

ПВДФ-ДАТЧИК ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ: ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В. А. Борисенко, В. Г. Симаков, В. А. Брагунец, В. Г. Куропаткин,
В. А. Кручинин, В. Н. Ромаев

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров, root@gdd.vniief.ru

Представлена физическая модель датчика динамического давления на основе сегнетоэлектрического полимера — поливинилиденфторида. В диапазоне давлений $1 \div 36$ ГПа модель согласуется с результатами экспериментов.

Ключевые слова: поливинилиденфторид (ПВДФ), ударная волна, датчик давления, физическая модель.

Уже около 20 лет датчики на основе поливинилиденфторида (ПВДФ) широко используются для измерения временных и амплитудных характеристик импульсных давлений в материалах и конструкциях при нагружении их ударной волной. Принцип действия датчика — пьезоэлектрический эффект. ПВДФ-датчики не требуют источников питания, имеют широкий диапазон измеряемых давлений и высокое временное разрешение (≤ 10 нс), легко встраиваются в различного рода экспериментальные устройства вследствие малой толщины (≈ 50 мкм) и гибкости [1–4].

Схематическое изображение ПВДФ-датчика, разработанного авторами [4], приведено на рис. 1. Датчики такого типа часто используются в экспериментах. Чувствительным элементом датчика служит зона пересечения двух металлических электродов, нанесенных с противоположной стороны пленки из ПВДФ толщиной ≈ 25 мкм. Размеры чувствительной зоны обычно составляют 2×2 мм. Электроды наносятся путем вакуумного напыления: сначала слой платины толщиной $\approx 0,05$ мкм, затем слой золота или алюминия толщиной $\approx 0,25$ мкм. Характерная длина токовыводов (электродов) ≈ 20 мм. Остаточная поляризация пьезопленки в зоне чувствительного элемента $(9,2 \pm 0,2)$ мкКл/см². Снаружи пьезопленка закрывается изолирующей тефлоновой пленкой толщиной 12,7 мкм. Таким образом, датчик [4] представляет собой пакет «тефлон — ПВДФ — тефлон» суммарной толщиной ≈ 50 мкм.

Датчик, изготовленный по технологии РФЯЦ-ВНИИЭФ из отечественной пленки ПВДФ марки Ф-2МЭ, геометрически подобен

датчику, изображенному на рис. 1. Толщина пьезопленки 30 мкм. Электроды из меди нанесены методом напыления непосредственно на пленку, их толщина 1 мкм. Размеры рабочей зоны 2×2 или 3×3 мм. Защитное покрытие из полимера формируется на всей поверхности датчика методом осаждения из газовой фазы. Толщина покрытия 6 мкм. Таким образом, общая толщина датчика 44 мкм. Остаточная поляризация материала датчика выбрана равной $P_r^0 = 6,5$ мкКл/см².

Для использования датчика в экспериментах необходима его калибровка, которая заключается в следующем. В требуемом диапазоне давлений с помощью нагружающего устройства с хорошо известными характеристиками определяют зависимость плотности заряда Q , генерируемого датчиком, от давления p . В работах [4–7], например, для этой цели использовали легкогазовую пушку. Ударник и мишень, как правило, изготавливают из одного материала: z -среза кварца, z -среза сапфира и ряда

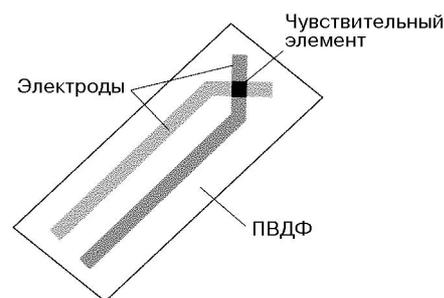


Рис. 1. Схематическое изображение ПВДФ-датчика

других веществ с хорошо известными ударными адиабатами.

Полученную таким образом экспериментальную зависимость $Q(p)$ или $p(Q)$ (последняя более удобна при обработке эксперимента) аппроксимируют некоторой функцией, которую используют далее как калибровочную кривую. Аппроксимирующие зависимости представляют по-разному: в виде степенной функции $Q = \text{const} \times p^a$ ($a < 1$) [8, 9] либо в виде полиномов третьей и пятой степеней [3, 10]. В работе [10] диапазон давлений разбивался на участки и каждый участок описывался своим полиномом.

