

## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ

УДК 537.312.(6+9)

## ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

## ПРИ НАГРУЖЕНИИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ И РАЗГРУЗКЕ

В. И. Таржанов, Ю. Н. Жугин, К. К. Крупников

ВНИИ технической физики, 456770 Снежинск

Электропроводность — фундаментальное свойство вещества, исследуемое в физике твердого тела. Измерение электропроводности в области высоких температур и давлений — один из немногих методов, позволяющих получить информацию об изменениях состояния веществ в этой области [1–5].

Политетрафторэтилен (фторопласт-4) благодаря высоким электроизоляционным свойствам и близости его ударной адиабаты к ударным адиабатам графита и мощных ВВ широко применяется в качестве окружающей среды образцов и датчиков при исследованиях в условиях ударно-волнового нагружения [5–7]. При проведении электрических измерений необходимы данные по его электропроводности в этих условиях для оценки степени шунтирования им встроенных в него тестируемых объектов. Такие данные необходимы также при разработке быстрых сильноточных взрывных включателей [8]. Электропроводность политетрафторэтилена при однократном ударно-волновом нагружении изучалась в [9, 10].

Цель настоящей работы — расширение диапазона исследований по давлению до 100 ГПа, получение данных по электропроводности фторопласта-4 при двукратном ударно-волновом нагружении, а также при нагружении с последующей разгрузкой, установление роли температуры и давления в повышении проводимости и уточнение природы наблюдавшегося в [9, 10] явления «пробоя».

**Методика измерений.** Геометрия экспериментальной сборки показана на рис. 1, а. Образец 1 фторопласта-4 (ФП-4-60, ТУ № М525-54) располагался на измерительном заряде между экраном 2, служившим одним из электродов, и верхним электродом 3 в кольце 4 из фторопласта-4. В некоторых опытах образец и кольцо изготавливались в виде единой детали (рис. 1, в). В качестве материала верхнего электрода использовались алюминий, медь, графит. В части опытов (рис. 1, б) в качестве электрода применялся диск 3 из медной фольги с полосовыми выводами. При этом фольга поджималась к образцу диском 4 из фторопласта, оргстекла, пенопласта.

Плоские ударные волны формировались в образцах с помощью зарядов ВВ 5 с диаметрами 120 и 200 мм при падении на экран детонационной волны или ударе по нему ускоряемой продуктами взрыва металлической пластины толщиной  $2 \div 7$  мм. Несимметрия входа ударного фронта в образец задавалась линзовыми зарядами и была не хуже 0,05 мкс. Начальная температура образцов составляла  $(283 \pm 10)$  К. Состояния во фторопласте определялись расчетно методом  $p - u$ -диаграмм с использованием известных параметров измерительных зарядов и  $D - u$ -соотношений материалов экрана, приведенных для железа в [11], меди и алюминия в [12]. Ударная адиабата исследуемого фторопласта ( $\rho_0 = 2,19 \text{ г/см}^3$ ) строилась по  $D - u$ -соотношению из [12]:

$$D = 1,95 + 1,67u$$

( $D$  и  $u$ , км/с).

Нами использовались две установки с различными пределами измерений, аналогичные описанным в [1, 2, 5, 13]. Измерительные схемы № 1, 2 показаны на рис. 1, а, б. Запуск осциллографа и формирование нуля-отметки о выходе ударной волны в образец осуществля-

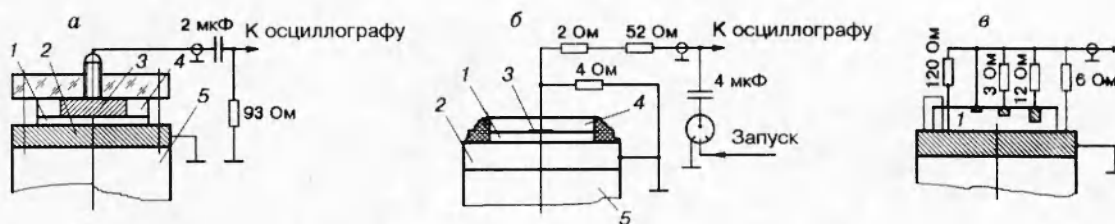


Рис. 1. Схемы эксперимента:

*a* — схема опыта № 1, *б* — схема опыта № 2, *в* — схема опыта № 21; 1 — образец; 2 — экран измерительного заряда; 3 — верхний электрод; 4 — противоразгрузочное кольцо (*a*) или среда разгрузки (*б*); 5 — ВВ измерительного заряда

лись от отдельных контактов и схем. Измеряемые сопротивления образцов  $R$  вычислялись для названных схем по известным формулам [5, 13] с учетом волновых сопротивлений кабелей.

