

УДАРНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ

А. И. Гончаров, С. П. Соловьев

Институт динамики геосфер РАН, 119334 Москва, kulikov@idg4.chph.ras.ru

Предлагается новый метод расчета сигналов ударной электрической поляризации материалов, на основе которого проведен анализ опубликованных ранее результатов экспериментов по ударной электрической поляризации оргстекла. Представлены также результаты экспериментов по ударной электрической поляризации гранита.

Ключевые слова: ударная волна, массовая скорость, давление, дипольный момент, диэлектрическая проницаемость.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних 20–30 лет не ослабевают интерес к проблеме взаимосвязи электромагнитных явлений с механическими разрушениями в земной коре. Предполагаемое сходство механизмов возбуждения механоэлектрических преобразователей в земной коре и в лабораторных условиях побудило исследователей использовать для моделирования электромагнитных эффектов различные по интенсивности и характеру деформационные воздействия: от медленного деформирования образцов на различных прессах до ударного сжатия образцов с помощью взрывных генераторов плоских ударных волн. Интенсивная деформация и разрушение образцов горной породы сопровождаются целым рядом эффектов, связанных с возникновением электрических зарядов: генерация низкочастотных электрических и магнитных полей, излучение в области радиодиапазона, эмиссия заряженных частиц, оптическое и рентгеновское излучение, микрозаряды при раскрытии трещин. Распространение ударной волны по образцу горной породы сопровождается возникновением скачка потенциала на ударном фронте.

Электромагнитные явления, сопутствующие взрывным процессам, изучаются относительно давно, но тем не менее остается много вопросов, требующих решения. Одно из направлений исследований — ударная электрическая поляризация материалов. Согласно существующим представлениям в материале, подвергнутом ударно-волновому воздействию, на ударном фронте образуется двойной слой разделенных зарядов. Дипольный момент этого слоя P_0 зависит от свойств конкретного материала и величины скачка давления на удар-

ном фронте. Слой зарядов, перемещаясь вместе с фронтом ударной волны, излучает электромагнитный сигнал. Сигнал обычно регистрируется методом плоского конденсатора, обкладки которого параллельны фронту распространяющейся в материале плоской ударной волны. Существует несколько теоретических представлений (как качественных [1], так и количественных [2]) формы излучаемого сигнала, в зависимости от сделанных авторами допущений. Применяемая нами математическая модель ударной электрической поляризации материала отличается от существующих. Назовем ее моделью трех последовательных конденсаторов.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Описание математической модели дано в работе [3] и доложено в [4]. На рис. 1 схематически показана опытная сборка для измерений сигналов электрической ударной поляризации. Сигнал рассчитывался исходя из эквивалентной электрической схемы, приведен-

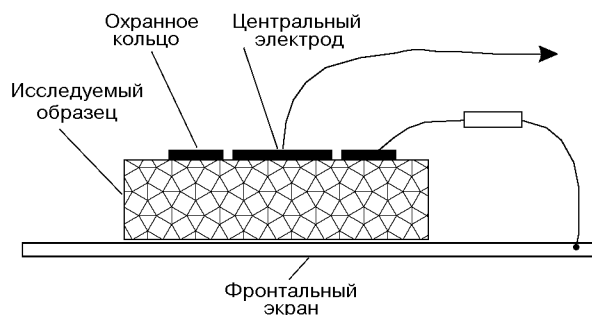


Рис. 1. Схема опытной сборки для исследования электрической ударной поляризации материалов

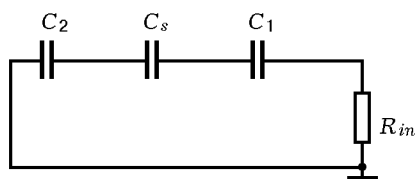


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема опыта по ударной электрической поляризации материалов