Такой подход, безусловно, правомерен. Однако то, что каждый автор предлагает свою зависимость и эта зависимость может включать большое число подгоночных коэффициентов, в некоторой степени затрудняет анализ и использование результатов, полученных в разных работах. К тому же проведение калибровки в широком диапазоне давлений — задача трудоемкая и дорогостоящая. Поэтому удобнее была бы единая, теоретически обоснованная аналитическая зависимость, параметры которой имеют понятный физический смысл.

Решение такой задачи было предпринято авторами работ [11–13]. В [11] получена линейная зависимость плотности заряда от деформации η :

$$Q = -P_r^0 \eta, \quad (1)$$

и показано, что результаты эксперимента при $p \leq 6,7$ ГПа действительно можно описать такой зависимостью, но коэффициент пропорциональности при этом не равен P_r^0 , т. е. необходимо вводить подгоночный коэффициент. В работе [12] сделана попытка учесть нелинейные эффекты. Полученная в [12] зависимость $Q(\eta)$ хорошо описывает результаты экспериментов при $p \leq 30$ ГПа, но также содержит подгоночные коэффициенты. В [13] в качестве факторов, приводящих к изменению поляризации ПВДФ при динамическом нагружении, названы пьезоэффект, индуцированная ударной волной поляризация и высокоскоростная деполяризация материала. В основу развитой в этой работе феноменологической модели положено следующее соотношение между поляризацией P_r и сжатием σ :

$$P_r(t) = f(t)\sigma(t)P_r^0, \quad (2)$$

где $f(t)$ — некоторая функция, учитывающая вклад ударной поляризации и высокоскоростной деполяризации; t — время. В [13] показано, что расчетные зависимости $Q(p)$ хорошо описывают эксперимент при $p \leq 16$ ГПа, однако в этой работе не были получены аналитические выражения для характеристик электрического отклика датчика и калибровочной функции.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что задача теоретического описания работы ПВДФ-датчика решена не полностью.

В настоящей работе представлена физическая модель ПВДФ-датчика, в рамках которой получены аналитические выражения для тока во внешней цепи датчика, заряда, генерируемого датчиком, и калибровочной функции, не содержащие подгоночных коэффициентов.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДАТЧИКА

Рассмотрим датчик давления, выполненный в виде плоского конденсатора, заполненного поляризованным сегнетоэлектриком. Площадь обкладок конденсатора S , расстояние между ними L , емкость C_0 . Вектор поляризации сегнетоэлектрика \vec{P}_r^0 перпендикулярен обкладкам. Обкладки соединены через активное сопротивление R .

При механическом нагружении конденсатора (механический удар, ударная волна) поляризация изменяется, что приводит к перетеканию зарядов в его внешней цепи. Определим электрическую реакцию датчика при следующих условиях:

- нагружение производится вдоль одного направления (ось z), совпадающего с направлением вектора спонтанной (остаточной) поляризации материала \vec{P}_r^0 ;
- электропроводность материала отсутствует;
- диэлектрическая постоянная сегнетоэлектрика не зависит от давления и температуры;
- толщиной электродов можно пренебречь.

Используя связь между электрической индукцией, напряженностью электрического поля и поляризацией материала [14], дифференциальное уравнение, описывающее при указанных условиях электрический отклик датчика, запишем в следующем виде:

$$\frac{dV(t)}{dt} + \frac{V(t)}{RC} = -\frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \int_0^{L(1-\frac{u}{D})} \frac{\partial P_r(z, t)}{\partial t} dz, \quad (3)$$

где $V(t)$ — падение напряжения на нагрузке, C — емкость сжатого конденсатора, ε — диэлектрическая проницаемость материала, ε_0 — диэлектрическая постоянная, u и D — массовая и волновая скорости в ударно-нагруженном ПВДФ, $P_r(z, t)$ — поляризация.

Вид решения уравнения (3) полностью определяется его правой частью и, следовательно, физическими эффектами, приводящими к изменению поляризации сегнетоэлектрического материала при ударном сжатии. Для монокристаллических и керамических сегнетоэлектриков к таким эффектам относятся (по мере возрастания давления) пьезоэлектрический эффект и частичная либо полная деполяризация материала за счет разрушения его первоначальной структуры [15].

