря, э. д. с. порядка 1 в, возникающая при распространении ударной волны по электропроводной среде с произвольным типом проводимости, может определяться поляризацией на фронте ударной волны в объеме вещества, а также термоэлектрическими или электрохимическими явлениями на границе раздела ударносжатых фаз металл — исследуемое вещество [10, 13]. Однако как при наличии поляризации в объеме, так и при возникновении термо-э. д. с. на границах раздела фаз сигнал в общем случае должен менять знак при изменении направления распространения ударной волны. Независимость знака возникающего сигнала от направления ударной волны, а также корреляция изменения знака E с положением металла электрода в ряде напряжений позволяет предположить, что наблюдаемое явление имеет электрохимическую природу.

Основываясь на этом предположении, нетрудно объяснить экспериментальную зависимость $U(t)$ для $p_1 = 100$ кбар фиг. 4, д. Действительно, при однократном сжатии до давления 100 кбар величина $\alpha \sim 10^2$, т. е. электропроводность вещества слишком низка для фиксации электрохимического сигнала. Он возникает при повышении электропроводности вследствие многократного сжатия CCl_4 в зазоре между экраном и электродом. В самом деле, длительность наблюдаемого импульса (фиг. 4, д) хорошо совпадает с рассчитанным временем разгрузки многократно сжатого слоя до исходного давления, реализуемого при однократном сжатии, и увеличивается при использовании электродов большего диаметра и большей толщины (фиг. 4, е).

Дальнейшим подтверждением электрохимической природы регистрируемых сигналов является смена полярности сигнала для цинкового электрода при замене алюминиевого экрана на магниевый ($p_1 = 195$ кбар) и возникновение сигнала (фиг. 5) при использовании в качестве электрода полоски медной фольги толщиной 0,05 мм и шириной 20 мм, расположенной перпендикулярно экрану. В последнем случае несмотря на то, что отраженная волна отсутствует, сигнал сохраняет практически постоянную амплитуду в течение всего времени наблюдения.

Следует отметить, что электрический сигнал в рассмотренных экспериментах может возникать и тогда, когда экран и электрод изготовлены из одного металла, например алюминия. Однако в этом случае величина и форма сигналов меняются от опыта к опыту. По-видимому, это явление связано с возможной электрохимической неэквивалентностью двух границ раздела ударносжатых фаз металл — CCl_4 .

В заключение остановимся на общей стороне вопроса поляризации в ударных волнах. Для объяснения величины поляризационного тока, возникающего при ударном нагружении до давления 100—200 кбар некоторых полярных диэлектриков [1-2] и ионных кристаллов [3-6], оказывается необходимым ввести в эквивалентную измерительную цепь источник напряжения, имеющий э. д. с. больше 10^4 в [3]. Такая поляризация может быть названа высоковольтной, в отличие от низковольтной поляризации, наблюдающейся при прохождении ударной волны по полупроводникам [14]. В этом случае э. д. с. при амплитуде ударной волны ~ 200 кбар составляет $\sim 0,4$ в. Как было показано на примере CCl_4 , сигнал такого же порядка наблюдается и при динамическом нагружении некоторых других веществ, становящихся электропроводными в ударносжатом состоянии.

Представляется не очевидным, что физическая природа низковольтной поляризации может быть объяснена явлениями, происходящими только на ударном фронте (в объеме вещества), например активацией примесей в полупроводниках [6]. Фиксируемые сигналы могут быть в значительной степени обусловлены термоэлектрическими [13] или электрохимическими эффектами на границе раздела ударносжатых фаз металл — исследуемое вещество. В частности, на основании описанных в данной работе экспериментов можно сделать вывод, что электрические сигналы, возникающие при динамическом нагружении CCl_4 , имеют электрохимическую природу и, таким образом, связаны с присутствием в ударносжатом веществе ионов.