ной на рис. 2. Экспериментальная сборка представлена в этой схеме тремя последовательно включенными конденсаторами, замкнутыми в цепь через сопротивление R_{in} . Регистрируемый сигнал есть падение напряжения на сопротивлении R_{in} . Невозмущенная часть исследуемого материала представлена конденсатором C_1 , часть материала, подвергнутого ударному сжатию, — конденсатором C_2 . Конденсатор C_s представляет собой двойной слой разведенных зарядов на фронте ударной волны, распространяющейся по исследуемому образцу толщиной h со скоростью D . Конденсатор C_s заряжен до напряжения U_s . Электрические параметры сигнала определяются законом Ома для всей цепи, который сводится к безразмерному дифференциальному уравнению

$$\frac{d\xi}{dx} = 1 - \xi\eta \left[(1 - x) + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \left(1 - \frac{u}{D} \right) x \right],$$

где $\xi = q(R_{in}D/U_s h)$ — безразмерный заряд, $x = t(D/h)$ — безразмерное время, $\eta = h/DR_{in}C_0$ — отношение времени распространения ударной волны в образце к $R_{in}C_0$, где C_0 — начальная емкость опытной сборки, ε_1 и ε_2 — относительная диэлектрическая проницаемость соответственно в нормальных условиях и в ударно-сжатом материале, u — массовая скорость.

Форма сигнала зависит от параметра η и отношения $\varepsilon_1/\varepsilon_2$. На рис. 3 приведены примеры синтетических сигналов, рассчитанных по вышеприведенной формуле, при $\eta = 10$ и 100 , $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 0,005$ и $0,5$.

Сигнал начинается с фронтального (или головного) импульса, быстро достигает минимума и затем снова растет. Длительность фронтального импульса уменьшается с ростом параметра η . Амплитуда вторичного роста сигнала зависит от отношения $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ и никогда не достигает начального значения. При

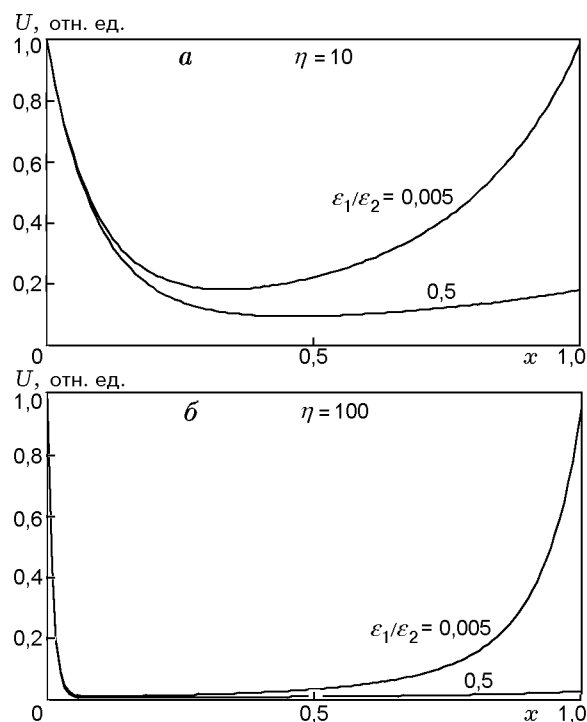


Рис. 3. Расчетные сигналы ударной электрической поляризации

$\eta \geq 100$ длительность фронтального импульса настолько мала, что он не регистрируется осциллографом. Отношение реального сигнала к подобному расчетному сигналу равно напряжению U_s .

МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И РАСЧЕТНОГО СИГНАЛОВ

Определение ударной поляризации материала начинается с преобразования временной развертки экспериментального сигнала к безразмерному времени и с вычисления параметра η по результатам специальных опытов, где в подобной сборке измерялось давление ударной волны манганиновым датчиком. Затем с найденным значением η проводится численный расчет сигнала при $\varepsilon_1/\varepsilon_2 \approx 1$. Подбирается амплитудный коэффициент подобия реального и расчетного сигналов. В реальных экспериментальных сигналах отсутствуют фронтальные импульсы, поэтому они сравниваются с расчетом по зафронтальному росту сигнала. Кривизна этой части расчетного сигнала изменяется подбором отношения $\varepsilon_1/\varepsilon_2$; если кривизна реального сигнала больше, чем результат