Поливинилиденфторид является композитным материалом, в котором кристаллическая фаза расположена в аморфном полимере с другими механическими и диэлектрическими характеристиками [16]. Этим ПВДФ значительно отличается от керамики и монокристаллов. В работе [16] предложена простая модель ПВДФ, качественно описывающая происхождение пьезо- и пирозлектричества в этом материале.

Суть модели состоит в следующем. В неполяризованном материале кристаллы распределены хаотично и их суммарный дипольный момент равен нулю. После приложения электрического поля оси кристаллов выстраиваются преимущественно вдоль направления поля и в материале появляется остаточная поляризация

$$\vec{P}_r^0 = \frac{N\vec{\mu}}{v} \langle \cos \theta \rangle,$$

где N — число диполей с дипольным моментом μ в объеме v ; $\langle \cos \theta \rangle$ — среднее значение косинуса угла между векторами P_r^0 и $\vec{\mu}$.

При механическом (пьезоэффект) или тепловом (пирозэффект) воздействии на материал изменение его поляризации происходит только за счет изменения объема его аморфной фазы.

Используем эту модель материала для описания работы датчика давления. В ее рамках выражение для приращения поляризации

при сжатии (растяжении) вдоль оси z имеет вид

$$\Delta P_r(z, t) = N\mu \langle \cos \theta \rangle \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{v_0} \right) = P_r^0 (\sigma(z, t) - 1), \quad (4)$$

где v_0, v — начальный и конечный объемы соответственно; $\sigma = v_0/v$.

Согласно (4) приращение поляризации является линейной функцией сжатия материала σ , причем при увеличении σ поляризация возрастает. Рост поляризации при сжатии подтвержден экспериментально: полярность импульса тока во внешней цепи датчика соответствует именно возрастанию поляризации [2].

Если время пробега ударной волны или волны сжатия по толщине датчика L/D меньше длительности фронта импульса давления τ_f , то можно считать, что $\sigma(z, t) = \sigma(t)$. Такой датчик будем называть тонким. Отметим, что для типичных ПВДФ-датчиков давления $L/D = 10 \div 15$ нс (толщина пленки ПВДФ $20 \div 30$ мкм). В этом случае при начальном условии $V(0) = 0$ решение уравнения (3) имеет вид

$$V(t) = -\frac{P_r^0 L \left(1 - \frac{u}{D}\right)}{\varepsilon\varepsilon_0} \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_e}\right) \int_0^t \exp\left(\frac{t'}{\tau_e}\right) \frac{d\sigma}{dt'} dt', \quad (5)$$

где $\tau_e = RC$. Из (5) следуют важные для практики выражения:

$$V(t) = -P_r^0 SR \frac{d\sigma}{dt}, \quad \tau_e \ll \tau_f, \quad (6)$$

$$V(t) = -\frac{P_r^0 S}{C} (\sigma(t) - 1), \quad \tau_e \gg \tau_f. \quad (7)$$

Таким образом, падение напряжения на нагрузочном резисторе датчика пропорционально либо производной сжатия по времени ($\tau_e \ll \tau_f$), либо сжатию ($\tau_e \gg \tau_f$).

Для того чтобы связать электрический отклик датчика с давлением p , воспользуемся выражениями [17]:

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2 \sigma (\sigma - 1)}{[s + \sigma(1 - s)]^2}, \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{(2s^2 - 2s)p - \rho_0 c_0^2 - \sqrt{\rho_0 c_0^2 (4sp + \rho_0 c_0^2)}}{2[(1-s)^2 p - \rho_0 c_0^2]^2}, \quad (9)$$

где ρ_0 — плотность ПВДФ при нормальных условиях, c_0 и s — коэффициенты соотношения скоростей D , u для ПВДФ.

Формулы (8), (9) получены при условии, что соотношение скоростей D , u линейно. Согласно [13] для ПВДФ это условие выполняется, по крайней мере, до давлений $p \leq 30$ ГПа.

