

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ДИОКСИДЦИРКОНИЕВОЙ КЕРАМИКИ РАЗЛИЧНОГО ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА И ПОРИСТОСТИ

В. А. Огородников, А. Г. Иванов, С. В. Ерунов, В. И. Лучинин,
В. Н. Минеев*, Ф. А. Акопов*, Г. П. Чернышов*

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

*Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН, 127412 Москва

Представлены результаты измерений ударно-волновых профилей скорости свободной поверхности образцов диоксидциркониевой керамики пористостью $16 \div 22\%$, изготовленных из составов с размером крупной фракции $0,5 \div 2,0$ мм. Ударно-волновое нагружение образцов ZrO_2 толщиной $5 \div 20$ мм осуществлялось алюминиевыми ударниками толщиной $3 \div 12$ мм со скоростью $10 \div 100$ м/с. Измеренные профили скорости свободной поверхности использовали для оценки динамической прочности керамики на сжатие, растяжение и проявления ею признаков демпфирующих свойств.

Одной из основных проблем безопасной эксплуатации ядерных реакторов на атомных электростанциях (АЭС) является надежная локализация расплава активной зоны в случае возникновения аварии. Анализ возможных сценариев аварий на реакторе показал, что локализация расплава активной зоны в некоторых существующих АЭС может быть осуществлена с помощью шахтных ловушек [1], а в проектируемых АЭС — путем организации его вывода в специально подготовленное помещение, растекания и последующего охлаждения в нем [2]. В обоих случаях материалы, предназначенные для облицовки этих сооружений, должны обладать повышенными теплофизическими и деформационными свойствами, поскольку они могут подвергаться, наряду с другими, воздействию механического и термического ударов. В качестве одного из перспективных материалов для этих целей в настоящее время рассматривается диоксидциркониевая керамика [3–5]. Имеющиеся в литературе данные об ударно-волновом деформировании и разрушении керамических материалов, особенно с повышенной пористостью ($k > 10\%$), противоречивы и крайне ограничены [6, 7]. Отсутствие детальных данных о кинетике этих процессов затрудняет построение соответствующих расчетно-теоретических моделей [8], необходимых для расчетного описания реакции материала ловушки на то или иное воздействие. В данной работе, являющейся продолжением

[4, 5], представлены результаты систематического исследования поведения при динамическом нагружении образцов диоксидциркониевой керамики четырех партий с исходной пористостью от 16 до 22%, изготовленных из составов с размером крупной фракции $0,5 \div 2,0$ мм.

Технология изготовления исследуемых керамик подробно описана в [3]. Основным компонентом диоксидциркониевой керамики I и II типов является ZrO_2 , легированный Y_2O_3 (мольная концентрация 9,8%). Диоксид циркония использовали в виде зерен размером $0,001 \div 1$ мм, получаемых из электроплавленного ZrO_2 . В спеченном виде мелкая фракция достигала размера 0,02 мм и выполняла роль связующего. При изготовлении диоксидциркониевой керамики III и IV типов в качестве основы использовали комбинированный состав дисперсной составляющей из диоксида циркония, включающий в себя 50% кубического и 50% тетрагонального твердых растворов, стабилизированных Y_2O_3 . Изготовленные образцы содержали стабилизированный диоксид циркония с размером зерна менее 0,2 мм в количестве 30%, дисперсную составляющую в количестве 15%, стабилизированный диоксид циркония с размером зерна $0,5 \div 1$ мм либо $1 \div 2$ мм в количестве 55%. Некоторые характеристики исследуемых образцов диоксидциркониевой керамики приведены в табл. 1, где ρ_0 — плотность керамики; k — открытая пористость; c_l , c_n — продольная и поперечная скорости звука соответственно;

Таблица 1

Тип керамики	Размер крупной фракции, мм	ρ_0 , г/см ³	k , %	c_l , км/с	c_n , км/с	ν	E , ГПа	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_p , МПа
I	0,5–1	4,80	22,0	3,3	2,0	0,235	54,8	90–140	9–13
II	0,5–1	4,80	17,0	3,3	2,0	0,220	54,8	—	—
III	0,5–1	4,87	16,0	3,6	1,7	0,291	62,8	115 ± 15	—
IV	1–2	4,80	16,7	3,3	1,7	0,253	53,2	67 ± 12	—