Удельное сопротивление  $\gamma$  материала образца при ударном сжатии вычислялось по учитывающей краевые эффекты универсальной зависимости [13]  $dR/\gamma = f(l/d)$  ( $d$  — диаметр верхнего электрода,  $l$  — толщина сжатого образца в момент выхода ударной волны на верхний электрод). Справедливость этой зависимости проверена нами при электролитическом моделировании геометрии сборок с использованием водопроводной воды в качестве электролита.

**Результаты измерений.** Полученные результаты приведены в табл. 1 и на рис. 2. Видно, что при однократном сжатии фторопласта-4 ударной волной с амплитудой 27,5 ГПа реализуется снижение его удельного сопротивления более чем на 11 порядков от начального значения  $\sim 10^{17}$  Ом·см [14]. В диапазоне 27,5 ÷ 45 ГПа наблюдается изменение  $\gamma$  в пределах одного порядка. При росте амплитуды ударной волны в диапазоне 45 ÷ 80 ГПа происходит более сильное падение  $\gamma$  (от  $\sim 10^5$  до  $\sim 5$  Ом·см).

При двукратном ударном сжатии фторопласта в диапазоне давлений (за второй ударной волной) 58 ÷ 94 ГПа реализуется слабое понижение  $\gamma$  с ростом  $p_2$  (всего лишь на порядок).

Характерным для опытов с давлением в ударном фронте, большим 33 ГПа, является то, что сопротивление образца, претерпев скачок при выходе волны на верхний электрод, дополнительно резко уменьшается через 0,5 ÷ 1 мкс. Такое уменьшение сопротивления соответствует снижению удельного сопротивления образца до значений 1,0 ÷ 0,1 Ом·см. В [9] это явление названо «пробоем» фторопласта.

Для уточнения природы данного явления проведен опыт № 21 (рис. 1, в), в котором три графитовых электрода с диаметром 6 мм были врезаны в образец из фторопласта на одном расстоянии от оси заряда и на различных расстояниях от экрана заряда. В этом опыте ( $p_1 = 53$  ГПа) зафиксировано последовательное резкое снижение сопротивления образца под электродами, связанное с возмущением, которое движется вслед за фронтом ударной волны в волне разрежения, распространяющейся от тыльной поверхности пластины-ударника. Компьютерное моделирование нагружения образца в условиях опыта № 21 показало, что фронт зоны высокой проводимости распространяется вдоль характеристики волны разрежения, давление на которой составляет 30 ГПа. Нанесение на  $x - t$  диаграмму моментов пробоя из других опытов (рис. 3) подтверждает сказанное. Опыты, выполненные на измерительных зарядах с толщиной пластин-ударников, различающихся в 2 раза, показали однозначную связь времени «пробоя» с реализующимся интервалом времени между прибытием на верхний электрод ударного фронта и волны разрежения.

Для получения дополнительного подтверждения связи «пробоя» фторопласта с его разгрузкой были поставлены опыты № 10–12. В них реализовывалась разгрузка ударно-

