

УДК 519.6

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВЯЗКОУПРУГОСТИ С ТРЕЩИНАМИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОПЫТОВ С ОБРАЗЦАМИ ВВ НА УСТАНОВКЕ СОСТАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ ГОПКИНСОНА

О. М. Величко

(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

Представлены однокомпонентная вязкоупругая модель среды с трещинами, сформулированная на основе работ американских авторов, и ее модификация в части расчета вязкой релаксации и кинетики роста трещин. Разработан приближенный вычислительный алгоритм, ускоряющий процесс подбора параметров модели для ВВ на основе октогена. Критерием подбора является приемлемое согласие результатов расчетов и экспериментов с образцами ВВ на установке составных стержней Гопкинсона из работы российских авторов. Численное моделирование процессов деформирования образцов ВВ проводится на основе расчетной модели, реализованной методом Годунова.

Ключевые слова: ВВ, деформирование и разрушение, вязкоупругая модель с трещинами, метод Годунова, численное моделирование.

Введение

Разработке реологических моделей поведения взрывчатых веществ (ВВ) при низкоскоростных нагрузках посвящено много исследований. В работе [1] представлена расчетная модель вязкоупругой среды с кинетикой развития трещин за счет сдвиговых напряжений, реализованная методом Годунова [2]. В основу расчетного алгоритма положены связанный метод решения разностных уравнений гидроупругости и решение задачи о распаде разрыва в гидроупругой среде. Деформирование и возможное разрушение материала при механических воздействиях описываются на основе вязкоупругой модели с трещинами [3], разработанной в Лос-Аламосской национальной лаборатории. Наряду с определяющими математическими соотношениями расчетная модель включает в себя материальные константы и параметры, подобранные для взрывчатого состава PBX-9501. Эта модель реализована в коммерческих компьютерных кодах ABAQUS [4], DYNA3D [5] под названием ViscoScram и применяется для моделирования низкоскоростных воздействий на твердые составные ВВ [6–8].

Серия работ российских авторов [9–15] посвящена исследованию реакции на механические воздействия взрывчатого состава на основе флегматизированного октогена. В работах [9, 10] приведены два откорректированных по сравнению с PBX-9501 набора параметров вязкоупругой модели с трещинами, которые использованы для описания результатов опытов [11, 12] по низкоскоростному нагружению цилиндрических образцов ВВ. В исследованиях [13, 14] по результатам расчетно-экспериментального анализа ударного нагружения полусферических оболочек определяются вязкоупругие параметры хаотически армированного композитного ВВ на основе октогена. В работе [15] приведены временные зависимости нагрузок, зафиксированные в экспериментах по динамическому сжатию цилиндрических образцов ВВ на основе октогена на установке составных стержней Гопкинсона (ССГ).

В данной работе сделана попытка откалибровать однокомпонентную вязкоупругую модель среды с трещинами по результатам шести экспериментов из [15]. Разработан приближенный вычислительный алгоритм, ускоряющий процесс подбора параметров модели. Критерием подбора является приемлемое согласие расчетов с экспериментальными данными. Численное моделирование процессов деформирования образцов ВВ проводится на основе расчетной модели [1].

Определяющие соотношения модели вязкоупругой среды с разрушением

Модель [3] использует реологию пяти параллельно соединенных элементов Максвелла. Наряду с моделью [3] рассмотрим вязкоупругую модель Максвелла с одним элементом. В цилиндрических координатах x, r, θ с осью симметрии Ox представим компоненты тензора напряжений τ_{ij} в виде выражения через гидродинамическую составляющую p и девиаторную часть s_{ij} :

$$\tau_{ij} = s_{ij} - p\delta_{ij}, \quad -p = \frac{1}{3} (\tau_{xx} + \tau_{rr} + \tau_{\theta\theta}), \quad i, j = x, r, \theta.$$

Сдвиговые напряжения s_{ij} описываются одним элементом Максвелла, состоящим из двух компонентов, моделирующих сопротивление сдвигу (модуль сдвига μ) и вязкость (время релаксации τ). Степень повреждения материала характеризуется текущим размером трещин c и характерным размером c^a , который является нормирующей эмпирической константой.

Скорость изменения составляющих полного девиатора напряжений определяется по формуле

$$\dot{s}_{ij} = \frac{2\mu\dot{e}_{ij} - \frac{s_{ij}}{\tau} - 3\left(\frac{c}{c^a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{c^a} s_{ij}}{1 + \left(\frac{c}{c^a}\right)^3}, \quad (1)$$

где \dot{e}_{ij} — девиатор тензора скоростей деформации.

Предполагается, что изначально трещины одинакового размера ctr_0 равномерно распределены по всему объему среды вне зависимости от направления. Рост трещин происходит по двум режимам, медленному и быстрому:

$$\dot{c} = \frac{dc}{dt} = \begin{cases} v_{\max} \frac{2}{m1} \left(\frac{K}{K_1}\right)^{m1}, & K \leq K_w; \\ v_{\max} \left[1 - \left(\frac{K_0}{K}\right)^2\right]^{m2}, & K > K_w. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь v_{\max} — максимальная скорость роста трещины; K_0 — трещиностойкость; $K = \sqrt{\pi c} \sigma_{eff}$, $\sigma_{eff} = \frac{1}{3} \sqrt{(s_{rr} - s_{xx})^2 + (s_{rr} - s_{\theta\theta})^2 + (s_{xx} - s_{\theta\theta})^2 + 6s_{xr}s_{xr}}$; $m1, m2$ — показатели степенного роста трещины для двух режимов; $K_1 = K_0 \sqrt{1 + \frac{2}{m1}} \left(1 + \frac{2}{m1}\right)^{1/m1}$; $K_w = K_0 \sqrt{1 + \frac{2}{m1}}$. Переход между медленным и быстрым режимами скорости роста трещин происходит при достижении величиной K порогового значения $K_w = \text{const}$. При $K = K_w$ и $m2 \neq 1$ скорость терпит разрыв.

Постановка опытов и анализ экспериментальных данных

Геометрия установки ССГ из работы [15] приведена на рис. 1. Испытуемый образец ВВ устанавливается между стержнями Гопкинсона. Нагружение осуществляется с помощью разгоняемого взрывом ударника. Датчики, накапливающие временную зависимость продольного напряжения, установлены в нагружающем и опорном стержнях на расстоянии 20 см от передних торцов. Радиус цилиндров $R_2 = 1$ см; линейные размеры конструкции: $X_1 = 20$ см; $X_2 = 120$ см; $X_3 = 121$ см; $X_4 = 221$ см. Импульс нагрузки, регистрируемый датчиком в нагружающем стержне, — *нагружающий* импульс — рассматривается в численных расчетах как заданная входная нагрузка. Импульс нагрузки, регистрируемый датчиком в опорном стержне, — *опорный* импульс — служит эталоном для сравнения с результатами расчетов.