Таблица 2

Тип керамики	Δ , мм	σ_0 , МПа	σ'_p , МПа	$\dot{\epsilon}$, 10 ⁻³ с ⁻¹	λ , мДж·см ⁻²
I	5	45–60	5–30	0,3–2,3	6–12
	10	26–80	7–18	0,1–0,8	3–32
II	5	55–70	4–27	0,5–1,5	8–16
	10	45–118	9–16	0,1–0,5	10–41
III	5	41–116	20–70	0,1–2,3	5–44
IV	10	65–88	6–20	0,4–0,7	18–34

ν — коэффициент Пуассона; E — модуль Юнга; $\sigma_{сж}$, σ_p — статическая прочность керамики при сжатии и растяжении соответственно.

Исследование динамической прочности образцов из диоксидциркониевой керамики при сжатии и растяжении проводили на испытательном комплексе БУТ-76 [9]. Образцы имели форму дисков диаметром ≈ 50 мм и толщиной $\Delta = 5, 10$ и 20 мм. Перед проведением опыта особое внимание уделяли качеству подготовки торцевых (нагружаемой и свободной) поверхностей, неплоскостность и непараллельность которых не превышала 50 мкм. На боковую и свободную поверхности образцов напыляли слой меди толщиной ≈ 20 мкм (для создания проводящих поверхностей) и запрессовывали их в обоймы из алюминия диаметром 90 мм. Такие мишени в зависимости от их толщины нагружали ударниками из алюминия диаметром 75 мм и толщиной $3, 6$ или 12 мм. Размеры пар ударник — мишень выбирали из условия обеспечения одномерной деформации. Скорости ударников W_0 изменяли в пределах $10 \div 100$ м/с, при которых реализовывались следующие условия нагружения образцов в мишени: отсутствие зародышей разрушения, наблюдаемых у микрошлифов продольного сечения образцов при увеличении в 200 раз; появление отдельных зародышей разрушения в виде микропор или микротрещин; слияние зародышей

разрушения в магистральную трещину; разделение образца на части. Мишень с образцом после нагружения тормозили в малоплотной среде (полиэтиленовая стружка), разрезали и проводили металлографический анализ состояния образца. В каждом опыте с помощью емкостного датчика диаметром 20 мм с охранным кольцом непрерывно регистрировали скорость свободной поверхности образца $W(t)$. Дополнительно в опытах, используя электроконтакты, измеряли скорость ударника W_0 и определяли момент соударения ударника с мишенью, который связывали с профилем $W(t)$, регистрируемым емкостным датчиком на одном измерительном канале.

На рис. 1 приведены типичные профили скорости свободной поверхности $W(t)$ образцов керамики различного фракционного состава и пористости: $a, б$ — образцов керамики толщиной $\Delta = 5, 10$ и 20 мм с исходной пористостью 22% (тип I) и 17% (тип II); $в$ — образцов керамики III и IV типов толщиной $\Delta = 5$ и 10 мм с близкой исходной пористостью ($\approx 17\%$), но разным фракционным составом (размер зерна $0,5 \div 1$ и $1 \div 2$ мм).

По профилю $W(t)$ оценивали динамический предел текучести

$$\sigma_q = \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \sigma_{HEL} = 0,5 \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \rho_0 DW_y$$