Таблица 1

№ опыта	Материал	Размеры образца под электродом $l_0 \times d$ , мм	$p_1$ , ГПа	$\gamma_1$ , Ом·см	$p_2$ , ГПа	$\gamma_2$ , Ом·см
1	Cu/Cu (6,0)	$1,59 \times 31,1$	27,5	$3,0 \cdot 10^5$	57,7	$1,2 \cdot 10^5$
2	Cu/графит(6,0)	$1,73 \times 30,1$	27,5	$3,4 \cdot 10^5$	—	—
3	Cu/Cu (0,05)	$2,00 \times 30,0$	33,1	$1,7 \cdot 10^5$	—	—
4	Al/графит (5,0)	$1,97 \times 30,0$	37,2	$1,8 \cdot 10^5$	—	—
5	Al/Al (0,12)	$1,98 \times 35,0$	37,2	$1,1 \cdot 10^5$	—	—
6	Al/Al (0,13)	$2,00 \times 35,0$	40,3	$1,9 \cdot 10^5$	—	—
7	Al/Al (0,1)	$2,00 \times 35,0$	44,5	$1,35 \cdot 10^5$	—	—
8	Al/Al (6,0)	$2,00 \times 30,0$	44,6	$1,2 \cdot 10^5$	58,7	$1,1 \cdot 10^5$
9	Al/Cu (6,0)	$2,00 \times 30,0$	44,6	$7,0 \cdot 10^4$	93,2	$1,3 \cdot 10^4$
10	Al/Cu (0,03)	$0,98 \times 20,0$	51,0	$1,6 \cdot 10^3$	36,0	$1,9 \cdot 10^1$
11	Al/Cu (0,03)	$0,96 \times 20,0$	51,0	$2,8 \cdot 10^3$	36,0	$1,2 \cdot 10^2$
12	Al/Cu (0,05)	$0,98 \times 20,0$	51,0	$3,7 \cdot 10^3$	12,0	$3,8 \cdot 10^0$
13	Al/графит (6,0)	$1,60 \times 26,0$	53,8	$2,7 \cdot 10^3$	—	—
14	То же	$1,61 \times 28,0$	53,0	$1,9 \cdot 10^3$	—	—
15	»	$1,60 \times 34,5$	53,0	$6,0 \cdot 10^3$	—	—
16	Al/Al (0,12)	$2,17 \times 35,0$	53,0	$1,0 \cdot 10^3$	—	—
17	Fe/графит (6,0)	$1,50 \times 10,0$	75,2	$1,4 \cdot 10^1$	—	—
18	То же	$1,50 \times 10,0$	75,2	$1,5 \cdot 10^1$	—	—
19	»	$1,64 \times 3,0$	81,0	$4,8 \cdot 10^0$	—	—
20	»	$1,50 \times 10,0$	81,0	$3,9 \cdot 10^0$	—	—
21	Al/графит (3 электрода)	$1,88 \times 6$ $4,08 \times 6$ $4,80 \times 6$	53,0 — —	— — —	— — —	— — —

Примечания. Во второй графе перед чертой указан материал экрана, за чертой — материал электрода и его толщина в мм;  $p_1$  и  $p_2$  — давление за 1-м ударным фронтом и фронтом отраженной ударной волны (волны разгрузки);  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — удельное сопротивление при 1-м и 2-м ударном нагружении.

нагруженных образцов в оргстекло и пенополистирол с плотностью  $0,35 \text{ г/см}^3$  со стороны верхнего фольгового электрода. Из рис. 2 и табл. 1 видно, что получено снижение удельного сопротивления образцов до значений 120; 19 и 3,8 Ом·см при разгрузке до давлений 36 и 12 ГПа.

**Обсуждение результатов.** На рис. 2 приведены вместе с нашими результатами экспериментальные точки и аппроксимирующая их прямая из [10]. Видно, что в диапазоне давлений  $27,5 \div 45$  ГПа соответствие данных удовлетворительное в пределах разброса экспериментальных точек. Однако при больших давлениях ход зависимости  $\lg \gamma = f(p)$  у нас более крутой.

Так как электропроводность твердых тел определяется в основном двумя независимыми факторами: температурой и давлением (сжатием), то представляет интерес установить их роль в изменении проводимости.

Для получения сведений по тепловым составляющим уравнения состояния фторопласта-4 нами выполнены четыре опыта по электроконтактной регистрации на базе 3 мм скорости ударной волны в пористом материале (размер частиц  $0,05 \times 0,15 \times 0,15$  мм, средняя плотность образцов  $1,72 \text{ г/см}^3$ ). Методом отражения [15] получены две точки ударной адиабаты пористого фторопласта (табл. 2), позволяющие с использованием методики, описанной в [15], найти значение коэффициента Грюнайзена  $\Gamma = 1,43$  при удельном объеме  $\approx 0,28 \text{ см}^3/\text{г}$ .