На рис. 2, 3 приведены временные зависимости нагружающего и опорного импульсов напряжения в стержнях, зарегистрированные в шести экспериментах из [15]. Представленные результаты отличаются уровнем нагрузки, реализуемым в нагружающем стержне. Сравнение рис. 2, а и 2, б, а также

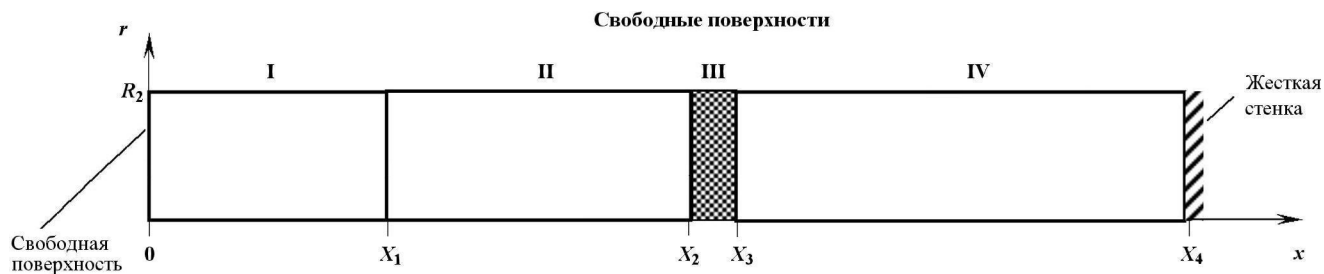


Рис. 1. Начальная геометрия опытов по методу ССГ: I — ударник; II — нагружающий стержень; III — исследуемое ВВ цилиндрической формы; IV — опорный стержень

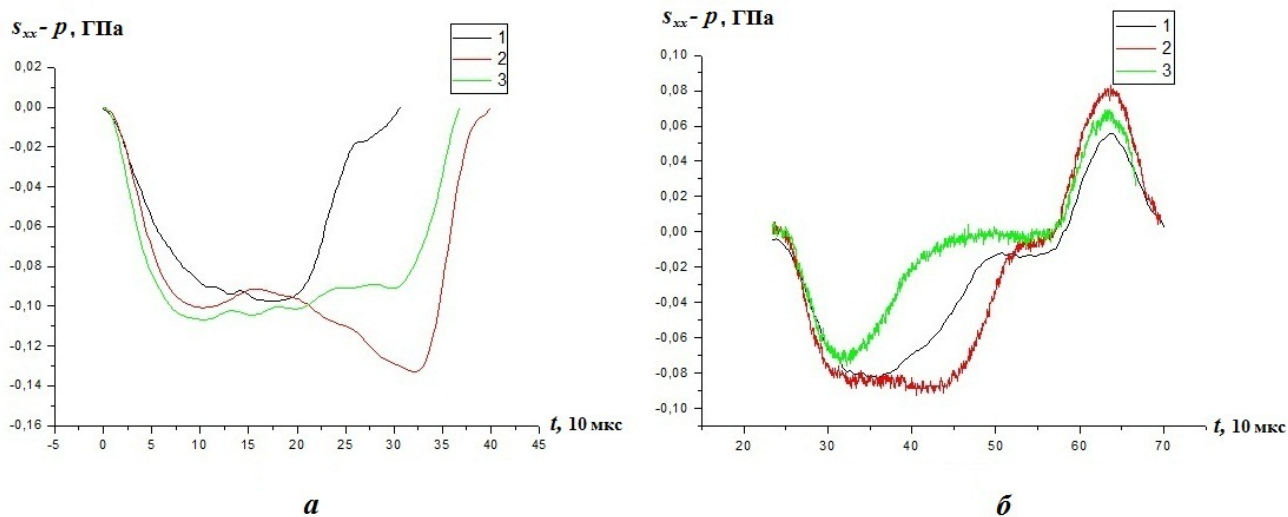


Рис. 2. Нагружающие (а) и опорные (б) импульсы в экспериментах: 1–3 —номера экспериментов

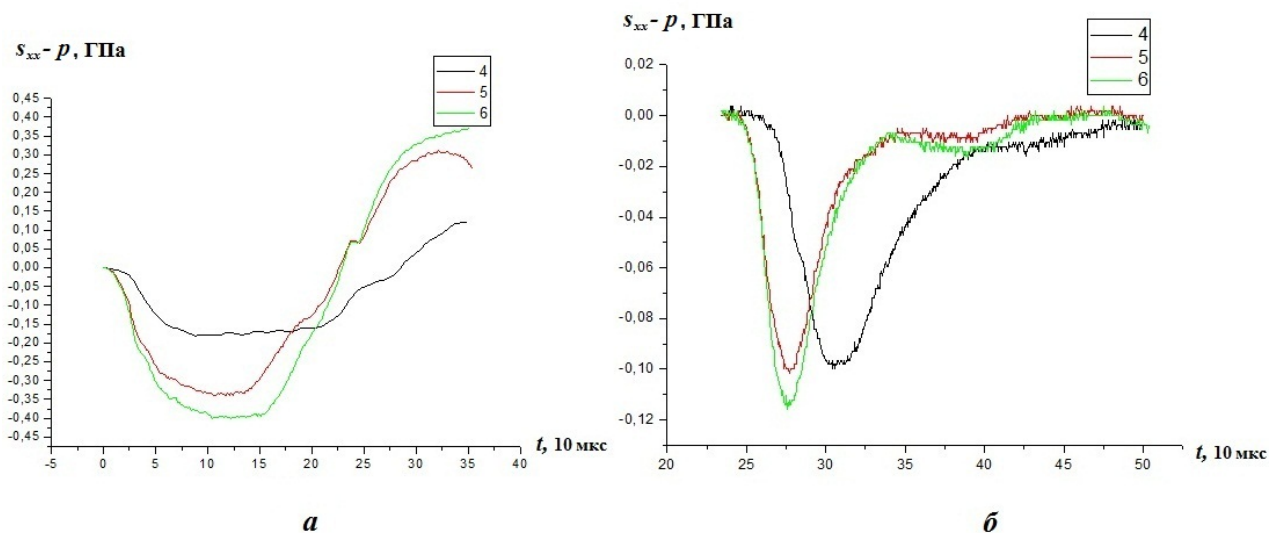


Рис. 3. Нагружающие (а) и опорные (б) импульсы в экспериментах: 4–6 —номера экспериментов

рис. 3, *a* и 3, *б* показывает, что во всех экспериментах амплитуда и длительность нагружающего импульса превышают амплитуду и длительность опорного импульса. Этот экспериментальный факт можно описать, применив механизмы модели вязкоупругой среды с трещинами в материале ВВ.

Амплитуда приходящего на образец ВВ нагружающего импульса уменьшается под действием вязкой релаксации девiatorа тензора напряжений. При этом величина K растет под действием приложенной нагрузки, достигает порогового значения K_w , осуществляется переход во второй, быстрый режим роста трещин, размер трещин достигает некоторого критического значения и образец теряет прочность еще до момента окончания действия нагружающего импульса.

Отметим, что в эксперименте 2 разрушение образца наступает позже, чем в эксперименте 1, несмотря на то, что амплитуда нагружающего импульса в эксперименте 2 заведомо больше. Можно предположить, что временный спад нагрузки в эксперименте 2 (в интервале времени $t = 9 \div 16$,* см. рис. 2, *a*) замедляет рост трещин и разрушение образца наступает позже. Либо есть другое объяснение: в эксперименте 2 исследовался более прочный образец, т. е. начальный размер трещин ctr_0 в нем был меньше.

Расчетное моделирование экспериментов с опубликованными наборами констант модели

Рассмотрим результаты расчетного моделирования экспериментов из работы [15] с использованием параметров модели, приведенных в работах [3, 9, 10].

Все расчетные результаты, приведенные в настоящей работе, получены на сетке 4 из работы [1], для которой линейный размер ячейки в образце ВВ составляет 0,01 см. Для описания нагружающего и опорного стержней, выполненных из титанового сплава, используются трехчленное уравнение состояния с параметрами $\rho_0 = 4,39 \text{ г/см}^3$, $c_0 = 4,9 \text{ км/с}$, $\gamma = 2,2$, $n = 3$ и модель идеальной упругопластической среды с параметрами $G_0 = 43,12 \text{ ГПа}$, $Y_0 = 1,0 \text{ ГПа}$. Для описания шаровой составляющей тензора напряжений ВВ используется трехчленное уравнение состояния с параметрами $\rho_0 = 1,895 \text{ г/см}^3$, $c_0 = 2,52 \text{ км/с}$, $\gamma = 2,0$, $n = 7,003$. Для описания реакции ВВ на механические нагрузки применяется релаксационная модель вязкоупругости с трещинами. В расчетах учитывается приведенная в [15] зависимость упругих свойств материала ВВ от скорости деформации вида $E = 850 \log \tilde{\varepsilon} + 85 \log \tilde{\varepsilon}^2 + E_0$, $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon/\varepsilon_0$, где E [ГПа] — модуль Юнга, $E_0 = 7,49 \text{ ГПа}$; $\varepsilon [\text{с}^{-1}]$ — интенсивность скорости деформации, $\varepsilon_0 = 1 \text{ с}^{-1}$.