В сложившейся практике измерения давления ПВДФ-датчиком чаще используется режим измерительной цепи, близкий к короткозамкнутому (режим (6)) [1–4, 8, 10]. Здесь принята следующая схема получения конечного результата — зависимости $p(t)$. По измеренному напряжению $V(t)$ определяют плотность тока с датчика: $I(t) = V(t)/RS$. Интегрируя $I(t)$, находят плотность заряда $Q(t)$, генерируемого датчиком. Далее, используя калибровочную кривую $p(Q)$, определяют давление.

Реже используется режим разомкнутой измерительной цепи (режим (7)) [13]. Для его реализации в цепь датчика включают интегрирующий конденсатор и сразу получают зависимость $Q(t)$. В остальной схеме получения зависимостей $p(t)$ одинаковы.

Используя (6), (7) и (9), определим величины $I(t)$ и $Q(t)$:

$$I(t) = -\frac{P_r^0 \rho_0 c_0^2}{2} \left[\left(2(s-1)^2 s p(t) + (1-s^2) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sqrt{(4sp(t) + \rho_0 c_0^2) \rho_0 c_0^2} + (s^2 - 1) \rho_0 c_0^2 \right) \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{[(s-1)^2 p(t) - \rho_0 c_0^2]^2} \times \right. \\ \left. \times \frac{1}{\sqrt{(4sp(t) + \rho_0 c_0^2) \rho_0 c_0^2}} \right] \frac{\partial p(t)}{\partial t}, \quad (10)$$

$$Q(t) = -\frac{P_r^0}{2} \left(2(s-1)p(t) + \rho_0 c_0^2 - \right. \\ \left. - \sqrt{(4sp(t) + \rho_0 c_0^2) \rho_0 c_0^2} \right) \times \\ \times \frac{1}{(s-1)^2 p(t) - \rho_0 c_0^2}. \quad (11)$$

Аналитическое выражение для калибровочной кривой $p(Q)$ легко получить, используя

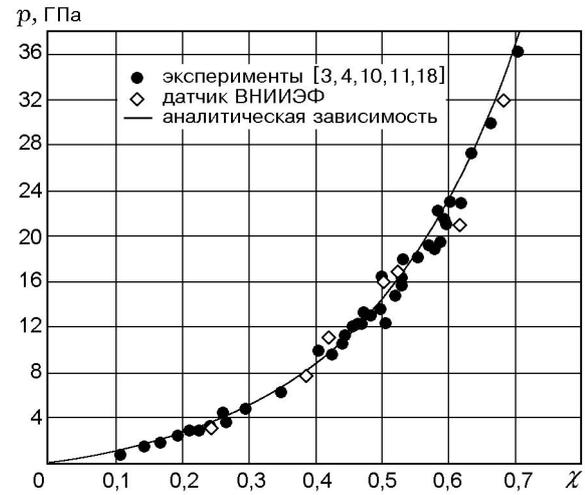


Рис. 2. Зависимость давления от параметра χ

формулы (4), (8) и принимая во внимание, что $\Delta P_r \equiv Q$:

$$p(Q) = \frac{\rho_0 c_0^2 (1 + Q/P_r^0) Q / P_r^0}{[1 - (s-1)Q/P_r^0]^2}. \quad (12)$$

Формулы (10)–(12) являются основными для описания работы ПВДФ-датчика давления.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для сравнения теоретических зависимостей с результатами эксперимента отобрана серия опытов [3, 4, 10, 11, 18] с датчиком, разработанным авторами [4], а также результаты, полученные во взрывных опытах, проведенных в РФЯЦ-ВНИИЭФ. В качестве характеристики отклика ПВДФ-датчика принят параметр $\chi = Q/P_r^0$, что позволяет сравнивать показания датчиков с разными значениями остаточной поляризации. График функции $p(\chi)$ и экспериментальные точки представлены на рис. 2. Зависимости построены при следующих значениях параметров: $P_r^0 = (9,2 \pm 0,2)$ мкКл/см² (датчик [4]), $P_r^0 = 6,5$ мкКл/см² (датчик РФЯЦ-ВНИИЭФ), $\rho_0 = 1,8$ г/см³, $c_0 = 2,16$ км/с, $s = 1,68$ [13].