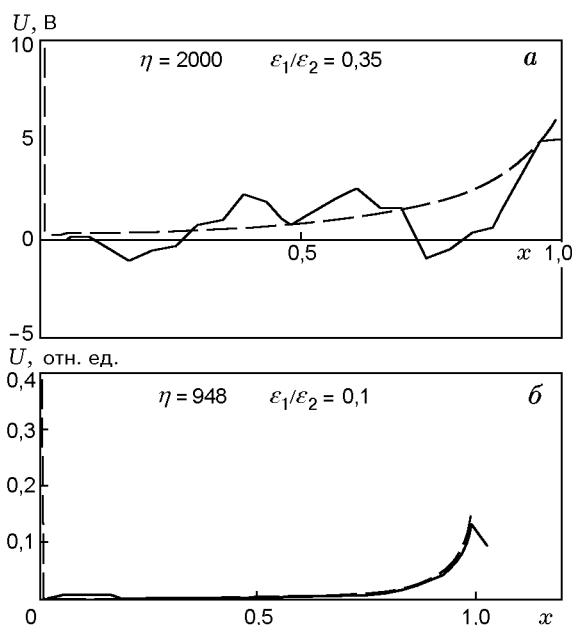


Рис. 4. Сравнение расчетных сигналов (штриховые кривые) с сигналами, полученными в опытах (сплошные линии) с гранитными образцами (а) и с образцами из оргстекла [5] (б)

первичного расчета, то отношение ϵ_1/ϵ_2 следует изменить в сторону уменьшения, используя метод последовательных приближений. Следующий цикл пересчета синтетического сигнала проводится при измененном отношении ϵ_1/ϵ_2 , при этом уточняется амплитудный коэффициент подобия. Если необходимо, еще раз изменяется отношение ϵ_1/ϵ_2 и проводится еще один цикл пересчета. Обычно двух-трех циклов достаточно, чтобы синтетический сигнал удовлетворительно совпал с реальным. На рис. 4, а показан результат такого подбора синтетического сигнала, соответствующего реальному сигналу ударной электрической поляризации гранита.

В работе [5] представлены экспериментальные сигналы ударной электрической поляризации оргстекла и полистирола. Нами проведен анализ этих сигналов вышеописанным методом трех последовательных конденсаторов. На рис. 4, б показан пример подбора синтетического сигнала для одного из экспериментальных сигналов ударной поляризации оргстекла. В данном случае изменялась амплитуда опытного сигнала для сведения его с расчетом, поэтому на оси ординат отложены относительные величины, максимальное значение кото-

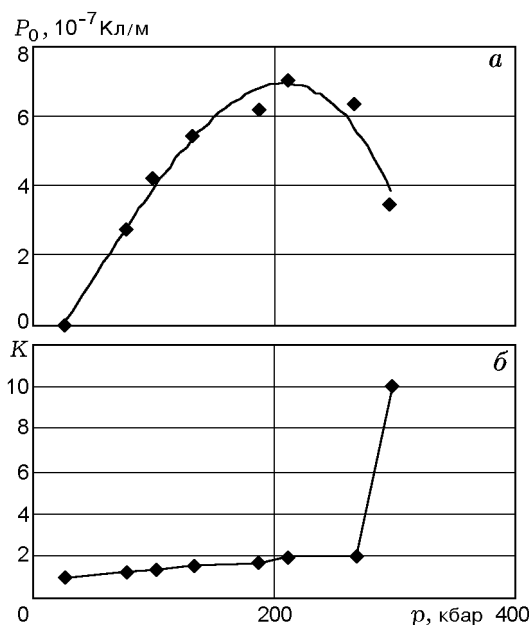


Рис. 5. Зависимости дипольного момента, возникающего на ударном фронте в оргстекле (а), и диэлектрической проницаемости ударно-сжатого оргстекла, отнесенной к ее начальному значению (б), от амплитуды давления ударного скачка

рых может достигать 1 (амплитуда фронтального импульса). Амплитудный коэффициент пропорциональности синтетического и опытного сигналов равен напряжению U_s заряженного конденсатора C_s . Заряд конденсатора равен $q_s = U_s C_s$; C_s определяется как емкость плоского конденсатора: $C_s = \epsilon_0 \epsilon_2 S / \delta$, где δ — толщина слоя зарядов на фронте ударной волны, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, S — площадь. Дипольный момент этого слоя можно определить как $P_0 = q_s \delta / S$. Из этих трех формул следует $P_0 = \epsilon_0 \epsilon_2 U_s$.