Затем в предположении  $\Gamma = \text{const}$  было получено уравнение состояния Ми — Грюнайзена с холодными и тепловыми составляющими давления  $p_x$ ,  $p_T$  и энергии  $E_x$ ,  $E_T$  [15]. Оно позволило рассчитать реализованные в опытах (см. табл. 1) параметры однократного сжатия фторопласта (рис. 4), в том числе и его температуру (в предположении постоянства теплоемкости  $c = 1050 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  [14]). С использованием этого уравнения состояния

Таблица 2

№ опыта	$\rho_{00}$ , г/см <sup>3</sup>	$D$ , км/с	$D$ , км/с	$u$ , км/с	$\bar{p}$ , ГПа	$V$ , г/см <sup>3</sup>
22	1,670	6,98				
23	1,770	7,15	7,07	3,575	43,5	0,2874
24	1,670	8,49				
25	1,770	8,46	8,47	4,405	64,2	0,2790

были также получены адиабаты второго сжатия, реализованного в опытах, и значения температуры при двукратном сжатии (рис. 4).

Сравнение экспериментальных значений удельного сопротивления фторопласта при однократном и двукратном нагружении проводилось в соответствии с  $T - \sigma$ -диаграммой (рис. 4) при одинаковых сжатиях ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 1,878$ ) и одинаковых температурах  $T_1 = T_2 = 3440$  К (табл. 3). Видно, что при фиксации температуры удельное сопротивление мало изменяется с увеличением  $\sigma$ , а при постоянстве  $\sigma$  оно сильно падает при росте температуры. Отсюда следует, что влияние температуры на  $\gamma$  при ударно-волновом сжатии подавляющее.

Интересен график зависимости  $\ln \gamma = f(1/T)$  (рис. 5). Отметим, что экспериментальные точки для двукратного сжатия фторопласта-4 удовлетворительно ложатся в координатах  $\ln \gamma, 1/T$  на зависимость, полученную для однократного сжатия. Это дополнитель-

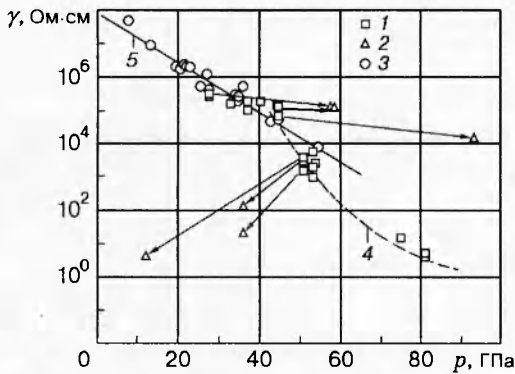


Рис. 2

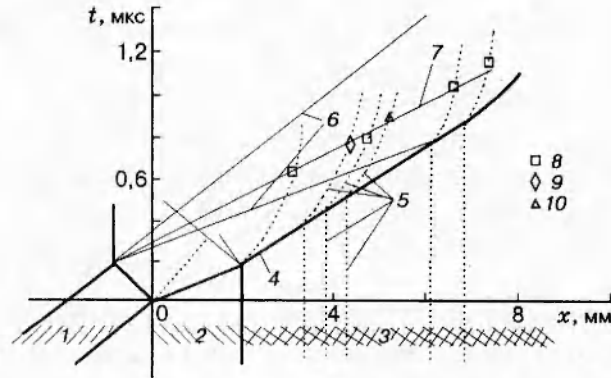


Рис. 3

Рис. 2. Удельное сопротивление фторопласта-4 в зависимости от давления:

1 и 2 — эксперименты данной работы, однократное и двукратное сжатие (разгрузка) соответственно; 3 — эксперимент [10]; 4 — аппроксимация эксперимента при  $p \geq 45$  ГПа и линейности  $\ln \gamma = f(1/T)$ ; 5 — аппроксимация данных [10]

Рис. 3. Положение фронта высокой электропроводности фторопласта на  $x - t$ -диаграмме:

1 — ударник (алюминий); 2 — экран (алюминий); 3 — фторопласт-4; 4 — фронт ударной волны во фторопласте; 5 — положение нижних границ электродов; 6 — характеристики волны разрежения; 7 — характеристика, вдоль которой переносится фронт высокой проводимости; 8 — опыт № 21; 9 — опыт № 13; 10 — опыт № 16

Таблица 3

Сжатие	$\sigma$	$T$ , К	$p$ , ГПа	$\gamma$ , Ом·см	Сжатие	$\sigma$	$T$ , К	$p$ , ГПа	$\gamma$ , Ом·см
Однократное	1,878	6440	81,0	4,4	Двукратное	1,878	3200	59,5	$1 \cdot 10^5$
Однократное	1,776	3440	48,6	$2,2 \cdot 10^4$	Двукратное	2,040	3440	93,2	$1,3 \cdot 10^4$

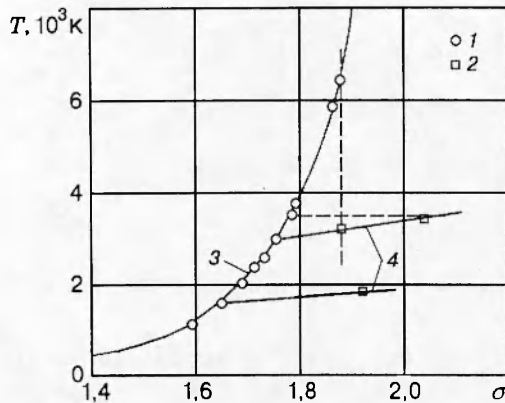


Рис. 4

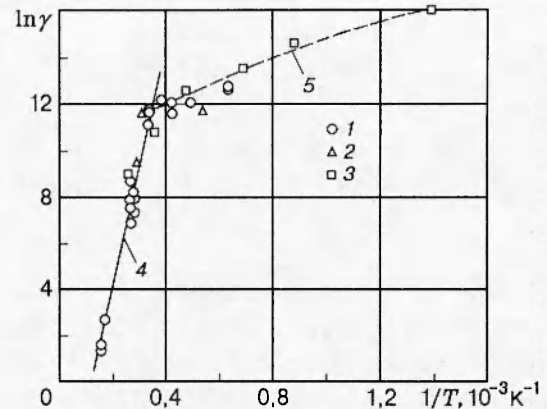


Рис. 5

Рис. 4.  $T - \sigma$ -диаграмма состояний фторопласта при однократном и двукратном сжатии:

1 и 2 — расчетные точки однократного и двукратного сжатия; 3 и 4 — кривые состояний при однократном и двукратном сжатии; штриховые линии —  $T = \text{const}$  и  $\sigma = \text{const}$  при сравнении однократного и двукратного сжатия

Рис. 5. Логарифм удельного сопротивления фторопласта-4 в зависимости от обратной температуры:

1 и 2 — эксперимент данной работы, однократное и двукратное сжатие соответственно; 3 — эксперимент [10]; 4 и 5 — аппроксимации экспериментальных данных при  $T < 3000$  К и  $T > 3000$  К

но подтверждает решающее влияние температуры на изменение удельного сопротивления материала при ударно-волновом нагружении. Из рис. 5 видно, что при  $T > 3000$  К зависимость линейна и соответствует

$$\gamma = \gamma_0 \exp(E_a/kT),$$

где  $E_a = 4,6$  эВ — энергия активации проводимости;  $\gamma_0 = 1,2 \cdot 10^{-3}$  Ом·см — удельное сопротивление, отвечающее так называемой [16] минимальной проводимости. Полученное значение  $\gamma_0$  характерно для многих аморфных и жидких полупроводников [16]. При  $T < 3000$  К зависимость  $\ln \gamma = f(1/T)$  существенно более слабая и соответствует энергии активации проводимости  $0,1 \div 0,3$  эВ. Такой характер зависимости  $\ln \gamma = f(1/T)$  обычно связывают в физике твердого тела [16] со сменой типа проводимости в точке излома.