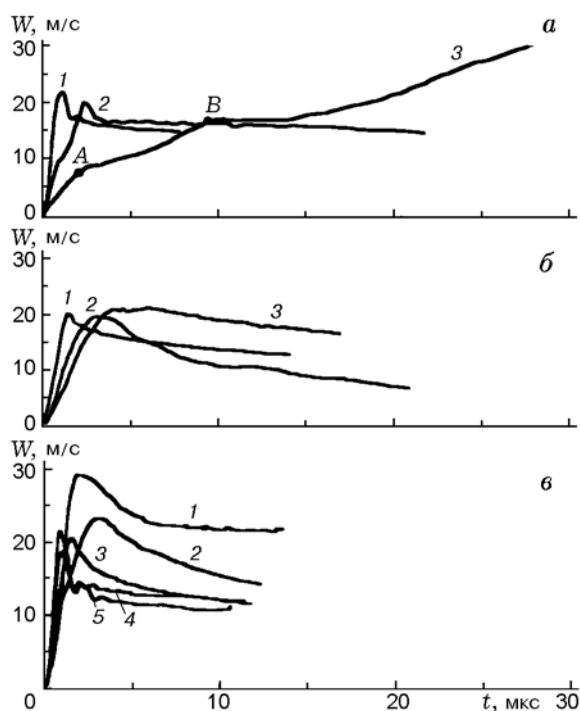


Рис. 1. Профили скорости свободной поверхности ZrO_2 -керамики:

а: 1 — тип I, $\Delta = 5$ мм, $W_0 = 25,6$ м/с, 2 — тип I, $\Delta = 10$ мм, $W_0 = 30,4$ м/с, 3 — тип I, $\Delta = 20$ мм, $W_0 = 51,8$ м/с, точки A, B — амплитуды первой и второй волн сжатия соответственно;

б: 1 — тип II, $\Delta = 5$ мм, $W_0 = 27,8$ м/с, 2 — тип II, $\Delta = 10$ мм, $W_0 = 25,1$ м/с, 3 — тип II, $\Delta = 20$ мм, $W_0 = 26,6$ м/с;

в: 1 — тип III, $\Delta = 10$ мм, $W_0 = 25,7$ м/с, 2 — тип IV, $\Delta = 10$ мм, $W_0 = 33,0$ м/с, 3 — тип III, $\Delta = 5$ мм, $W_0 = 21,2$ м/с, 4 — тип III, $\Delta = 5$ мм, $W_0 = 19,8$ м/с, 5 — тип III, $\Delta = 5$ мм, $W_0 = 18,0$ м/с

и откольную прочность $\sigma_p = 0,5\rho_0c_0(\Delta W + \delta W)$, где c_0 — объемная скорость звука, D — скорость упругой волны, W_y — скорость свободной поверхности при выходе упругой волны, $\Delta W = W_1 - W_2$ — разница скоростей в первом максимуме и первом минимуме на зависимости $W(t)$,

$$\delta W = \left(\frac{\delta}{c_0} + \frac{\delta}{c_l} \right) \frac{|\dot{W}_1 \dot{W}_2|}{|\dot{W}_1 + \dot{W}_2|}$$

— поправка, учитывающая влияние упруго-пластического поведения материала на изменение во времени скорости свободной поверхности [10], δ — толщина откольного слоя, W_1 , W_2 — градиенты скорости свободной поверхности образца в падающей волне разрежения и во фронте откольного импульса. В качестве оценки сверху для величины откольной прочности

использовали значения максимальных растягивающих напряжений, вычисленные с использованием выражения

$$\sigma_0 = \rho_{об} c_{об} \frac{W_0}{1 + (\rho_{об} c_{об}) / \rho_{Al} c_{Al}},$$

где $\rho_{об}$, ρ_{Al} — плотности образца и ударника; $c_{об}$, c_{Al} — скорости звука в образце и ударнике. Скорость деформации материала образца оценивали из соотношений $\dot{\epsilon}_1 = W_0 / 2\Delta_{Al}$ или $\dot{\epsilon}_2 = \dot{W}_1 / 2c_1$, где Δ_{Al} — толщина ударника из алюминия. С использованием этих величин и измеренной после опыта толщины откола δ оценивали удельную (на единицу поверхности) работу отрыва материала, или энергию разрушения: $\lambda = 2\sigma_0^2 \delta / BE$, где $B = 2(1 - \nu) / (1 + \nu)(1 - \nu)$, E — модуль Юнга. В табл. 2 приведены результаты оценок этих характеристик образцов исследуемых керамик.

