

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Н. Акимова, М. Ф. Гоголя, В. П. Галкин. ФГВ, 1978, 14, 2, 135.
2. М. Ф. Гоголя, И. М. Воскобойников, П. Г. Демченко. ФГВ, 1981, 17, 1, 153.
3. И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя, А. Ю. Долгобородов. ФГВ, 1981, 17, 5, 133.
4. F. C. Gibson, M. Bowser. J. Appl. Phys., 1958, 29, 4, 628.
5. И. М. Воскобойников, А. Я. Аппи. Докл. АН СССР, 1960, 130, 4, 804.
6. В. П. Кологривов, А. А. Анчуров. УФН, 1964, 9, 236.
7. В. С. Трофимов, А. В. Троян. ФГВ, 1969, 5, 280.
8. P. A. Person, T. Siglin. 5-th Symp. on Detonation. Naval ordnance research, 1970.
9. R. Dick. J. Chem. Phys., 1970, 52, 12.
10. R. Dick. J. Chem. Phys., 1979, 71, 8.
11. Л. В. Альтшулер, А. А. Баканова, П. П. Дудолодов. ЖЭТФ, 1967, 53, 1967.
12. R. G. McQueen, S. P. Marsh, J. W. Taylor et al. High — Velocity Impact Phenomena. N. Y.: Academic Press, 1970.
13. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов, А. П. Афанасенков и др. Докл. АН СССР, 1968, 182, 4, 807.
14. И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя. Хим. физика, 1982, 3, 423.
15. Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станкович и др. Физика взрыва. М.: Наука, 1975.
16. M. van Thiel. Compendium of shock wave data. Univ. California, Livermore, 1966.
17. И. М. Воскобойников, А. П. Афанасенков. — В кн.: Взрывное дело. — № 75/32. М.: Недра, 1975.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ПЬЕЗОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН

*В. М. Шунин, А. Г. Ангипенко, А. Н. Дремин, В. В. Якушев,
Е. Г. Андрианов, Т. Т. Еремеева, В. В. Климов, Р. Г. Стец
(Черноголовка)*

Пьезоэлектрические материалы (например, кварц, керамика) широко используются в качестве рабочего тела датчиков давления [1—3], а также являются эффективными преобразователями энергии взрыва в электрическую энергию [2, 4]. Однако применение этих материалов часто ограничивается вследствие их хрупкости, трудности получения сложных геометрических конфигураций и т. п. Поэтому представляют интерес разработка и исследование конструкционных материалов, которые могут иметь высокую пьезоактивность керамики и в то же время обладать рядом существенных преимуществ, в частности, технологичностью в изготовлении, более высокими механической прочностью к ударным воздействиям, пластичностью и др.

В последние годы начали интенсивно разрабатывать и изучать композиционные пьезокерамические составы различных типов [5—11]. Разнообразие пьезокомпозиций как по методам получения, так и по свойствам вызвано широким диапазоном их применения. Согласно [11], перспективны композиты, состоящие из смеси порошкообразной сегнетокерамики с полимером, вследствие довольно простой технологии изготовления, возможности использования отходов пьезокерамического производства, легкости получения эластичных пьезоэлементов. Меняя соотношения наполнителя и связующего в этих составах, можно варьировать электрические и механические свойства образца. С целью выяснения областей возможного использования таких материалов в динамических экспериментах представляется целесообразным исследовать электрические явления, возникающие в них под действием ударных волн.

Исследуемые материалы. Изучены композиционные пьезокерамические материалы, которые представляют собой механическую смесь порошкообразной керамики цирконат-титанат свинца ЦТС-19 и сополимера винилденфторида с тетрафторэтиленом (Ф-42). Выбор этого полимера в качестве связующего обусловлен его достаточно высокой диэлектрической

Таблица 1

Состав	$T_{\text{пр}}, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{пр}}, \text{МПа}$	$T_*, ^\circ\text{C}$	$E_*, \text{кВ/мм}$	$t_*, \text{час}$
ЦТС-19 (40%) — Ф-42	240	340	140	4,0	1,0
ЦТС-19 (60%) — Ф-42	270	430	140	4,0	»
ЦТС-19 (80%) — Ф-42	280	560	140	4,0	»
ЦТС-19 (50%) — СКН-26	145+5	7,4	комн.	3—4	»

Примечание. $T_{\text{пр}}$, $p_{\text{пр}}$ — температура и давление прессования; T_* — температура поляризации; E_* — напряженность поля; t_* — время поляризации.