На рис. 5 показаны зависимость ударной электрической поляризации плексигласа (P_0) от давления ударной волны и зависимость отношения диэлектрической проницаемости ударно-сжатого оргстекла к диэлектрической проницаемости при нормальных условиях ($K = \epsilon_2/\epsilon_1$) от давления ударной волны; зависимости построены исходя из модели трех последовательных конденсаторов. Величина ударной поляризации достигает максимума и при давлении $p \approx 200$ кбар довольно резко уменьшается. В то же время отношение K в диапазоне амплитуд ударных волн

0 ÷ 250 кбар увеличивается от 1 до 2; при давлениях на ударном скачке свыше 250 кбар значение K резко (на порядок) возрастает. Известно также, что при $p = 184$ кбар ударная адиабата в $D-u$ -представлении меняет наклон. Проведенный анализ экспериментальных данных позволил получить качественный результат по ударной поляризации в зависимости от давления на фронте ударной волны, ошибки в определении величины ударной электрической поляризации могут достигать 100 % и более. В опытах, где $\eta \geq 1000$, отношение амплитуды фронтального импульса (не регистрируемого в силу малой длительности) к амплитуде вторичного зафронтального роста при отношении $\varepsilon_1/\varepsilon_2 \approx 1$ достигает значения более 100. Таким образом, U_s определяется по величине, составляющей менее 1 % от нее. Для уточнения величины ударной электрической поляризации следует изменить методику так, чтобы существенно уменьшить значение параметра η . Согласно вышеприведенной формуле уменьшить η можно, уменьшив толщину образца h , при этом увеличится начальная емкость образца C_0 , но сильно уменьшится длительность сигнала поляризации. Уменьшать толщину исследуемого образца нецелесообразно, поскольку зернистость исследуемого материала (например, гранита) должна быть меньше толщины образца.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Уменьшить η можно, увеличив сопротивление R_{in} . В нашем опыте вместо резистора R_{in} включалось два последовательных резистора (резисторный делитель с коэффициентом деления около 3000). Сопротивление большого резистора составляло $8,2 \cdot 10^4$ Ом. Сигнал снимался с резистора малого сопротивления и подавался на вход буферного усилителя (микросхема ВУФ 634 Т). Выход буферного усилителя согласован с кабельной линией связи, транслирующей сигнал на регистратор.

На рис. 6 представлены результаты опыта с использованием буферного усилителя. В этом опыте перед фронтальным (в данном случае из меди) экраном опытной сборки приклеен манганиновый датчик давления, находящийся между двумя лавсановыми пленками. На рис. 6, б показана регистрируемая зависимость давления в ударной волне в зависимости от времени. Колебание давления на временном профиле удар-

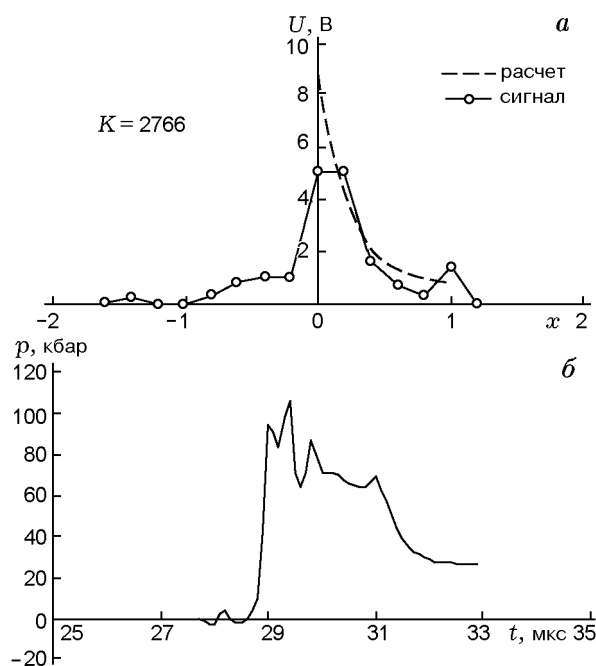


Рис. 6. Результаты опыта, проведенного по методике высокоомной нагрузки с применением буферного усилителя:

a — сравнение сигнала ударной электрической поляризации с расчетом, *б* — запись давления ударной волны в опыте