На рис. 2 представлены фотографии микршлифов продольного сечения образцов керамик различного типа, которое отражает факт появления магистральной трещины.

Анализ профилей $W(t)$ и данных о структуре продольного сечения образцов позволил установить ряд общих закономерностей и выявить некоторые особенности поведения образцов при динамическом нагружении. Так, например, откольный импульс, возникающий при разрушении, и его реверберация по толщине откольной пластины наиболее надежно регистрируются при минимальных толщинах исследуемых образцов ($\Delta \approx 5$ мм, см. рис. 1) с минимальным размером крупной фракции (≈ 1 мм). Это связано с проявлением масштабного эффекта энергетической природы при разрушении, в частности с локализацией области откольного разрушения в более узкой зоне для образцов меньшего масштаба [11]. Зона откольного разрушения образцов керамики тех же типов, но большей толщины (10 и 20 мм) или той же толщины, но с большим размером крупной фракции (≈ 2 мм) более развита и шероховата, а профили $W(t)$ имеют больший завал фронтов (см. рис. 1), нивелирующий информацию о реверберации откольного импульса по толщине откольной пластины, что затрудняет их использование для оценки величины растягивающих напряжений при отколе σ_p .

Для образцов керамики толщиной 5 мм также наблюдаются некоторые особенности. Наиболее подробно их удалось проследить при исследовании откольного разрушения образцов