Таблица 2

Состав	$d_{33} \cdot 10^{12}, \text{Кл/Н}$	$\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$	$\text{tg} \delta$	$E_{\text{проб}}, \text{кВ/мм}$
ЦТС-19 (40%) — Ф-42	15—20	60—80	0,02	9—12
ЦТС-19 (60%) — Ф-42	40—60	140—164	0,017	8—10
ЦТС-19 (80%) — Ф-42	90—100	300—350	0,016	6—9
ЦТС-19 (50%) — СКН-26	200—250	60—70	0,021—0,023	—

пропицаемостью ($\epsilon = 10$) и сравнительно большим удельным электрическим сопротивлением ($\rho = 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Для сравнения проведены эксперименты с составом, где в качестве связки применяли каучук СКН-26 с $\epsilon = 8$, $\rho \approx 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Композиты с этим связующим значительно эластичнее, чем системы ЦТС-19 — Ф-42.

В работах [6, 12] показано, что в смесевых композиционных материалах с увеличением объемной концентрации наполнителя ЦТС-19 в исходной смеси от 40 до 80% пьезоэлектрические характеристики образцов возрастают, в то же время их механические свойства, например удельная ударная вязкость, пластичность, падают. Поэтому исследовано три состава ЦТС-19 — Ф-42 с объемной концентрацией керамики 40, 60 и 80%. Образцы ЦТС-19 — СКН-26 выполнены с объемной концентрацией наполнителя 50%.

Наполнитель готовили из обожженной при 1200°C керамики, измельчая ее в лабораторной вибромельнице (удельная поверхность $\sim 0,16 \text{ м}^2/\text{г}$). Затем его смешивали в вибромельнице с порошком полимера Ф-42. Из полученной массы методом горячего прессования делали образцы диаметром 10 и высотой 2 мм. При этом к ним припрессовывали электроды из алюминиевой фольги или тонкой латунной сетки, после чего помещали полученные материалы в термобаню с силиконовым маслом и поляризовали в постоянном электрическом поле.

Эластичный пьезоэлектрик на основе ЦТС-19 и СКН-26 получали из вальцованной смеси каучука с наполнителем с последующей вулканизацией под давлением. Поляризацию эластичных образцов также проводили в силиконовом масле.

Оптимальные параметры прессования и поляризации композитов (табл. 1) определяли по максимальным значениям пьезомодуля d_{33} . Электрофизические свойства исследуемых составов приведены в табл. 2, где приняты следующие обозначения: $\text{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; $E_{\text{проб}}$ — напряженность поля, при которой происходит пробой исследуемого диэлектрика; $\frac{\epsilon_{33}^T}{\epsilon_0}$ — относительная диэлектрическая проницаемость.

Постановка ударно-волновых экспериментов. Одномерное ударное нагружение образцов в области давлений до 3 ГПа осуществляли на пороховой пушке, аналогичной [13] (ударник выполнен из алюминия). Схема экспериментов изображена на рис. 1. На алюминиевой мишени толщиной 3 мм расположены: датчик давления, представляющий собой x -срез кристалла кварца диаметром 10 и высотой 2 мм с полированными посеребренными торцами; три контактных датчика для запуска раз-

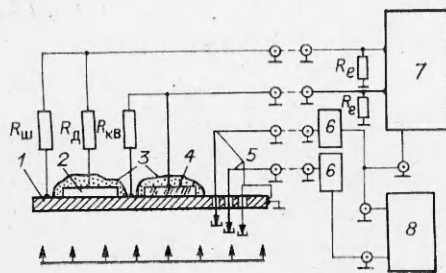


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — экран; 2 — исследуемый образец; 3 — эпоксидный компаунд; 4 — x-срез кристалла кварца; 5 — контактные датчики; 6 — формирующая схема; 7 — осциллограф ОК-33; 8 — частотомер ЧЗ-34; $R_{кв}$ — сопротивление шунта для кварцевого датчика. Стрелками показано направление полета ударника.