ной волны вызвано ее отражением при прохождении через медный экран экспериментальной сборки между датчиком давления и исследуемым образцом. Давление на фронте ударной волны составляло 90 кбар. По известной ударной адиабате Гюгонно для оргстекла определялось время распространения фронта ударной волны по образцу (временной масштаб для сигнала ударной электрической поляризации на рис. 6, а приведен к безразмерному виду). На рис. 6, а указано значение коэффициента деления резисторного делителя на входе буферного усилителя.

С помощью видоизмененной методики (метод высокоомной нагрузки) удалось зарегистрировать фронтальный импульс сигнала ударной электрической поляризации, что подтверждает правильность модели трех последовательных конденсаторов.

В работе [5] показано, что сигнал электрической ударной поляризации в оргстекле существует, если амплитуда ударной волны превышает 27 кбар. При меньшей амплитуде давления ударной электрической поляризации не наблюдается. Это обстоятельство было подверг-

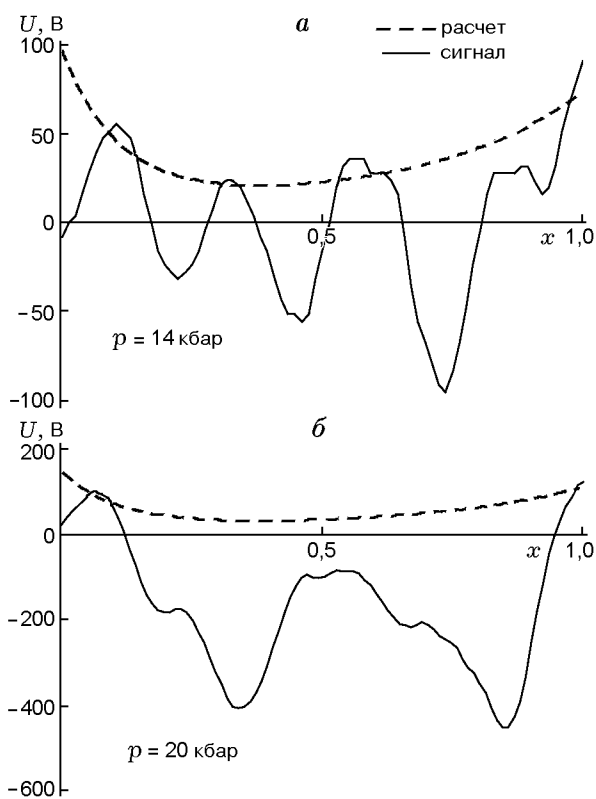


Рис. 7. Сравнение расчетных сигналов с опытными сигналами ударной электрической поляризации гранита

нута проверке с помощью метода высокоомной нагрузки. Проведены десятки опытов с постепенным увеличением амплитудной чувствительности, в результате которых подтверждено отсутствие в оргстекле ударной электрической поляризации при амплитудах ударных волн менее 2,7 ГПа.

ОПЫТЫ С ГРАНИТОМ

Гранит в отличие от оргстекла состоит из зерен различных кристаллов, размер которых порядка 1 мм (описание образцов гранита см. в [3]) при толщине образца 10 мм. Это обстоятельство сказывается на характере сигнала ударной электрической поляризации гранита, который в отличие от гладкого сигнала оргстекла изломан (см. рис. 4). Изломанность сигнала, по-видимому, связана с относительным смещением зерен при деформировании образца, особенно существенны электрические эффекты от трения зерен гранита при небольших ударных давлениях. На рис. 7 приведе-