Гигантский (на 11 порядков) рост проводимости фторопласта при нагружении его ударными волнами с давлением 27,5 ГПа может быть объяснен, как и в случае ионных кристаллов [17], переводом образцов в полупроводниковое состояние с донорными и акцепторными уровнями в запрещенной зоне, образованными дефектами, генерируемыми ударной волной. Термическая ионизация этих уровней обеспечивает электронную проводимость, растущую с температурой. Низкое значение энергии активации проводимости в области нагружения 27,5 ÷ 45 ГПа ( $T < 3000$  К) свидетельствует о насыщении зависимости скорости роста концентрации дефектов с ростом амплитуды ударной волны.

Резкая смена наклона зависимости  $\ln \gamma = f(1/T)$  при  $T > 3000$  К и достаточно большая энергия активации (4,6 эВ) свидетельствуют о переходе к собственной проводимости с термическим забросом носителей тока через запрещенную зону [16].

В связи со сказанным кажется логичной гипотеза о деструкции (деполимеризации) фторопласта при давлениях, больших 45 ГПа. Деструкция в условиях ударно-волнового сжатия должна сопровождаться появлением большого числа нескомпенсированных анио-

нов углерода и резким ростом числа носителей тока.

При справедливости данной гипотезы наблюдаемое явление «пробоя» фторопласта может быть связано с разгрузкой деполимеризованного материала. Объясняется реализация «пробоя» только с некоторого порога по давлению — границы области деструкции. Более низкие значения порогового давления нагружения (33 ГПа — данная работа, 37,5 ГПа — [9], 35 ГПа — [10]), с которого наблюдается «пробой» при разгрузке, могут означать существование диапазона  $33 \div 45$  ГПа метастабильного полимерного состояния фторопласта, разрушающегося через деполимеризацию только при разгрузке. Значительный рост проводимости при «пробое» должен быть связан тогда с резким увеличением числа носителей тока или ростом их подвижности при разгрузке деполимеризованного материала.

Следует отметить справедливость использования в [9] слова пробой в кавычках, так как наблюдаемое явление не электрический или тепловой пробой диэлектрика, реализующийся в сильном электрическом поле через развитие электронной лавины [18].

Аппроксимация в координатах  $\ln \gamma, 1/T$  наших экспериментальных точек прямой линией приводит к необходимости соответствующей аппроксимации этих точек в координатах  $\ln \gamma, p$  нелинейной зависимостью с выпуклостью вниз в диапазоне  $45 \div 80$  ГПа и к появлению точки излома при  $p \cong 45$  ГПа (см. рис. 2).

**Выводы.** 1. При однократном ударно-волновом нагружении фторопласта-4 с амплитудой волны 27,5 ГПа его удельное сопротивление снижается от исходного на 11 порядков и находится на уровне  $3 \cdot 10^5$  Ом·см. При увеличении давления до 45 ГПа наблюдается дополнительное снижение удельного сопротивления в пределах одного порядка. При росте давления в диапазоне  $45 \div 81$  ГПа существенно снижается удельное сопротивление фторопласта-4 от  $\sim 10^5$  до 5 Ом·см. При двукратном ударно-волновом нагружении фторопласта-4 (в первой волне до  $27,5 \div 45$  ГПа, во второй до  $58 \div 94$  ГПа) происходит относительно слабое снижение его удельного сопротивления на порядок (от  $\sim 10^5$  до  $\sim 10^4$  Ом·см) с ростом давления.

2. Снижение удельного сопротивления фторопласта-4 с ростом давления как при однократном, так и при двукратном ударно-волновом сжатии связано исключительно с ростом температуры (а не с ростом давления).

Зависимость логарифма удельного сопротивления от обратной температуры линейна при  $T > 3000$  К и соответствует энергии активации 4,6 эВ. Энергия активации проводимости при  $T < 3000$  К составляет  $0,1 \div 0,3$  эВ. Высказана гипотеза о связи излома рассматриваемой зависимости вблизи 45 ГПа ( $T \simeq 3000$  К) с деструкцией (деполимеризацией) материала.