вертки регистрирующего осциллографа ОК-33 и измерения скорости полета ударника; исследуемый образец. Электрическая схема измерений состоит из конденсатора с исследуемым веществом и внешней цепи, которая содержит шунтирующее сопротивление $R_{ш} = 3,30$ м, входное сопротивление осциллографа $R_e = 75$ Ом и, в отдельных опытах, добавочное сопротивление $R_d = 0 \div 500$ Ом. Сигнал, возникающий при прохождении по образцу фронта ударной волны (УВ), подавался через коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 75 Ом на согласованный с ним вход усилителя ОК-33, а ток с кварцевого датчика — на другой канал осциллографа. Рассмотренная конструкция узла мишени позволяла одновременно записывать электрический отклик пьезокомпозиата на воздействие УВ, амплитуду волны в кварце, скорость полета ударника и фиксировать момент входа фронта УВ в исследуемое вещество.

Эксперименты при динамических давлениях $p > 3$ ГПа выполнены аналогично [14] с использованием взрывных генераторов, имеющих диаметр 80 или 100 мм, создающих близкие к одномерным УВ. Давление изменяли варьированием состава и плотности заряда ВВ и материала экрана: алюминий, медь, медь — парафин — медь. В опытах применяли стандартные заряды, обеспечивающие известное динамическое состояние сжатого экрана. Давление в исследуемом материале рассчитывали методом отражения [15] по известному состоянию материала экрана и скорости фронта УВ в образце, полученной из экспериментальных осциллограмм.

Результаты экспериментов и их обсуждение. В опытах регистрируются импульсы напряжения $V(t)$ на сопротивлении R_e . Ток во внешней цепи можно определить из соотношения $i(t) = V(t) \cdot (R_{ш} + R_e) / R_{ш} \cdot R_e$. Некоторые кривые $i(t)$, рассчитанные по экспериментальным осциллограммам, приведены на рис. 2, $R_{ш} = 4,3$ Ом. В начальный момент времени $t = 0$ ударная волна входит в образец, t_n соответствует времени прохождения фронта УВ по образцу. Для всех исследованных веществ, начиная с некоторых давлений, на зависимостях $i(t)$ фиксируется провал.

Удельную энергию, выделившуюся во внешней цепи, можно рассчитать по формуле

$$\omega = v^{-1} R_n \int_{t=0}^{t_n} i^2(t) dt,$$

где v — объем исследуемого образца; R_n — сопротивление нагрузки, равное $R_d + (R_{ш} R_e) / (R_{ш} + R_e)$. За время t_n на нагрузке реализуется заряд

$Q = S^{-1} \int_{t=0}^{t_n} i(t) dt$, где S — площадь электродов. Большинство измерений проводили при $R_n = 4,1$ Ом. Максимальную реализуемую энергию ω_{max} определяли в опытах с разными R_n .

Все эксперименты выполнены в аксиальной постановке. Как правило, вектор остаточной поляризации \vec{P}_0 был ориентирован противоположно направлению распространения УВ. В отдельных опытах \vec{P}_0 направлен параллельно движению фронта. Для данных материалов в диапазоне