Ударник исключен из расчетов. Вместо контактной границы на переднем торце нагружающего стержня задается временная зависимость нагружающего импульса, зарегистрированная в моделируемом эксперименте. На опорном стержне установлен датчик, накапливающий расчетную временную зависимость продольного напряжения. Цель расчетов — получить наилучшее согласие с импульсами нагрузки на опорном стержне, зарегистрированными в шести экспериментах из работы [15].

На рис. 4, *a, б* приведено сравнение опорного импульса, полученного соответственно в экспериментах 1 и 3 [15], и результатов численных расчетов с параметрами модели из работ [3, 9, 10] (табл. 1—3). Из рисунков видно, что расчеты с предложенными наборами параметров описывают экспериментальные кривые с заметной погрешностью.

В расчете эксперимента 1 вязкая релаксация [3] недостаточно уменьшает импульс нагрузки. Параметры разрушения [3, 10] обеспечивают слишком низкую скорость роста трещин в первом (медленном) режиме, в результате чего поздно реализуется переход во второй (быстрый) режим. Параметры [9], наоборот, обеспечивают слишком высокую скорость роста трещин в первом режиме, и образец теряет прочность уже к моменту $t = 30$ (см. рис. 4, *a*).

В расчете эксперимента 3 вязкая релаксация [3, 10] недостаточно уменьшает импульс нагрузки, а параметры разрушения [3, 10] не обеспечивают перехода во второй (быстрый) режим. Эксперимент 3 не удается рассчитать до конца с параметрами [9], поскольку трещины в материале ВВ увеличиваются до двух-трех характерных размеров c^a уже к моменту $t = 26$, что приводит к разрушению материала ВВ (см. рис. 4, *б*).

*Здесь и далее в тексте время измеряется в 10 мкс.

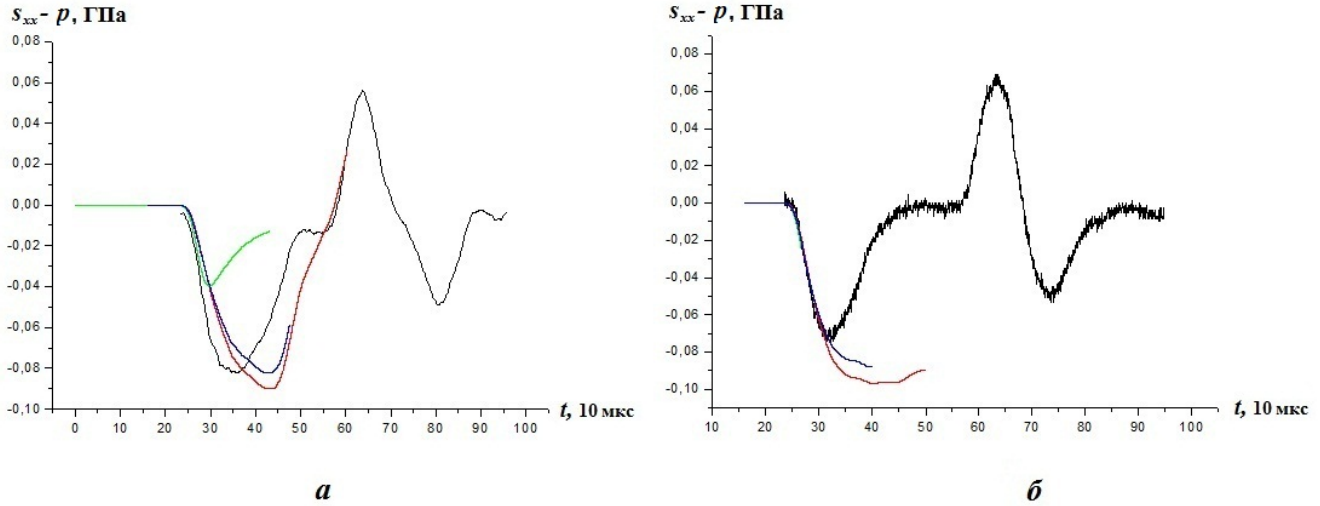


Рис. 4. Сравнение временных зависимостей напряжений на опорном стержне в экспериментах 1 (а) и 3 (б) с расчетными: — — расчет с параметрами [3]; — — расчет с параметрами [9]; — — расчет с параметрами [10]; — — эксперимент

Таблица 1

Параметры вязкоупругой модели ВВ с трещинами для американского взрывчатого состава РВХ-9501, опубликованные в работе [3]

k	1	2	3	4	5
$G^{(k)}$, ГПа $\sum G^k = 3,23$, ГПа	0,944	0,1739	0,5212	0,9085	0,6875
$1/\tau^{(k)}$, $(10 \text{ мкс})^{-1}$	0	$7,32 \cdot 10^{-2}$	$7,32 \cdot 10^{-1}$	7,32	20,0
c^a , см	v_{\max} , км/с	$m1$	K_0 , ГПа $\cdot \text{см}^{1/2}$	$m2$	ctr_0 , см
0,1	0,3	10	$5,0 \cdot 10^{-3}$	1	0,0003

Таблица 2

Параметры вязкоупругой модели среды с трещинами для ВВ на основе октогена, опубликованные в работе [9]

k	1	2	3	4	5
$G^{(k)}$, ГПа $\sum G^k = 5,4$, ГПа	1,5757	0,29027	0,8700	1,5165	1,1476
$1/\tau^{(k)}$, $(10 \text{ мкс})^{-1}$	0	$7,32 \cdot 10^{-2}$	$7,32 \cdot 10^{-1}$	7,32	20,0
c^a , см	v_{\max} , км/с	$m1$	K_0 , ГПа $\cdot \text{см}^{1/2}$	$m2$	ctr_0 , см
0,7	0,3	0,8	$5,0 \cdot 10^{-3}$	1	0,0003

Таблица 3

Параметры вязкоупругой модели среды с трещинами для ВВ на основе октогена, опубликованные в работе [10]

k	1	2	3	4	5
$G^{(k)}$, ГПа $\sum G^k = 3,03$, ГПа	0,344	0,071	0,421	1,1	1,1
$1/\tau^{(k)}$, $(10 \text{ мкс})^{-1}$	0	$7,32 \cdot 10^{-3}$	$7,32 \cdot 10^{-2}$	$7,32 \cdot 10^{-1}$	2,0
c^a , см	v_{\max} , км/с	$m1$	K_0 , ГПа $\cdot \text{см}^{1/2}$	$m2$	ctr_0 , см
0,3	0,3	6	$4,5 \cdot 10^{-3}$	1	0,0003

Приближенная модель вязкоупругой среды с трещинами

Рассмотрим одноэлементную модель вязкоупругой среды с трещинами. Построим приближенный вычислительный алгоритм, отражающий основные заложенные в модель механизмы, для оценки на качественном уровне влияния отдельных параметров модели на результаты расчетов.

Скорость изменения составляющих девиатора тензора напряжений в ВВ (формула (1)) определяется действием нескольких физических процессов.