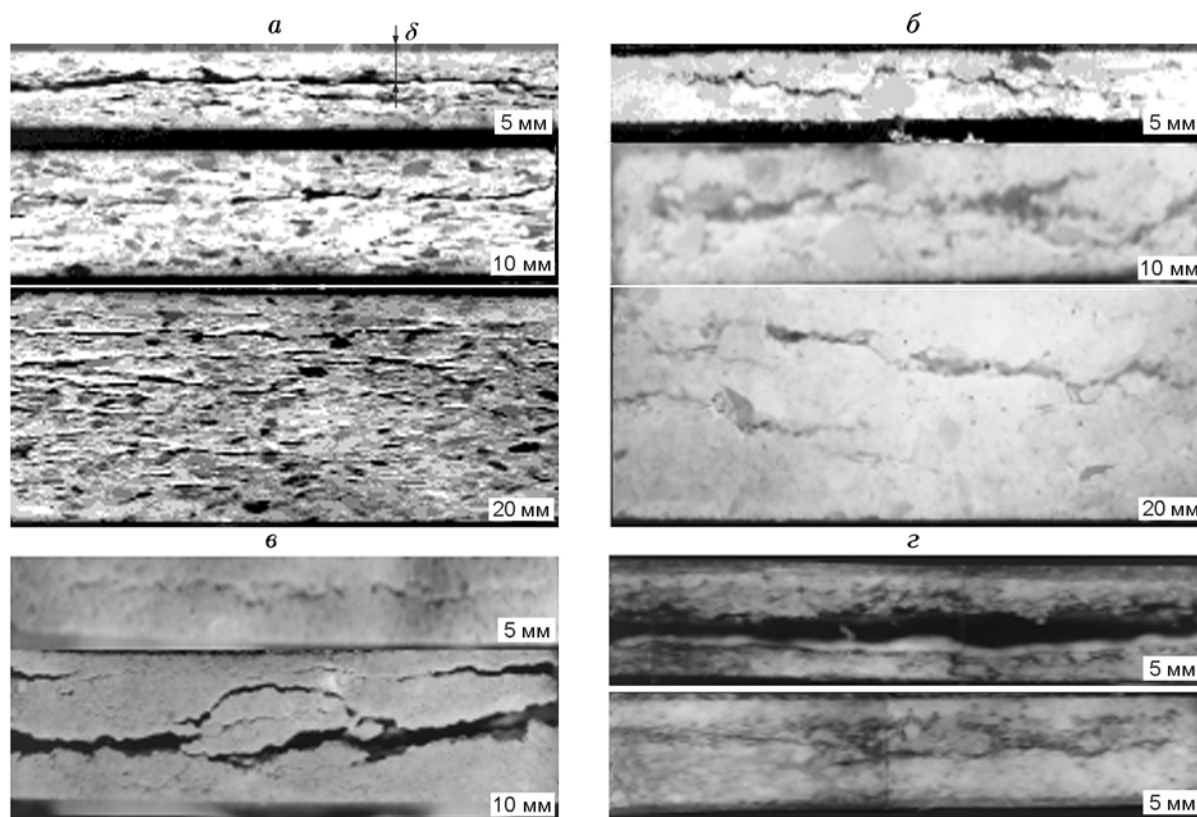


Рис. 2. Фотографии микрошлифов продольного сечения некоторых образцов:

a — керамика I типа, $\Delta = 5$ мм, $W_0 = 14,0$ м/с, $\Delta = 10$ мм, $W_0 = 10,0$ м/с, $\Delta = 20$ мм, $W_0 = 10,0$ м/с;
б — керамика II типа, $\Delta = 5$ мм, $W_0 = 10,6$ м/с, $\Delta = 10$ мм, $W_0 = 15,0$ м/с, $\Delta = 20$ мм, $W_0 = 25,7$ м/с;
в — керамика III и IV типов с $\Delta = 5$ мм, $W_0 = 17,5$ м/с и $\Delta = 10$ мм, $W_0 = 24,6$ м/с соответственно, *г* — керамика III типа, верхний снимок — $\Delta = 5$ мм, $W_0 = 18,0$ м/с, нижний снимок — $\Delta = 5$ мм, $W_0 = 21,2$ м/с,
 δ — толщина откольного слоя

керамики III типа (см. рис. 1, *в*). Так, при близких скоростях ударника ($W_0 \approx \text{const}$) в повторяемых опытах наблюдаются различия профилей $W(t)$: в ряде случаев на них отсутствует откольный импульс. Результаты металлографического анализа продольного сечения образцов после нагружения однозначно свидетельствуют, что в этих случаях разброс шероховатостей откольных поверхностей достаточно большой (см. рис. 2, *г*). Откольный импульс и его реверберация отчетливо наблюдаются там, где шероховатость откольных поверхностей минимальна (рис. 1, *в*, профиль 5 и рис. 2, *г*, верхний снимок) и наоборот (рис. 1, *в*, профиль 3 и рис. 2, *г*, нижний снимок). Наблюдаемые отличия в поведении образцов при близких скоростях ударников в повторяемых опытах свидетельствуют об индивидуальных свойствах отдельных образцов керамики, связанных, по-видимому, с их фактическим фрак-

ционным составом и пористостью. Индивидуальные свойства отдельных образцов обуславливают заметный разброс значений откольной прочности керамики. Для образцов I, II и IV типов это примерно близкие величины: $\sigma_p \approx 5 \div 30$ МПа и $\sigma_0 \approx 30 \div 80$ МПа. Для более мелкодисперсной керамики III типа эти значения несколько выше: $\sigma_p \approx 20 \div 70$ МПа и $\sigma_0 \approx 40 \div 120$ МПа, что не противоречит общепринятым представлениям [12].

Из вида профилей $W(t)$ свободной поверхности образцов толщиной 20 мм I и II типов (см. рис. 1, *а, б*), отличающихся исходной пористостью, следует принципиальное различие их поведения при динамическом нагружении одинаковой интенсивности. Так, профили $W(t)$ образцов толщиной 20 мм керамики II типа с пористостью 17% качественно не отличаются от профилей образцов этой керамики толщиной 5 и 10 мм. Анализ продольного сечения образ-

Таблица 3

W_0 , м/с	D_A , км/с	u_A , м/с	p_A , МПа	σ_q^A , МПа	D_B , км/с	u_B , м/с	p_B , МПа	σ_q^B , МПа
8,2	3,3	0,6	9,7	6,7	1,8	2,5	21,6	15,0
10,4	3,3	0,6	9,7	6,7	1,8	1,8	15,6	10,8
24,8	3,3	2,6	42,1	29,2	1,8	4,1	35,4	24,5
51,8	3,3	4,5	72,8	50,5	1,8	8,6	74,3	51,5