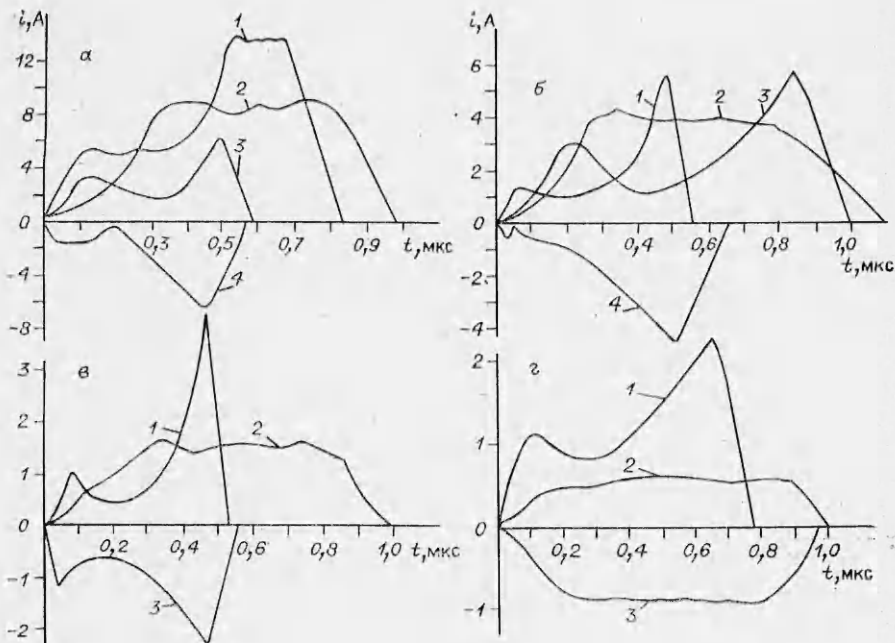


Рис. 2. Изменение тока во внешней цепи за время прохода фронта УВ по образцам из ЦТС-19 (80%) — Ф-42 (а), ЦТС-19 (60%) — Ф-42 (б), ЦТС-19 (40%) — Ф-42 (в) и ЦТС-19 (50%) — СКН-26 (г).

p , ГПа: а) 1—2,2, 2—1,4, 3—1,6, 4—1,7; б) 1—14,6, 2—1,3, 3—2,7, 4—1,5; в) 1—12, 2—1,6, 3—1,3; г) 1—5, 2—1,6, 3—2,2. $t_{пр}$, мкс: а) 1—0,69, 2—0,78, 3—0,49, 4—0,45; б) 1—0,48, 2—0,79, 3—0,81, 4—0,5; в) 1—0,46, 2—0,85, 3—0,48; г) 1—0,65, 2—0,89, 3—0,8.

$p = 1 \div 25$ ГПа значение Q не зависит от взаимного расположения \vec{P}_0 и вектора скорости фронта УВ. Однако вследствие различия исходных электрофизических характеристик образцов разброс значений Q составлял до 30%.

На рис. 3 показаны зависимости реализованного на нагрузке 4,1 Ом заряда от динамического давления. Каждая кривая имеет максимум, величина которого коррелирует с содержанием керамики в исследуемых композитах. При снижении объемной доли наполнителя в образце максимальное значение Q падает и сдвигается в сторону больших давлений. Для составов ЦТС-19 — Ф-42 с содержанием керамики 80, 60 и 40% максимальный заряд выделяется при динамических давлениях 2; 2,6 и 5,5 ГПа соответственно. У материала со связующим из СКН-26 Q достигает максимума при $p = 13$ ГПа.

Интересно провести сопоставление значений Q , получаемых при прохождении УВ в композитах, с соответствующими Q для чистой пьезокерамики. Оказалось, что для систем ЦТС-19 — Ф-42 изменение заряда с давлением аналогично соответствующей зависимости для ЦТС-19 при одинаковой постановке экспериментов и сопротивлениях нагрузки того же порядка [16]. Для некоторых зарубежных аналогов керамик типа $Pb(Zr_{1-x}Ti_xO_3)$ [4], PZT 95/5 и PZT 68/7 [17] также отмечено уменьшение заряда с ростом давления после достижения максимального Q при $p = 1,5 \div 2$ ГПа. Напротив, в [18], где исследовали электрические свойства тонких дисков (диаметром 12,7 и толщиной 0,76 мм) из PZT 56/44 в диапазоне динамических давлений 0,7—8,8 ГПа в аксиальной постановке экспериментов, установлено, что выделившийся заряд на нагрузке 0,05 Ом не зависит от амплитуды УВ при $p > 1,5$ ГПа. Кроме того, при $p > 5,6$ ГПа авторы [18] наблюдали зависимость электрических свойств от взаимного расположения \vec{P}_0 и скорости фронта УВ. По величине реализованного заряда керамики системы ЦТС превосходят композиционные материалы в 5—7 раз.