Из рис. 2 следует, что полученные в рамках модели аналитические зависимости количественно описывают результаты эксперимента. Этот факт позволяет сделать следующие выводы и предположения:

— для количественного описания работы ПВДФ-датчика с приемлемой для практи-

ческого применения точностью достаточно использовать только механизм изменения поляризации ПВДФ за счет изменения объема его аморфной фазы при ударном сжатии; использования других механизмов, как это предложено в работах [11–13], не требуется;

— модель позволяет свести процедуру калибровки датчика в требуемом диапазоне давлений к экспериментальной проверке аналитической калибровочной зависимости при нескольких выбранных значениях давления;

— большинство экспериментальных точек, представленных на рис. 2, получено при размещении датчиков в средах с большей, чем у ПВДФ, жесткостью, т. е. при многократном ударном сжатии, в то время как зависимость $p(Q)$, описывающая эксперимент, получена в предположении однократного сжатия. Поэтому можно сделать вывод, что для ПВДФ различие между адиабатами однократного и многократного сжатия несущественно для рассматриваемой задачи в диапазоне $p \leq 36$ ГПа;

— ударное сжатие в диапазоне $p \leq 36$ ГПа практически не приводит к изменениям структуры кристаллической фазы ПВДФ. Изменения структуры должны дополнительно увеличивать поляризацию за счет изменения дипольных моментов и (или) разупорядочения системы диполей, однако этого не наблюдается, так как зависимость, количественно описывающая эксперимент, получена в предположении, что поляризация изменяется только за счет изменения объема.

Рассмотрим электрическую реакцию датчика, размещенного в средах с меньшей и большей, чем у ПВДФ, акустической жесткостью. В первом случае датчик будет рассматриваться как тонкая жесткая прокладка, во втором — как тонкая мягкая прокладка. По среде распространяется ударная волна с прямоугольным профилем.

Хорошо известно, что в конечном итоге в таких системах установится давление, равное давлению на фронте волны. Однако это состояние достигается разными путями. Жесткая прокладка подвергается попеременному воздействию ударных волн и волн разрежения; мягкая прокладка сжимается серией ударных волн. Так как ток датчика пропорционален dp/dt , это должно отражаться на регистрируемом сигнале: в случае жесткой прокладки сигнал должен быть разнополярным, в случае мягкой прокладки однополярным.

Такая картина и наблюдается в эксперименте. В качестве примера на рис. 3 приведены импульсы тока, зарегистрированные датчиками, размещенными в плексигласе и алюминии. Рассчитанные по этим данным зависимости $p(t)$ также представлены на рис. 3.

При размещении датчика на границе раздела двух сред, одна из которых акустически согласована с датчиком (датчик с акустическим отводом), реверберация волн отсутствует и выходной сигнал датчика должен быть однополярным «гладким» импульсом. Именно такая реакция датчика зарегистрирована в работе [7]. Акустический отвод был изготовлен из материала Kel-F, импеданс которого равен импедансу ПВДФ. Отметим, что в качестве акустического отвода можно использовать фторопласт, ударная адиабата которого также близка к адиабате ПВДФ.

Из сказанного выше следует, что для ПВДФ-датчика возможны два варианта постановки измерений: 1) датчик размещается в исследуемом веществе; 2) используется датчик с акустическим отводом.

При размещении датчика в исследуемом материале верхняя граница диапазона измеряемых с его помощью давлений составляет на сегодня 36 ГПа. Для определения амплитуды давления при такой постановке опытов необходимо знать только ударную адиабату (калибровочную функцию) ПВДФ, и, следовательно, имеется возможность проводить измерения в материалах с неизвестными ударными адиабатами.

Для датчика с акустическим отводом указанное давление (36 ГПа) реализуется в ПВДФ. Следовательно, здесь можно измерять более высокие давления в материалах с большей, чем у ПВДФ, жесткостью. Например, при давлении в ПВДФ 36 ГПа давление в железе составит приблизительно 100 ГПа. В этом случае для определения амплитуды давления требуется знать как адиабату ПВДФ, так и адиабату исследуемого материала.