Поступила 19 III 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Eichelberger R. I., Hauver G. E. Solid State Transducers for Recording of Intense Pressure Pulses. Colloq. Internat. Centre nat. rech. scient., 1962, No. 109.
2. Hauver G. E. Shock-Induced Polarization in plastics. II. Experimental study of plexiglas and polystyrene. J. Appl. Phys., 1965, vol. 36, No. 7.
3. Иванов А. Г., Минеев В. Н., Новицкий Е. З., Янов В. А., Безруков Г. И. Об аномальной поляризации хлористого натрия при ударном нагружении. ЖЭТФ, Письма в редакцию, 1965, т. 2, вып. 8.
4. Linde R. K., Murri W. J., Dogan D. G. Shock-Induced Electrical Polarization of Alkali Halides. J. Appl. Phys., 1966, vol. 37, No. 7.
5. Иванов А. Г., Новицкий Е. З., Минеев В. Н., Лисицын Ю. В., Тюняев Ю. Н., Безруков Г. И. Поляризация щелочно-галогидных кристаллов при ударном нагружении, I. ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 1.
6. Минеев В. Н., Тюняев Ю. Н., Иванов А. Г., Новицкий Е. З., Лисицын Ю. В. Поляризация щелочно-галогидных кристаллов при ударном нагружении. II. ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 4.
7. Allison F. E. Shock-Induced Polarization in Plastics. I Theory. J. Appl. Phys., 1965, vol. 36, No. 7.
8. Зельдович Я. Б. Э. д. с., возникающая при распространении ударной волны по диэлектрику. ЖЭТФ, 1967, т. 53, вып. 1.
9. Якушев В. В., Розанов О. К., Дремин А. Н. Об измерении времени релаксации поляризации в ударной волне. ЖЭТФ, 1968, т. 54, № 2.
10. Якушев В. В., Розанов О. К., Дремин А. Н. Поляризация CCl_4 в отраженных ударных волнах. ЖЭТФ, Письма в редакцию, 1968, т. 7, вып. 5.
11. Compendium of shock wave data. Univ. Calif. 1966, vol. 2.
12. Duff R. E., Gust W. H., Roysse E. B., Mitchell A. C., Keeler R. N., Hoover W. G. Shock—Wave Studies in Condensed Media. Symposium High Dynamic Pressure, Paris, 1967.
13. Ильхин В. С., Кологривов В. Н. Электродвижущая сила пары металлов, сжатых ударной волной. ПМТФ, 1962, № 5, стр. 175—176.
14. Минеев В. Н., Иванов А. Г., Новицкий Е. З., Тюняев Ю. Н., Лисицын Ю. В. Поляризация кремния и германия при ударном нагружении. ЖЭТФ, Письма в редакцию, 1967, т. 5, вып. 9.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ТЕПЛОБМЕН ПОТОКА ПЛАЗМЫ АРГОНА СО СТЕНКАМИ КАНАЛА**

В. И. Рождественский

(Москва)

Проведено экспериментальное исследование влияния внешнего поперечного магнитного поля на теплообмен потока низкотемпературной плазмы аргона со стенками канала в ламинарной и переходной области изменения чисел Рейнольдса. Показано, что магнитное поле слабо влияет на теплообмен в исследованных диапазонах изменяемых параметров. При наложении магнитного поля теплообмен уменьшается.

Из общих положений магнитной гидродинамики известно [1], что внешнее магнитное поле может оказывать существенное влияние на течение электропроводящей среды, а в случае неизотермического течения и на теплообмен с окружающим пространством или со стенками канала. Характер влияния магнитного поля на теплообмен определяется разными факторами, наиболее существенными из которых являются: относительная ориентация векторов магнитной индукции и осредненной скорости потока, режим течения, специфические свойства проводящей среды, величина индукции магнитного поля, а также электропроводность стенок канала.

Большинство теоретических и экспериментальных исследований теплообмена в магнитном поле относится к течению в каналах электропроводящих жидкостей (жидких металлов и электролитов). Наиболее полный обзор достижений в этом направлении содержится в работе [2].