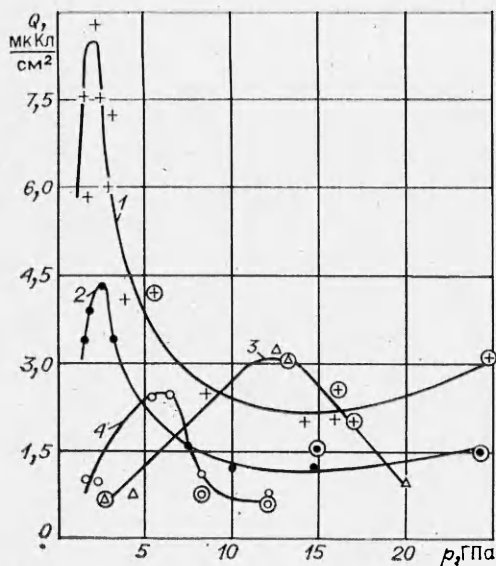


Рис. 3. Зависимость реализованного на нагрузке заряда от динамического давления. 1 — ЦТС-19 (80%) — Ф-42; 2 — ЦТС-19 (60%) — Ф-42; 3 — ЦТС-19 (50%) — Ф-42; 4 — ЦТС-19 (40%) — Ф-42. Экспериментальные точки, заключенные в круг, соответствуют случаю, когда P_0 и вектор скорости фронта УВ параллельны.

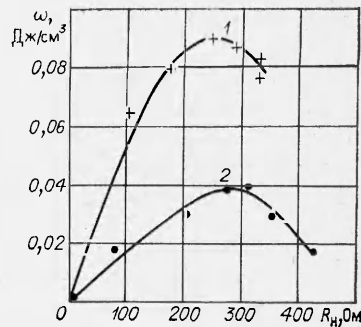


Рис. 4. Зависимость удельной энергии от сопротивления нагрузки. 1 — ЦТС-19 (80%) — Ф-42, $p = 2,1$ — 2,4 ГПа; 2 — ЦТС-19 (60%) — Ф-42, $p = 2,6$ ГПа.

Зависимость удельной энергии от сопротивления нагрузки представлена на рис. 4. Видно, что при деполяризации образца ЦТС-19 (80%) — Ф-42 в УВ амплитудой 2,2 ГПа $\omega_{\max} = 0,09$ Дж/см³ при $R_n \approx 240$ Ом, а для состава ЦТС-19 (60%) — Ф-42 $\omega_{\max} = 0,04$ Дж/см³ на сопротивлении ~ 300 Ом при динамическом давлении 2,6 ГПа. В то же время при деполяризации керамики PZT [4] и ЦТС-19 [2] $\omega_{\max} \approx 1$ Дж/см³. Все эти величины удельной энергии получены методом отбора максимальной мощности в нагрузку. Таким образом, у исследованных материалов ω примерно на порядок меньше соответствующих значений для чистой пьезокерамики.

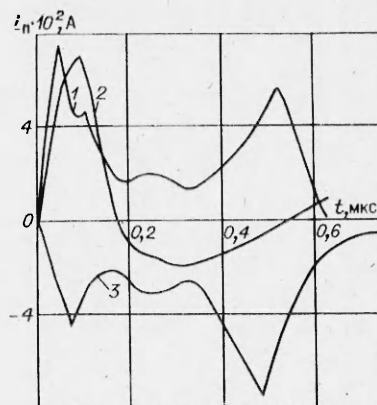
Вероятно, причина снижения энергетических характеристик смешанных композиционных пьезоэлектриков заключается в меньшем значении остаточной поляризованности данных образцов по сравнению с пьезокерамикой. Отметим, что определить P_0 по измерению петли гистерезиса практически невозможно, так как для этого необходимы высокие значения электрического поля, которые приводят к пробое исследуемых веществ. Значение P_0 можно оценить из зависимости $Q(R_n)$ при $R_n \rightarrow 0$. Такие оценки, например для системы ЦТС-19 (80%) — Ф-42, дали величину остаточной поляризованности на уровне 10 мкКл/см².

Известно, что при достаточном динамическом давлении происходит полная деполяризация керамических образцов [2, 18]. В данных экспериментах, начиная с некоторого давления, заряд, выделяющийся при деполяризации, уменьшается. Одно из возможных причин такого поведения композиционных элементов могут быть электрический пробой и, как следствие, возникновение электропроводности в ударно-сжатом веществе.

Для выяснения возможного вклада в электрический сигнал тока ударной поляризации [19] проведены контрольные эксперименты с неполяризованными системами ЦТС-19 — Ф-42. Постановка экспериментов аналогична опытам по деполяризации, сопротивление нагрузки составляло 4,1 Ом. Экспериментальные кривые тока ударной поляризации i_n показаны на рис. 5. Оказалось, что значение i_n примерно на два порядка меньше сигнала деполяризации и, следовательно, на него не влияет знак сигнала ударной поляризации в композиционных системах зависит от их состава. В образцах с объемной концентрацией наполнителя 80, 40% знак i_n соответственно отрицательный и положительный, а с концентрацией керамики 60% сигнал знакопеременный. Разумно предположить,

Рис. 5. Ток ударной поляризации в системах ЦТС-19 — Ф-42.