Во-первых, это упругое деформирование: $\dot{s}_{ij} = \frac{2\mu\dot{e}_{ij}}{1 + \left(\frac{c}{ca}\right)^3} = \frac{2E\dot{e}_{ij}}{2(1+\nu)\left[1 + \left(\frac{c}{ca}\right)^3\right]}$. Соответ-

ственно $\dot{\sigma}_{eff} = \frac{\dot{\sigma}^e}{1 + \left(\frac{c}{ca}\right)^3}$, где σ^e — девиатор тензора напряжений в ВВ, рассчитанный в упругой постановке; $\dot{s}_{ij}^e = 2\mu\dot{e}_{ij}$ без учета вязкой релаксации ($1/\tau = 0$) и трещин ($c = ctr_0 = 0$).

На рис. 5 сравниваются расчетные зависимости напряжений на опорном стержне, полученные в упругой постановке ($\mu = 3,03$ ГПа), и кривые опорного импульса, зарегистрированные в трех экспериментах [15]. Отметим, что начальный этап нагружения хорошо описывается разрабатываемой моделью в чисто упругой постановке без вязкости и разрушения.

Датчик, накапливающий временные зависимости искомых величин в расчете, задан в точке на оси симметрии образца, для которой можно приближенно принять $s_{rr}^e = -\frac{1}{2}s_{xx}^e$; $s_{xr}^e = 0$; $s_{\vartheta\vartheta}^e = -\frac{1}{2}s_{xx}^e$; $\sigma_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}}s_{xx}^e$.

Второй процесс, который определяет скорость изменения составляющих девиатора тензора напряжений, — вязкая релаксация: $\dot{s}_{ij} = -\frac{s_{ij}}{\tau\left[1 + \left(\frac{c}{ca}\right)^3\right]}$. Соответственно $\dot{\sigma}_{eff} = -\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{\sigma_{eff}}{\tau\left[1 + \left(\frac{c}{ca}\right)^3\right]}$.

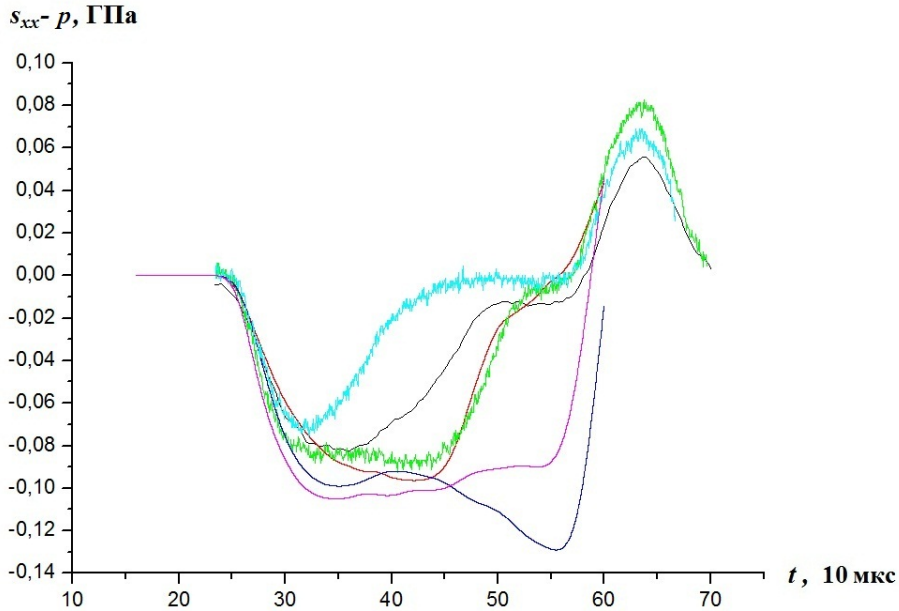


Рис. 5. Временные зависимости напряжений: — — эксперимент 1; — — расчет эксперимента 1; — — эксперимент 2; — — расчет эксперимента 2; — — эксперимент 3; — — расчет эксперимента 3

Третий процесс — разрушение материала: $\dot{s}_{ij} = \frac{-3 \left(\frac{c}{c^a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{c^a} s_{ij}}{1 + \left(\frac{c}{c^a}\right)^3}$. Соответственно $\dot{\sigma}_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times$
 $\times \frac{-3 \left(\frac{c}{c^a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{c^a} \sigma_{eff}}{1 + \left(\frac{c}{c^a}\right)^3}$.

В сумме получаем обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\dot{\sigma}_{eff} = \frac{\dot{\sigma}^e}{1 + \left(\frac{c}{c^a}\right)^3} - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sigma_{eff}}{\tau \left[1 + \left(\frac{c}{c^a}\right)^3\right]} - \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{3 \left(\frac{c}{c^a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{c^a} \sigma_{eff}}{1 + \left(\frac{c}{c^a}\right)^3}.$$

Добавляем уравнение для расчета размера трещин c в первом (медленном) режиме:

$$\dot{c} = \frac{dc}{dt} = v_{\max} \frac{2}{m1} \left(\frac{\sqrt{\pi c} \sigma_{eff}}{K_1} \right)^{m1}. \quad (3)$$

Конструируем явный по времени алгоритм для приближенного вычисления величины K . Разбиваем временной интервал $t = 20 \div 50$ на отрезки $\Delta t = 1$. Расчетную зависимость σ^e , полученную без учета вязкой релаксации ($1/\tau = 0$) и трещин ($c = ctr_0 = 0$), задаем в виде таблицы кусочно-постоянных значений на моменты времени $t = 20, 21, \dots, 50$:

$$t_0 = 20; \quad c(t_0) = ctr_0; \quad \sigma_{eff}(t_0) = 0; \quad t^n = t^{n-1} + \Delta t;$$

$$\sigma_{eff}^n = \sigma_{eff}^{n-1} + \frac{(\sigma^e)^{n+1} - (\sigma^e)^n}{1 + \left(\frac{c^n}{c^a}\right)^3} - \frac{\Delta t}{\sqrt{2}} \frac{\sigma_{eff}^{n-1}}{\tau \left[1 + \left(\frac{c^n}{c^a}\right)^3\right]} - \frac{\Delta t}{\sqrt{2}} \frac{3 \left(\frac{c^n}{c^a}\right)^2 \frac{c^n - c^{n-1}}{c^a} \sigma_{eff}^{n-1}}{1 + \left(\frac{c^n}{c^a}\right)^3}. \quad (4)$$

Для постоянного значения σ_{eff} на интервале времени Δt уравнение (3) имеет решение

$$(c^n)^{1-m1/2} = \frac{v_{\max}}{K_1^{m1}} \left(1 - \frac{m1}{2}\right) \sqrt{\pi} \left(\sigma_{eff}^n\right)^{m1} t + (ctr^{n-1})^{1-m1/2}, \quad (5)$$

$$m1 > 2, \quad K^n = \sqrt{\pi c^n} \sigma_{eff}^n, \quad K^n \leq K_w.$$

Скорость роста трещин в первом (медленном) режиме определяет время достижения величиной K порогового значения K_w . Переходы во второй (быстрый) режим для трех экспериментов определяются как точки пересечения прямой $K = K_w$ и трех расчетных кривых $K(t)$. После перехода размер трещин достигает некоторого критического значения, как правило, составляющего примерно 0,6–0,7 характерного размера c^a , и образец теряет прочность.

Расчеты по приближенной модели (4), (5) позволяют очень быстро оценивать время перехода из первого режима во второй для различных наборов параметров трещинообразования ($m1, K_0, v_{\max}, c^a$) и сравнивать его с экспериментальным. Это удобнее и существенно быстрее, чем проведение полномасштабных двумерных гидроупругодинамических расчетов с включенными блоками вязкости и разрушения.