цов II типа толщиной 20 мм после нагружения свидетельствует об их откольном разрушении, так же как и образцов толщиной 5 и 10 мм (см. рис. 2, б). Аналогичное поведение при ударно-волновом деформировании и разрушении наблюдали для образцов диоксидциркониевого бетона толщиной 5, 10 и 20 мм и пористостью $\approx 17\%$ [5]. Для образцов I типа толщиной 20 мм с повышенной пористостью (22%) на профилях $W(t)$ отчетливо наблюдается трехволновая конфигурация волны сжатия, которая устойчиво воспроизводится при скоростях ударника $W_0 = 10 \div 50$ м/с. Аналогичную сложную структуру ударной волны (УВ) с двумя упругими волнами и волной пластического сжатия наблюдали в пенополистироле [13] и спеченной меди [14] также при сравнительно невысоких скоростях ударников и достаточно больших толщинах исследуемых образцов. Значения массовых скоростей $u_{A,B} = W_{A,B}/2$ и давлений $p_A = \rho_0 D_A u_A$, $p_B = p_A + \rho_0 (D_B - u_A)(u_B - u_A)$, соответствующие параметрам первой (индекс A) и второй (B) волн сжатия при различных скоростях ударника W_0 , приведены в табл. 3. Там же даны значения волновых скоростей (D_A , D_B), рассчитанные по регистрируемому на одном измерительном канале временным интервалам между моментом соударения ударника с образцом (электроконтактный датчик) и моментом выхода первой или второй УВ на свободную поверхность образца (емкостной датчик). Кроме того, в таблице представлены расчетные значения динамических пределов текучести для первой (σ_q^A) и второй (σ_q^B) упругих волн.

Сравнение полученных данных с данными табл. 1 свидетельствует о том, что скорость первой УВ стремится к значению скорости распространения продольных ультразвуковых колебаний в керамике $c_l = 3,3$ км/с. Однако при скорости ударника $W_0 \approx 10$ м/с давление в первой УВ значительно меньше статического предела текучести при сжатии $\sigma_{сж} =$

$90 \div 140$ МПа. Скорость второй УВ стремится к значению скорости поперечных ультразвуковых колебаний $c_n = 2,0$ км/с. Давление во второй УВ также меньше статического предела текучести. При увеличении скорости ударника с 10 до 52 м/с амплитуды первой и второй УВ заметно возрастают, но величина σ_q также не превышает статического предела прочности. Возрастание σ_q может быть связано с увеличением скорости деформации материала с $5 \cdot 10^2$ до $2 \cdot 10^3$ с $^{-1}$. Согласно [13] наличие двух упругих волн сжатия означает одновременное существование двух пределов текучести, связанных с различными условиями сжатия — при сложном деформируемом состоянии (закрытие пор, сжатие каркаса) и одномерной деформации.

Как видно из рис. 2, а, б в разрушении образцов I и II типов толщиной 20 мм имеются принципиальные отличия. Характер разрушения керамики II типа близок к откольному, т. е. магистральная трещина формируется за счет роста и объединения микротрещин. Образцы керамики I типа с большей пористостью пронизаны серией трещин, идущих параллельно поверхностям образца, и в сильной мере раздроблены. По-видимому, это связано с реализацией в образцах волны дробления или разрушения [7, 15]. Действительно, поскольку работа по разрушению объекта совершается за счет запаса упругой энергии растяжения, то, по-видимому, можно предположить, что отражение распространяющегося вглубь образца импульса сжатия от поверхностей раздела в пористом гетерогенном материале (границы зерен диоксида циркония) может привести к появлению локальных волн разрежения, идущих от границ этих неоднородностей, а их интерференция — к образованию растягивающих напряжений и появлению трещин или дроблению материала в пористой керамике.