Наполнитель, %: 1 — 40, 2 — 60, 3 — 80; p , ГПа: 1 — 12, 2 — 14, 3 — 16.



что i_n в смесевых композиционных материалах складывается из соответствующих откликов от наполнителя и связующего. Однако ток ударной поляризации как в ЦТС-19 [16], так и в полимере Ф-42 [20] имеет одинаковую полярность. В связи с этим вопрос о природе ударной поляризации в данных смесевых системах остается открытым.

Итак, в работе определены электрические и энергетические характеристики (i , Q , ω) ударно-сжатых смесевых образцов в зависимости от содержания керамики. Показано, что максимальная реализованная в нагрузке энергия составляет 10% от соответствующего значения в чистой керамике ЦТС-19. По-видимому, причина значительного снижения энергетических характеристик пьезокомпазитов по сравнению с керамикой заключается в недостаточной поляризованности исследованных материалов.

Поступила в редакцию 13/II 1985

ЛИТЕРАТУРА

1. R. A. Graham, F. W. Neilson, W. B. Benedick. J. Appl. Phys., 1965, 36, 5, 1775.
2. Е. З. Новицкий, В. Д. Садунов, Г. Я. Карпенко. ФГВ, 1978, 14, 4, 115.
3. P. L. Stanton, R. A. Graham. Ferroelectrics, 1983, 49, 177.
4. F. Bauer, V. Vollrath. Ferroelectrics, 1976, 12, 153.
5. R. E. Newnham, D. P. Skinner, K. A. Klieker e. a. Ferroelectrics, 1980, 27, 49.
6. Е. Г. Андрианов, В. В. Климов, Р. Г. Стец и др.— В кн.: Получение и исследование материалов для электронной техники. М., 1982.
7. A. Safari, R. E. Newnham, L. E. Cross e. a. Ferroelectrics, 1982, 41, 197.
8. T. Yamada, T. Veda, T. Kitayama. J. Appl. Phys., 1982, 53, 6, 4328.
9. Z. Yong-Qin, H. Ywan-Guana, X. Qi-Chang. Ferroelectrics, 1983, 49, 241.
10. J. Mendida, B. Jimenez. Ferroelectrics, 1984, 53, 159.
11. В. М. Петров, Г. А. Луцейкин.— В кн.: Актуальные проблемы получения и применения сегнето- и пьезоэлектрических материалов. Тез. докл. Ч. II. М., 1984.
12. Р. Г. Стец, Е. Г. Андрианов, Т. Т. Еремеева и др.— В кн.: Химия и технология материалов для новой техники. М., 1980.
13. С. С. Набатов, В. В. Якушев. Проблемы прочности, 1975, 3, 101.
14. В. В. Якушев, А. П. Дремни, С. С. Набатов и др. ФГВ, 1979, 15, 2, 132.
15. Л. В. Альтшулер, К. К. Крушиков, М. П. Бражник. ЖЭТФ, 1958, 34, 4, 886.
16. Е. З. Новицкий, Е. С. Тюнькин, В. П. Минеев и др.— В кн.: Горение и взрыв. М.: Наука, 1972.
17. W. J. Halpin. J. Appl. Phys., 1966, 37, 153.
18. W. Mock, Jr., W. P. Holt. J. Appl. Phys., 1979, 50, 4, 2740.
19. В. П. Минеев, А. Г. Иванов. УФН, 1976, 119, 1, 75.
20. А. Г. Антипенко, А. П. Дремни, А. П. Курто и др. Докл. АН СССР, 1984, 276, 2, 389.

УСЛОВИЯ СТАЦИОНАРНОСТИ ОДНОМЕРНЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН

А. М. Мардашев
(Новосибирск)

Теория идеальной и неидеальной детонации представляет процесс в одномерном приближении как распространение самоподдерживающейся ударной волны (УВ) в реагирующей среде [1—3]. Эффекты механического и теплового взаимодействия со стенками трубы, бокового разлета