Выбор параметра релаксации

В работе [13] приведены результаты экспериментального исследования динамического деформирования полусферических оболочек, выполненных из хаотически армированного композитного ВВ, а в работе [14] на основе этих данных определены параметры изотропной вязкоупругой модели

поведения материала ВВ с одноэкспонентным и трехэкспонентным ядрами релаксации. Значения величины, обратной времени τ релаксации касательных напряжений, для исследуемого материала составили в первом случае $\tau^{-1} = 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, во втором — $\tau_1^{-1} = 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, $\tau_2^{-1} = 0,198 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, $\tau_3^{-1} = 0,099 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Однако анализ экспериментальных данных показывает, что материал ВВ ведет себя по-разному при сжатии и растяжении. При сжатии ВВ деформируется в большей степени вязкоупруго, подобно другим пластическим материалам, например металлам. При растяжении ВВ ведет себя подобно хрупкому материалу и действие вязкости как бы прекращается. Поэтому наряду с подходом [14] к расчету τ^{-1} рассмотрим подход [16], развитый применительно к металлам. Если пренебречь температурными зависимостями, то получим и применим в расчетах упрощенный вариант интерполяционной формулы зависимости времени релаксации от интенсивности касательных напряжений

$$\tau^{-1} = \tau_0^{-1} \left(\frac{\sigma_{eff}}{\rho_0 c_0^2} q \right)^{m3}, \quad (6)$$

где $\rho_0 = 1,895 \text{ г/см}^3$; $\tau_0^{-1} = 10^4 \text{ с}^{-1}$; $c_0 = 2,52 \text{ км/с}$; $q = 150$; $m3 = 13$.

На рис. 6 приведены расчетные импульсы напряжения на опорном стержне, полученные с использованием полномасштабной модели [3] и однокомпонентной модели с константами разрушения [3] (табл. 4) для двух экспериментов. Результаты для двух подходов хорошо согласуются, так что замена на более простую для анализа однокомпонентную модель вполне допустима.

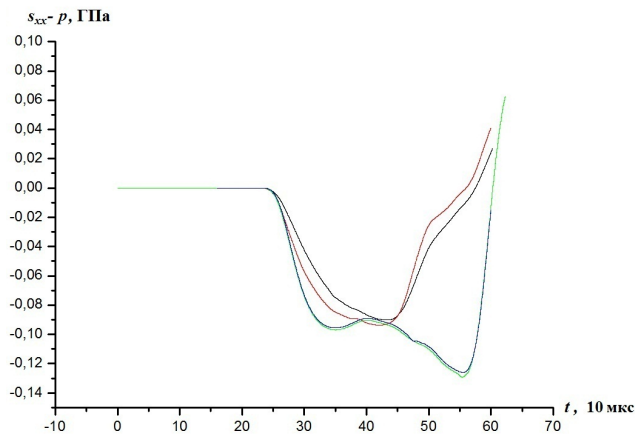


Рис. 6. Временные зависимости напряжений: — — расчет эксперимента 1 по модели [3]; — — расчет эксперимента 1 по однокомпонентной модели; — — расчет эксперимента 2 по модели [3]; — — расчет эксперимента 2 по однокомпонентной модели

Таблица 4

Параметры однокомпонентной модели вязкоупругой среды с трещинами на основе констант разрушения [3]

Параметр	Значение
E_0 , ГПа	7,49
$1/\tau^{(k)}$, $(10 \text{ мкс})^{-1}$	Формула (6)
c^a , см	0,1
v_{\max} , км/с	0,3
$m1$	10
K_0 , ГПа·см ^{1/2}	$5,0 \cdot 10^{-3}$
$m2$	1
ctr_0 , см	0,0003

Результаты расчетов по приближенной модели

На рис. 7, а–в приведены временные зависимости величины K , полученные на базе параметров соответственно из табл. 4–6 с применением приближенного алгоритма (4), (5) и однокомпонентной модели, в которой рост трещин осуществляется только в первом (медленном) режиме. На этих рисунках показаны также пороговые значения перехода K_w соответственно из работ [3], [9] и [10].

Из сравнения кривых на рис. 7, а видно, что, во-первых, результаты приближенной и однокомпонентной моделей качественно согласуются между собой, во-вторых, пороговое значение перехода K_w в несколько раз превышает максимальные расчетные значения величины K . Переход во второй (быстрый) режим, обеспечивающий разрушение материала образца, невозможен, что уже было продемонстрировано на рис. 4.

Таблица 5

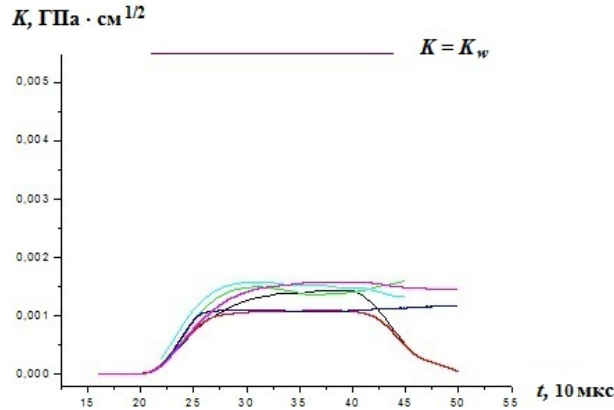
Параметры однокомпонентной модели вязкоупругой среды с трещинами на основе констант разрушения [9]

Параметр	Значение
E_0 , ГПа	7,49
$1/\tau^{(k)}$, $(10 \text{ мкс})^{-1}$	Формула (6)
c^a , см	0,7
v_{\max} , км/с	0,3
$m1$	0,8
K_0 , ГПа·см ^{1/2}	$5,0 \cdot 10^{-3}$
$m2$	1
ctr_0 , см	0,0003

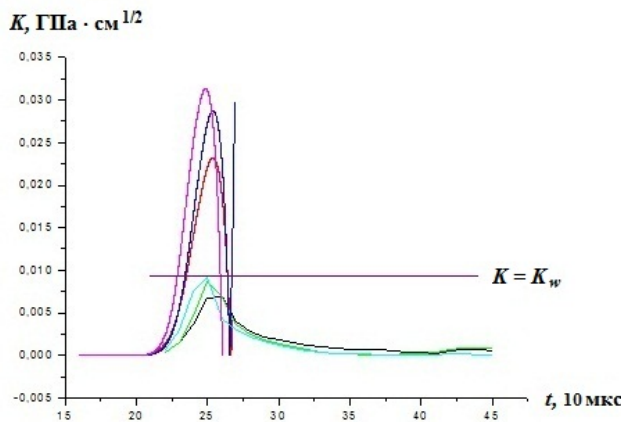
Таблица 6

Параметры однокомпонентной модели вязкоупругой среды с трещинами на основе констант разрушения [10]

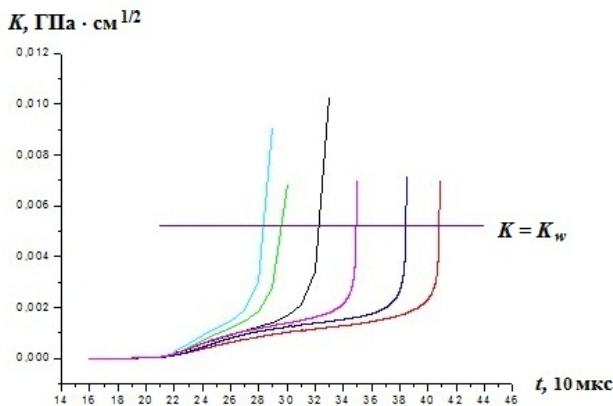
Параметр	Значение
E_0 , ГПа	7,49
$1/\tau^{(k)}$, $(10 \text{ мкс})^{-1}$	Формула (6)
c^a , см	0,3
v_{\max} , км/с	0,3
$m1$	6
K_0 , ГПа·см ^{1/2}	$4,5 \cdot 10^{-3}$
$m2$	1
ctr_0 , см	0,0003



а



б



в

Рис. 7. Временные зависимости величины K , полученные на базе параметров: а — из табл. 4 (K_w из работы [3]); б — из табл. 5 (K_w из [9]); в — из табл. 6 (K_w из [10]); — — приближенный расчет эксперимента 1; — — расчет эксперимента 1 по однокомпонентной модели; — — приближенный расчет эксперимента 2; — — расчет эксперимента 2 по однокомпонентной модели; — — приближенный расчет эксперимента 3; — — расчет эксперимента 3 по однокомпонентной модели

Из рис. 7, б видно, что уже к моменту времени $t = 24$ происходит переход во второй (быстрый) режим, после чего материал достаточно быстро теряет прочность (см. рис. 4, а, б).