Полученные результаты по ударно-волновому деформированию и разрушению

образцов диоксидциркониевой керамики различной пористости и фракционного состава при нормальной температуре показали, что:

- существует некоторая критическая пористость — для данной керамики $\approx 20\%$, ниже которой керамика ведет себя как вязкопластическое тело, а выше — как упруго-вязкопластическое тело. Трехволновая конфигурация волны сжатия наблюдается в образцах с исходной пористостью $\geq 20\%$ и толщиной ≥ 20 мм. Эта особенность свидетельствует о проявлении демпфирующих свойств высокопористой керамикой;

- откольный импульс и его реверберация по толщине откольного слоя наиболее надежно регистрируются на тонких образцах керамики ($\Delta = 5$ мм) с размером крупной фракции ≤ 1 мм, что связано с проявлением масштабного эффекта энергетической природы и локализацией разрушения в узкой зоне;

- различие индивидуальных свойств исследуемых образцов обуславливает разброс их прочностных характеристик. В частности, откольная прочность керамик I, II, IV типов близка и составляет $10 \div 30$ МПа, а откольная прочность керамики III типа несколько больше: $20 \div 70$ МПа, что связано с ее мелкодисперсным составом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минеев В. Н., Боровкова Л. Б., Акопов Ф. А. и др. Внешняя ловушка из керамики и бетона на основе диоксида циркония // Атомная энергия. 1998. Т. 85, вып. 2. С. 119–125.
2. Bittermann D. Principles of application of mechanical design measures to control severe accident phenomena, applied to the melt retention concept of the EPR // OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability Karlsruhe Germany, 15–18 November 1999.
3. Акопов Ф. А., Акопян А. А., Барыкин Б. М. и др. Поведение диоксидциркониевой керамики в условиях работы внешней ловушки // Атомная энергия. 1999. Т. 87, вып. 1. С. 48–53.
4. Брагов А. М., Ломунов А. К., Минеев В. Н. и др. Исследование динамических свойств диоксидциркониевой керамики с помощью модифицированной методики Кольского // Прикладные проблемы прочности и пластичности. 1997. № 52 (ННГУ). С. 1–9.
5. Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др. Ударно-волновое деформирование и разрушение диоксидциркониевой керамики и бетона // Атомная энергия. 2000. Т. 88, вып. 2. С. 113–119.
6. Grady D. E. Shock wave compression of brittle solids // Mech. Mater. 1998. V. 29. P. 181–203.
7. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортгов В. Е. Исследование механических свойств материалов при ударно-волновом нагружении // Механика твердого тела. 1999. № 5. С. 173–188.
8. Мерзиевский Л. А. Моделирование динамического сжатия пористого Al_2O_3 // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 6. С. 105–111.
9. Минеев В. Н., Погорелов В. П., Иванов А. Г. и др. Установка для исследования поведения материалов и конструкций при динамических нагрузках // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 3. С. 129–133.
10. Степанов Г. В. Откольное разрушение металлов плоскими упругопластическими волнами // Проблемы прочности. 1976. № 8. С. 66–69.
11. Огородников В. А., Иванов А. Г., Лучинин В. И. и др. Масштабные эффекты при динамическом разрушении хрупких и вязких материалов // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 1. С. 108–114.
12. Клещевников О. А., Софронов В. Н., Иванова Г. Г. и др. Экспериментальная проверка критериев разрушения в опытах с медными образцами // Журн. теор. физики. 1977. Т. 47, № 8. С. 1791–1794.
13. Бодренко С. И., Крысанов Ю. А., Новиков С. А. Исследование распространения ударных волн в пенополистироле // Прикл. механика и техн. физика. 1979. № 6. С. 140–144.
14. Boade R. R. Compression of porous Copper by shock waves // J Appl. Phys. 1968. V. 39, № 12.
15. Куликов В. И. Скорость фронта разрушения и динамические напряжения в нем при взрыве в прочных средах // Докл. АН СССР. 1983. Т. 268, № 2. С. 332–336.

Поступила в редакцию 14/XI 2000 г.