Электрическая реакция на нагрев в рамках рассматриваемой модели может проявляться только как вторичный пироэлектрический эффект — пьезоэффект при тепловой деформации механически свободного ПВДФ. Следовательно, при сжатии электрическая реакция на нагрев должна отсутствовать. Это подтверждается результатами, приведенными на рис. 2, так как зависимость $p(Q)$ получена без

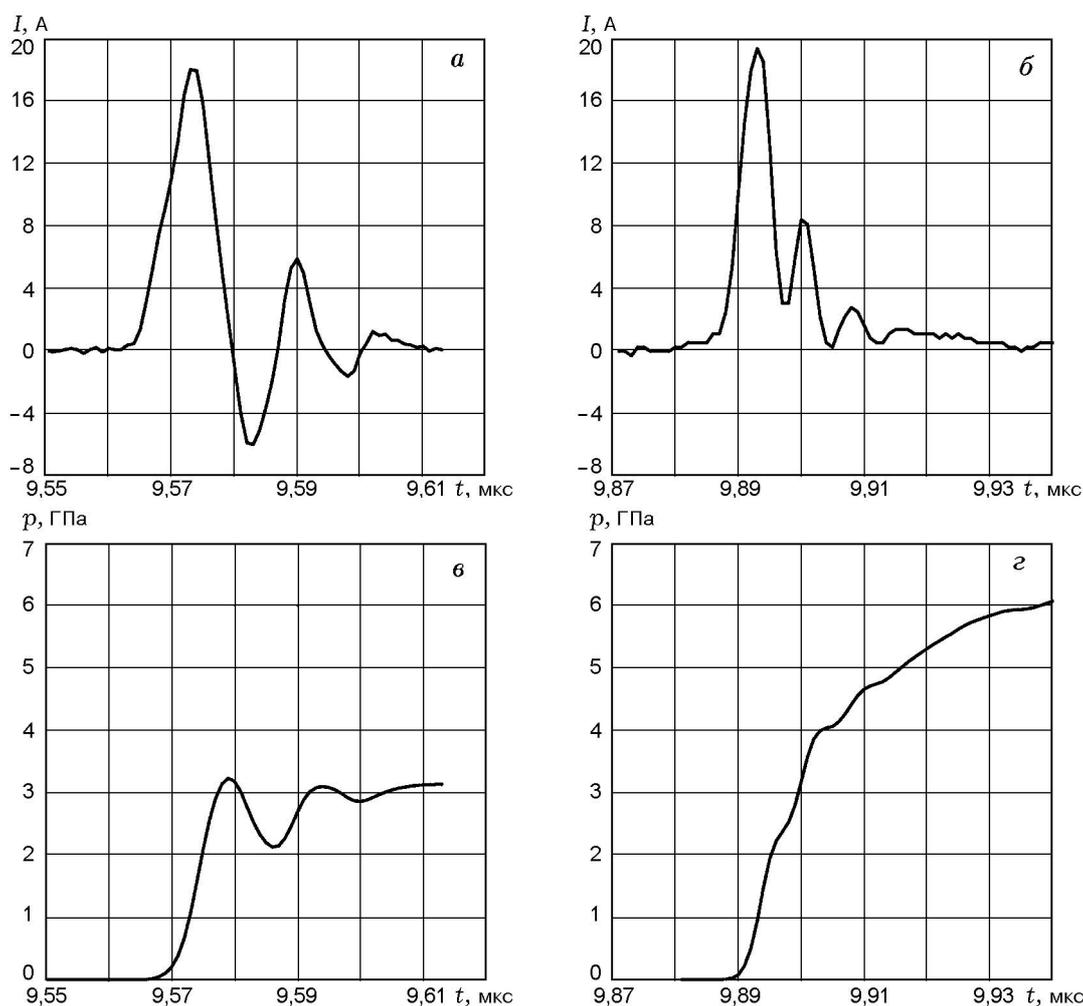


Рис. 3. Осциллограммы импульсов тока I , зарегистрированные датчиками, размещенными в плексигласе (*a*) и алюминии (*б*), и рассчитанные по ним профили давления в плексигласе (*в*) и алюминии (*г*)

учета нагрева ПВДФ в ударной волне. В волне разгрузки электрическая реакция на нагрев может проявляться только при разгрузке до атмосферного давления и будет заключаться в генерировании датчиком электрического заряда после полной разгрузки, что приведет к появлению участка противоположного, чем при сжатии, знака на зависимости $Q(t)$. Отметим, что этот эффект наблюдался в [13] при исследовании волн разгрузки ПВДФ-датчиком.