Результаты приближенных расчетов на рис. 7, в показывают принципиальную возможность перехода во второй режим для каждого из трех экспериментов в подходящее время. Однако в расчетах по однокомпонентной модели, во-первых, переход осу-

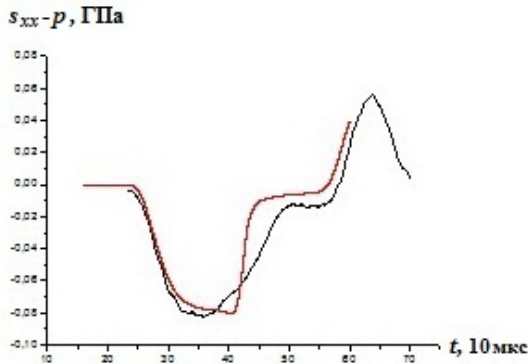
ществляется с заметной задержкой, во-вторых, скорость во втором режиме не достаточно для быстрого достижения заданного характерного размера c^a (см. рис. 4, *a*, *б*).

В табл. 7 приведены скорректированные по результатам серии приближенных расчетов параметры для однокомпонентной модели вязкоупругой среды с трещинами, а на рис. 8, *a*–*д* — результаты расчетов экспериментов с номерами 1, 3–6 с этими параметрами.

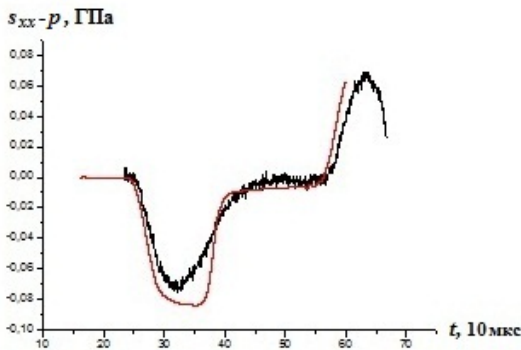
Таблица 7

Скорректированные параметры однокомпонентной модели вязкоупругой среды с трещинами

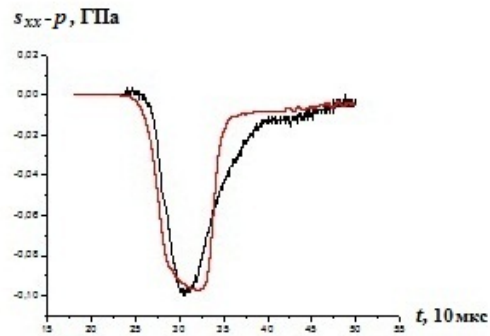
Параметр	Значение
E_0 , ГПа	7,49
$1/\tau^{(k)}$, $(10 \text{ мкс})^{-1}$	Формула (6)
c^a , см	0,1
v_{\max} , км/с	0,3
m_1	6
K_0 , ГПа·см ^{1/2}	$3,8 \cdot 10^{-3}$
m_2	1
ctr_0 , см	0,0003



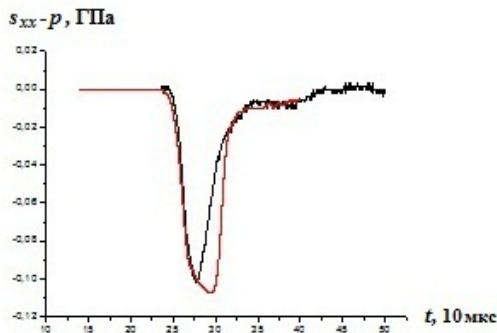
a



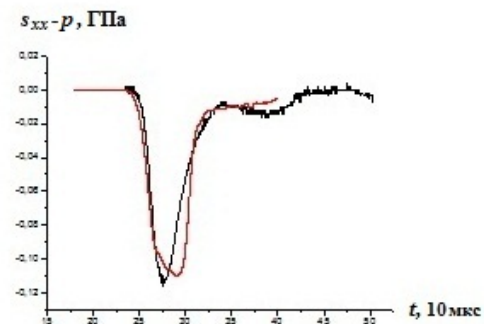
б



в



г



д

Рис. 8. Временные зависимости напряжений на опорном стержне для экспериментов 1 (*a*), 3 (*б*), 4 (*в*), 5 (*г*) и 6 (*д*): — — эксперимент; — — расчет

На рис. 9, *a, б* приведены результаты расчетов экспериментов 1 и 3 по скорректированной однокомпонентной модели (см. табл. 7), полученные с постоянным параметром релаксации и переменным параметром релаксации, рассчитанным по формуле (6).

Проведенные расчеты с различными наборами параметров показывают, что постоянное значение релаксационного параметра не позволяет достаточно точно описать максимумы нагрузок на опорном стержне для всех шести экспериментов одновременно, что, в частности, иллюстрируют рис. 9, *a, б*.

Значение релаксационного параметра $\tau^{-1} = 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ определено на основании метода [14], в котором не учитывается накопление поврежденности материала оболочки из ВВ как несущественное в экспериментах [13]. В эксперименте 1 реализуются самые малые нагрузки, разрушение незначительно, поэтому он описывается точнее с постоянным $\tau^{-1} = 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, чем все остальные эксперименты.

На рис. 10 временная зависимость параметра релаксации, полученная для эксперимента 3 по формуле (6), сравнивается с постоянным значением параметра релаксации $\tau^{-1} = 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$.

На рис. 11 приведено сравнение результатов расчетов эксперимента 1 по изотропным одноэкспонентной и трехэкспонентной моделям из [14]. Кривые, полученные с использованием двух подходов, практически совпадают и визуалью на рис. 11 неразличимы.

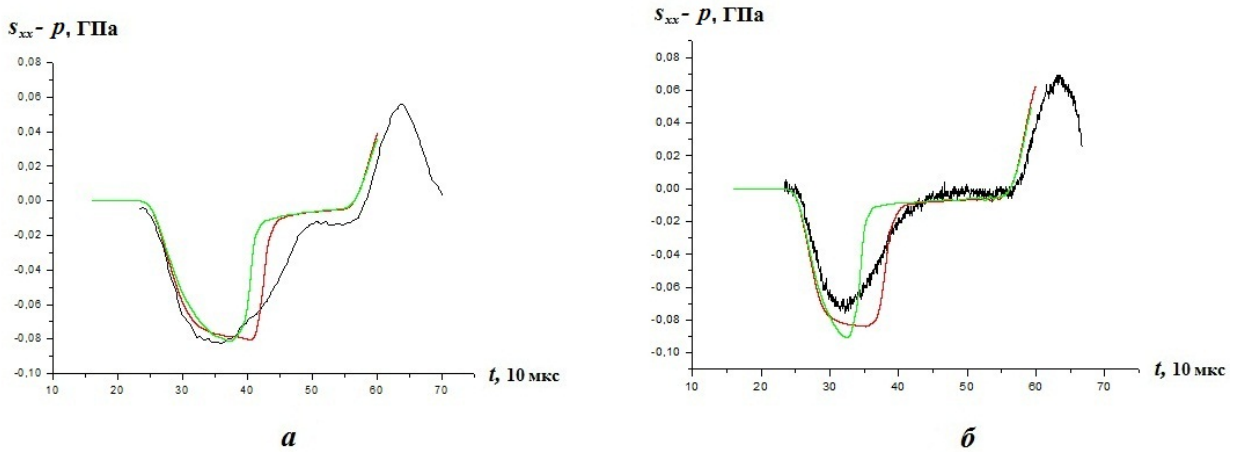


Рис. 9. Временные зависимости напряжений на опорном стержне: *a* — для эксперимента 1; *б* — для эксперимента 3; — — эксперимент; — — расчет с переменным τ^{-1} (формула (6)); — — расчет с постоянным $\tau^{-1} = 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$