3. Наблюдавшееся ранее и в данной работе явление резкого увеличения проводимости фторопласта-4 через некоторое время после его нагружения ударной волной (названное в [9] «пробоем») связано с разгрузкой образца и реализуется только при превышении порога по давлению нагружения 33 ГПа. Оно имеет место в волнах разрежения, распространяющихся как с тыльной, так и с передней поверхности образца. При  $p_1 = 53$  ГПа фронт зоны высокой проводимости распространяется в волне разрежения вдоль характеристики, соответствующей давлению разгрузки 30 ГПа. Удельное сопротивление при этом достигает  $\sim 4$  Ом·см. Предполагается связь этого явления с особенностями разгрузки фторопласта-4 из области его деструкции (деполимеризации) или области метастабильности полимерного состояния.

Авторы благодарят А. Т. Сапожникова и А. В. Першину за компьютерное моделирование условий опыта № 21.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бриш А. А., Тарасов М. С., Цукерман В. А. Электропроводность диэлектриков

- в сильных ударных волнах // ЖЭТФ. 1960. Т. 38, вып. 1. С. 22–25.
2. Альтшулер Л. В., Кулешова Л. В., Павловский М. Н. Динамическая сжимаемость, уравнение состояния и электропроводность хлористого натрия при высоких давлениях // ЖЭТФ. 1960. Т. 39, вып. 7. С. 16–23.
  3. Гатилов Л. А., Глухобедов В. Д., Григорьев Ф. В. и др. Электропроводность ударно-сжатого конденсированного аргона при давлениях от 20 до 70 ГПа // ПМТФ. 1985. № 1. С. 99–102.
  4. Набатов С. С., Постнов В. И., Дремин А. Н., Якушев В. В. Измерение электропроводности конденсированных веществ при многократном ударно-волновом сжатии до одного мегабара // Детонация. Черногловка, 1980. С. 117–119.
  5. Жугин Ю. Н., Крупников К. К., Овечкин Н. А. Исследование особенностей превращения ударно-сжатого графита в алмаз по изменению электросопротивления // Хим. физика. 1987. № 10. С. 1447–1450.
  6. Грин Л., Нидик Е., Тарвер К. Иницирование химического разложения РВХ-9404 слабыми ударными волнами // Детонация и взрывчатые вещества. М.: Мир, 1981. С. 107–122.
  7. Канель Г. И. Применение манганиновых датчиков для измерения давления ударного сжатия конденсированных сред. Черногловка, 1973 (Препр./АН СССР, ОИХФ).
  8. Graham R. C. Shock-induced electrical switching in polymeric films // Megagauss Physics and Technology. P. J. Turchi (Ed.). N.Y.: Plenum Press, 1980. P. 147–150.
  9. Кулешова Л. В. Электропроводность нитрида бора, хлористого калия и фторопласта-4 за фронтом ударных волн // Физика твердого тела. 1969. Т. 11, вып. 5. С. 1085–1091.
  10. Champion A. R. Effect of shock compression on electrical resistivity of three polymers // J. Appl. Phys. 1972. V. 43, N 5. P. 2216–2220.
  11. Альтшулер Л. В., Баканова А. А., Дудолодов И. П. и др. Ударные адиабаты металлов. Новые данные, статистический анализ и общие закономерности // ПМТФ. 1981. № 2. С. 3–34.
  12. Жугин Ю. Н., Крупников К. К., Овечкин Н. А. и др. О некоторых особенностях динамической сжимаемости кварца // Изв. РАН. Физика Земли. 1994. № 10. С. 16–22.
  13. Mitchell A. C., Keeler R. N. Technique for accurate measurement of the electrical conductivity of shocked fluids // Rev. Sci. Instr. 1968. V. 39, N 4. P. 513–522.
  14. Чегодаев Д. Д., Наумова Э. К., Дунаевская И. С. Фторопласты. М.: Госхимиздат, 1960.
  15. Зельдович Я. П., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
  16. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1982. Т. 1.
  17. Кормер С. Б. Оптические исследования свойств ударно-сжатых конденсированных диэлектриков // Успехи физ. наук. 1968. Т. 94, вып. 4. С. 641–687.
  18. Воробьев А. А., Воробьев Г. А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. М.: Высш. шк., 1966.

*Поступила в редакцию 5/IV 1996 г.*