Таким образом, представленная модель ПВДФ-датчика динамического давления, основанная на предположении, что поляризация ПВДФ при механическом воздействии изменяется только за счет изменения его объема, количественно описывает экспериментальные ре-

зультаты в диапазоне давлений ударного сжатия $1 \div 36$ ГПа. В рамках модели впервые получены аналитические выражения для калибровочной зависимости и характеристик выходного сигнала датчика, не содержащие подгоночных параметров. Параметрами здесь являются остаточная поляризация ПВДФ, его начальная плотность и коэффициенты соотношения скоростей D , u .

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bauer F.** PVF₂-polymer: Ferroelectric polarization and piezoelectric properties under dynamic pressure and shock wave action // *Ferroelectrics*. 1983. V. 49. P. 231–235.
2. **Borissenok V. A., Morozov V. A., Novitsky E. Z.** PVDF as a working medium of shock

- wave gauge // Proc. of Xth Intern. Conf. High Energy Rate Fabrication. Ljubljana, 1989. P. 428–431.
3. **Hodges R. V., McCoy L. E., Toolson J. R.** Polyvinylidene fluoride (PVDF) gauges for measurement of output pressure of small ordnance devices // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2000. V. 25. P. 13–18.
 4. **Graham R. A., Bauer F., Lee L. M., et al.** The standardized bauer piezoelectric polymer shock gauge // Proc. of Shock Waves in Condensed Matter. Elsevier Sci. Publ., 1988. P. 47–50.
 5. **Bauer F.** Metrologie d'ondes de choc a l'aide de polymeres piezoelectriques // J. de Physique IV. 1991. V. 1. P. 427–433.
 6. **Bauer F.** Properties of ferroelectric polymers under high pressure and shock loading // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1995. V. b105. P. 212–216.
 7. **Graham R. A.** Solids under high-pressure shock compression. Springer-Verlag, 1992.
 8. **Bauer F.** Ferroelectric properties and shock response of a poled PVF₂ polymer and of VF₂/C₂F₃H copolymer // Proc. of Shock Waves in Condensed Matter. Elsevier Sci. Publ., 1986. P. 483–496.
 9. **Уртъев П. А., Эрикссон Р. М., Хейс Б., Паркер М. Л.** Измерение давления и массовой скорости в твердых телах при динамическом нагружении // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 5. С. 113–126.
 10. **Graham R. A., Anderson M. U., Bauer F., Setchell R. E.** Piezoelectric polarization of the ferroelectric polymer PVDF from 10 MPa to 10 GPa: Studies of loading — path dependence // Proc. of Shock Waves in Condensed Matter. Elsevier Sci. Publ., 1992. P. 883–886.
 11. **Lynch C. S., Charest J. A.** Practical consideration on the piezofilm gauge technique // Ibid. P. 901–904.
 12. **Молодец А. М., Еремченко Е. Н.** Обобщенная зависимость электрического отклика полимерной пьезопленки от давления ударного сжатия // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 5. С. 149–154.
 13. **Набатов С. С., Якушев В. В.** Анализ отклика пьезополимерных датчиков давления на плоскую ударную волну // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 3. С. 130–135.
 14. **Поплавко Ю. М.** Физика диэлектриков. Киев: Вища шк., 1980.
 15. **Борисенок В. А., Морозов В. А., Новицкий Е. З. и др.** Динамическая сжимаемость АДТГС и его электрическая реакция на воздействие ударной волны // Кристаллография. 1992. Т. 37, вып. 4. С. 971–978.
 16. **The Application of Ferroelectric Polymers** / T. T. Wang, J. M. Herbert, and A. M. Glass (Eds). London: Blackie and Son, 1988.
 17. **Высокоскоростные ударные явления** / Под ред. В. Н. Николаевского. М.: Мир, 1973.
 18. **Bauer F.** PVDF gauge piezoelectric response under two-stage light gas gun impact loading // Proc. of Shock Waves in Condensed Matter. Elsevier Sci. Publ., 2002. P. 1149–1152.

Поступила в редакцию 26/VII 2002 г.