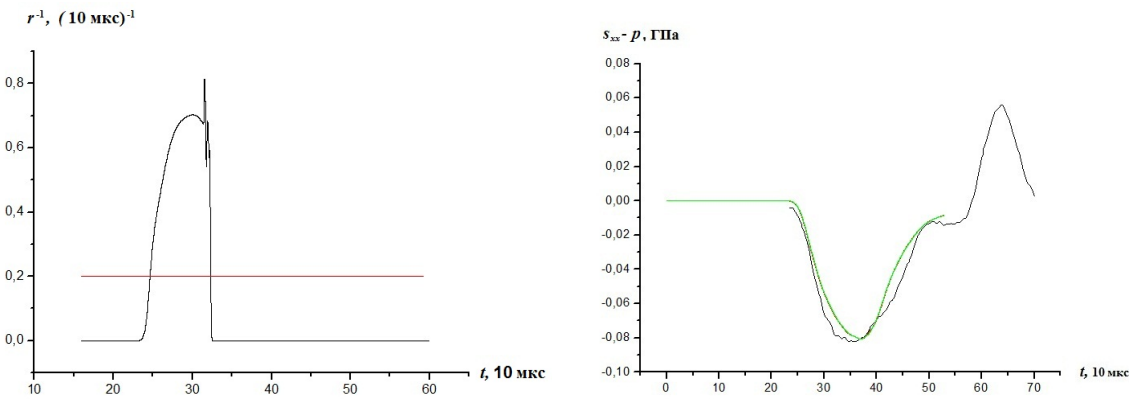


Рис. 10. Временные зависимости релаксационного параметра на опорном стержне для эксперимента 3: — — по формуле (6); — — $\tau^{-1} = 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$

Рис. 11. Временные зависимости напряжений на опорном стержне, полученные для эксперимента 1 по изотропным моделям из [14]: — — одноэкспонентная модель; — — трехэкспонентная модель; — — эксперимент

Расчеты эксперимента 2

Эксперимент 2 [15] имеет особенность: несмотря на большую, чем в эксперименте 1, амплитуду нагрузки, образец разрушается позже. На рис. 12 приведено сравнение опорного импульса, зарегистрированного в эксперименте 2, и результатов численных расчетов с параметрами модели из работ [3, 9, 10] и табл. 7. В расчете с параметрами [3] переход во второй (быстрый) режим не реализуется вообще. С параметрами [9, 10] эксперимент 2 не удастся рассчитать до конца. В расчете с параметрами из табл. 7 переход в быстрый режим реализуется слишком рано.

На рис. 13 приведены результаты расчетов с параметрами из табл. 7. Проиллюстрированы влияние начальной степени трещиноватости материала ВВ на реализуемые в среде напряжения и преимущество использования зависимости (6) для расчета τ^{-1} .

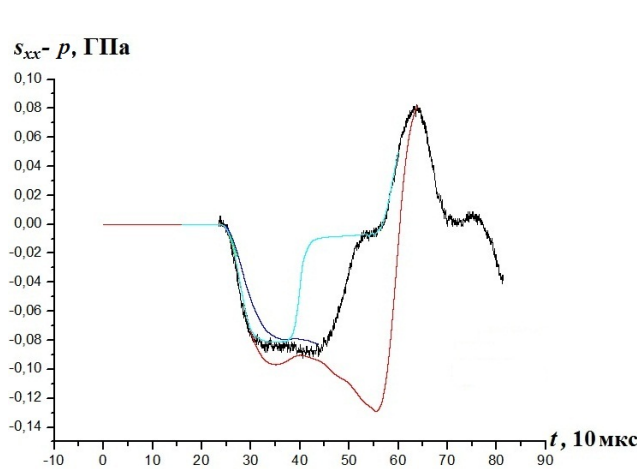


Рис. 12. Временные зависимости напряжений на опорном стержне для эксперимента 2: — — эксперимент; — — расчет с параметрами [3]; — — расчет с параметрами [9]; — — расчет с параметрами [10]; — — расчет с параметрами из табл. 7

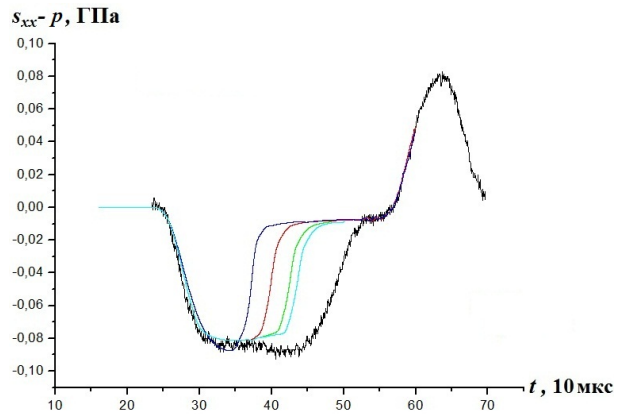


Рис. 13. Временные зависимости напряжений на опорном стержне для эксперимента 2: — — эксперимент; — — расчет с $ctr_0 = 3,0 \cdot 10^{-3}$ см и τ^{-1} по формуле (6); — — расчет с $ctr_0 = 2,7 \cdot 10^{-3}$ см и τ^{-1} по формуле (6); — — расчет с $ctr_0 = 2,7 \cdot 10^{-3}$ см и постоянным $\tau^{-1} = 2 \cdot 10^4$ с $^{-1}$; — — расчет с $ctr_0 = 2,6 \cdot 10^{-3}$ см и τ^{-1} по формуле (6)

Модификация модели вязкоупругой среды с разрушением

На основании данных, полученных в эксперименте 2, модифицируем закон роста трещин в разрабатываемой модели. На рис. 14 приведены расчетные временные зависимости σ^e , полученные в чисто упругой постановке без вязкости и разрушения для трех экспериментов. Из взаимного расположения трех кривых и прямой $\sigma^e = \text{const}$ можно сделать вывод, что в расчетах первоначальный переход во второй режим происходит последовательно: сначала в третьем, потом во втором и, наконец, в первом эксперименте.

Рассмотрим временной интервал $\Delta t = 28 \div 40$, на котором расчетное значение σ^e в эксперименте 2 убывает (см. рис. 14) и образец сохраняет прочность вплоть до $t = 44$ (см. рис. 2, б). Оценим среднюю скорость роста трещин \dot{c}_{cp} на этом интервале, исходя из предположения, что величина K не возрастает и, как следствие, не возрастает скорость роста трещин:

$$K(t=28) \geq K(t=40); \quad \sqrt{\pi c(t=28)\sigma^e(t=28)} \geq \sqrt{\pi(c(t=28) + \dot{c}_{cp}\Delta t)(\sigma^e)_{cp}};$$

$$c(t=28) \frac{\left(\frac{\sigma^e(t=28)}{\sigma_{cp}^e}\right)^2 - 1}{\Delta t} \geq \dot{c}_{cp}.$$

На основании предварительной серии расчетов по приближенной модели было выявлено следующее:

- для показателей степенного роста $m1 \geq 6$ и разумной вариации значений K_0 относительно исходного значения $0,005 \text{ ГПа} \cdot \text{см}^{1/2}$ значение $c(t = 28)$ в первом (медленном) режиме остается на начальном уровне $ctr_0 \sim 3 \cdot 10^{-4} \text{ см}$;
- K_0 и $m1$ являются ключевыми параметрами в первом (медленном) режиме, а v_{\max} и c^a практически не влияют на результат;
- K_0 , v_{\max} и c^a играют существенную роль во втором (быстром) режиме.