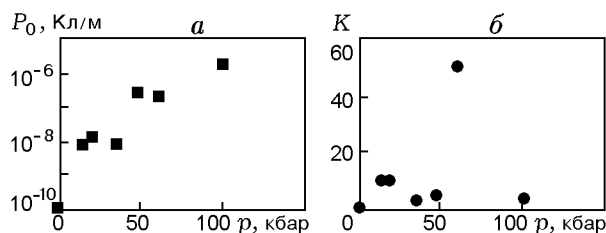


Рис. 8. Зависимости дипольного момента, возникающего на ударном фронте в граните (а), и диэлектрической проницаемости ударно-сжатого гранита, отнесенной к ее начальному значению (б), от амплитуды давления ударного скачка

ны примеры осциллограмм сигналов электрической ударной поляризации гранита при амплитудах давления ударных волн 14 и 20 кбар. В отличие от оргстекла в гранитных образцах электрическая ударная поляризация наблюдается даже в случае очень слабых волн. Опыты с гранитными образцами проводились с использованием Mortar, метаящей алюминиевые цилиндры диаметром 50 мм и длиной 50 мм [6]. Скорости подлета снарядов к мишени порядка 500 м/с, и перед соударением с мишенью образуется воздушная ударная волна с амплитудой давления ≈ 5 бар. Воздушная ударная волна, сталкиваясь с мишенью, генерирует в сборке волну сжатия с амплитудой 20 бар. При прохождении такой волны в образце гранита возникает сигнал электрической ударной поляризации с амплитудой до 20 В [6]. На рис. 8 представлены результаты исследования электрической ударной поляризации в граните: на рис. 8, а — зависимость дипольного момента P_0 от давления ударной волны, на рис. 8, б — зависимость отношения диэлектрической проницаемости ударно-сжатого оргстекла к диэлектрической проницаемости при нормальных условиях ($K = \varepsilon_2/\varepsilon_1$) от давления ударной волны.

ВЫВОДЫ

На основе представленной расчетной модели трех конденсаторов ударная электрическая поляризация оргстекла в диапазоне давлений ударных волн от 27 до 200 кбар растет. Растет и диэлектрическая проницаемость оргстекла за фронтом волны, оставаясь в пределах удвоенной начальной проницаемости. С дальнейшим ростом давления значение ударной поляризации падает, а диэлектрическая проницаемость резко возрастает, указывая на при-

существование свободных зарядов за фронтом. Скорее всего, максимум ударной поляризации связан с известным изломом ударной адиабаты Гюгонио на $D-u$ -диаграмме и свидетельствует о разрушении полимерной структуры молекул оргстекла на фронте ударной волны.

Гранит поляризуется в ударной волне при любых сколь угодно малых давлениях на фронте. Деформация и трение зерен гранита при ударном нагружении также вызывают электрические эффекты, особенно значительные в области небольших ударных давлений, поэтому диэлектрическая проницаемость гранита как функция давления изменяется немонотонно.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зельдович Я. Б.** ЭДС, возникающая при распространении ударной волны по диэлектрику // ЖЭТФ. 1967. Т. 53, вып. 1 (7). С. 237–243.
2. **Allison F. E.** Shock-induced polarization in plastics. I. Theory // J. Appl. Phys. 1965. Т. 36, № 7. С. 2111–2113.
3. **Абдрахимов А., Гончаров А. И., Соловьев С. П.** Экспериментальное исследование электрической поляризации горных пород при ударном нагружении // Физические процессы в геосферах: их проявления и взаимодействие. (Геофизика сильных возмущений). М.: ИДГ РАН, 1999. С. 146.
4. **Гончаров А. И.** Экспериментальное исследование электрической поляризации горных пород при ударном нагружении // Докл. на Российско-американском семинаре «ЭМИ химических взрывов» по проекту МНТЦ № 835-98, НИИИТ, Москва: 16–17 ноября 1999 г.
5. **Hauver G. E.** Shock-Induced Polarization in Plastics. II. Experimental Study of Plexiglas and Polystyrene // J. Appl. Phys. 1965. Т. 36, № 7. С. 2113–2118.
6. **Колганов Е. В. и др.** Особенности электрической поляризации горной породы при воздействии слабыми ударными волнами // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. М.: ИДГ РАН, 2003. С. 211.

Поступила в редакцию 1/VI 2004 г.