С учетом вышесказанного $\dot{c}_{\text{ср}} \leq 0,0000012 \text{ км/с}$. Такое значение скорости в первом (медленном) режиме можно получить только при достаточно больших значениях $m1$, а чтобы скорость во втором (быстром) режиме некоторое время оставалась на прежнем уровне, можно ввести показатель степенного роста $m2$ для второй ветки (см. формулу (2)). Для больших значений $m1$ пороговое значение перехода K_w в несколько раз превышает максимальные расчетные значения величины K (см. рис. 7, а). Для обеспечения перехода во второй (быстрый) режим вынужденно разрываем связь K_0 и K_w и вводим независимую величину порогового значения K_{wmy} . Закон роста трещин (2) трансформируется в следующий вид:

$$\dot{c} = \frac{dc}{dt} = \begin{cases} v_{\max} \left(\frac{K}{K_1} \right)^{m1}, & K \leq K_{wmy}; \\ v_{\max} \left[1 - \left(\frac{K_{wmy}}{\sqrt{1 + \frac{2}{m1} K}} \right)^2 \right]^{m2}, & K > K_{wmy}, \end{cases} \quad (7)$$

где v_{\max} , $m1$, $m2$, K_0 , K_{wmy} — константы; K_1 имеет тот же смысл, что в формуле (2).

В табл. 8 приведены параметры для однокомпонентной модели вязкоупругой среды с модифицированным законом (7).

На рис. 15 приведены временные зависимости величины K , полученные на базе параметров из табл. 8 с применением приближенного алгоритма (4), (5) и однокомпонентной модели, в которой рост трещин осуществляется только в первом (медленном) режиме. Отметим, что такое взаимное расположение кривых вообще характерно для больших значений $m1$ (ср. с рис. 7, а).

На рис. 16, 17 приведены результаты расчетов с параметрами из табл. 8 для шести экспериментов [15], а на рис. 18 — сравнение результатов расчетов с параметрами из табл. 7, 8.

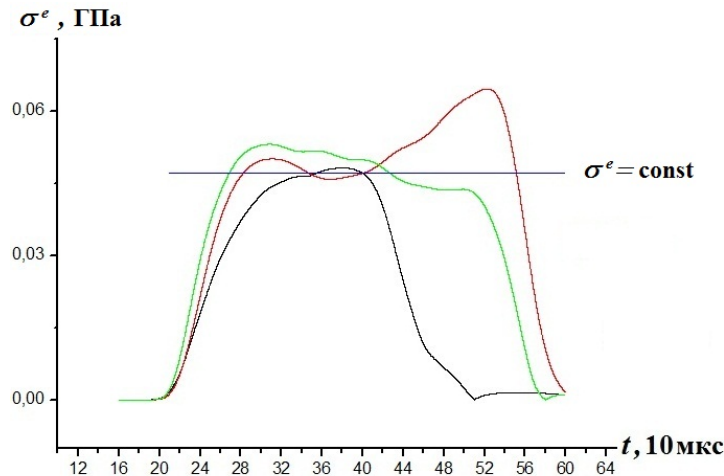


Рис. 14. Расчетные временные зависимости σ^e : — — для эксперимента 1; — — для эксперимента 2; — — для эксперимента 3

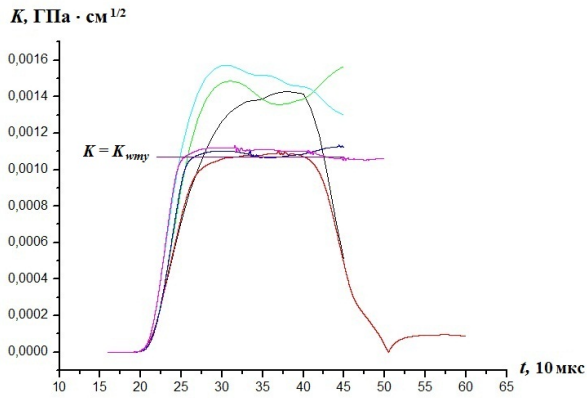


Таблица 8

Параметры однокомпонентной модели вязкоупругой среды с модификацией закона роста трещин

Параметр	Значение
E_0 , ГПа	7,49
$1/\tau^{(k)}$, $(10 \text{ мкс})^{-1}$	Формула (6)
c^a , см	0,1
v_{\max} , км/с	0,1
$m1$	14
K_0 , ГПа·см ^{1/2}	$7,0 \cdot 10^{-3}$
$K_{\text{крит}}$, ГПа·см ^{1/2}	$1,07 \cdot 10^{-3}$
$m2$	6
ctr_0 , см	0,0003

Рис. 15. Временные зависимости величины K , полученные на базе параметров из табл. 8: — — приближенный расчет эксперимента 1; — — расчет эксперимента 1 по однокомпонентной модели; — — приближенный расчет эксперимента 2; — — расчет эксперимента 2 по однокомпонентной модели; — — приближенный расчет эксперимента 3; — — расчет эксперимента 3 по однокомпонентной модели

В расчете эксперимента 1 с параметрами из табл. 8 при переходе во второй режим размер трещин возрастает несущественно (см. рис. 18, а справа), импульс нагрузки на опорном стержне почти повторяет импульс нагрузки на нагружающем стержне. В расчете эксперимента 1 с параметрами из табл. 7 трещины достигают характерного размера 0,1 см примерно на момент времени $t = 36$ (см. рис. 18, а справа), потеря прочности образца происходит сразу после $t = 40$ (см. рис. 18, а слева).

В расчете эксперимента 2 с параметрами из табл. 8 размер трещин растет медленнее, чем в расчете с параметрами из табл. 7 (см. рис. 18, б справа), соответственно и импульс нагрузки на опорном стержне ближе к экспериментальному (см. рис. 18, б слева).

В расчетах эксперимента 3 для двух законов роста трещин (формула (2) и табл. 7, формула (7) и табл. 8) размер трещин растет приблизительно одинаково (см. рис. 18, в справа), соответственно и импульсы нагрузки на опорном стержне похожи (см. рис. 18, в слева). В расчете с параметрами из табл. 8 переход во второй (быстрый) режим происходит раньше и длится дольше, величина K достигает большего значения (рис. 19), но скорость роста трещин при одинаковых значениях K меньше, чем в расчете с параметрами из табл. 7 (рис. 20). Падение величины K до значений 0,005—0,004 ГПа·см^{1/2}, связанное с потерей прочности образца ВВ, происходит практически одновременно в двух расчетах, и далее значение держится примерно на одном уровне. Для $K = 0,45$ ГПа·см^{1/2} значения скорости роста трещин для двух законов роста одинаковы (см. рис. 20).

Заключение

В работе представлена однокомпонентная вязкоупругая модель среды с трещинами, сформулированная на основании работы [3]. Параметры подобраны так, чтобы расчеты вполне приемлемо описывали результаты экспериментов с номерами 1, 3—6 на установке ССГ из работы [15]. Предложена модификация расчета вязкой релаксации и закона роста трещин. Для модифицированного варианта модели параметры подобраны так, чтобы расчеты вполне приемлемо описывали результаты всех шести экспериментов из работы [15].

Численное моделирование процессов деформирования материала ВВ проводится методом Годунова [1].

Работа выполнена в тесном сотрудничестве с А. А. Кабаевым и С. А. Кабаевым. Автор выражает им глубокую благодарность за активную поддержку проводимых исследований, выдвинутые идеи и научные консультации.

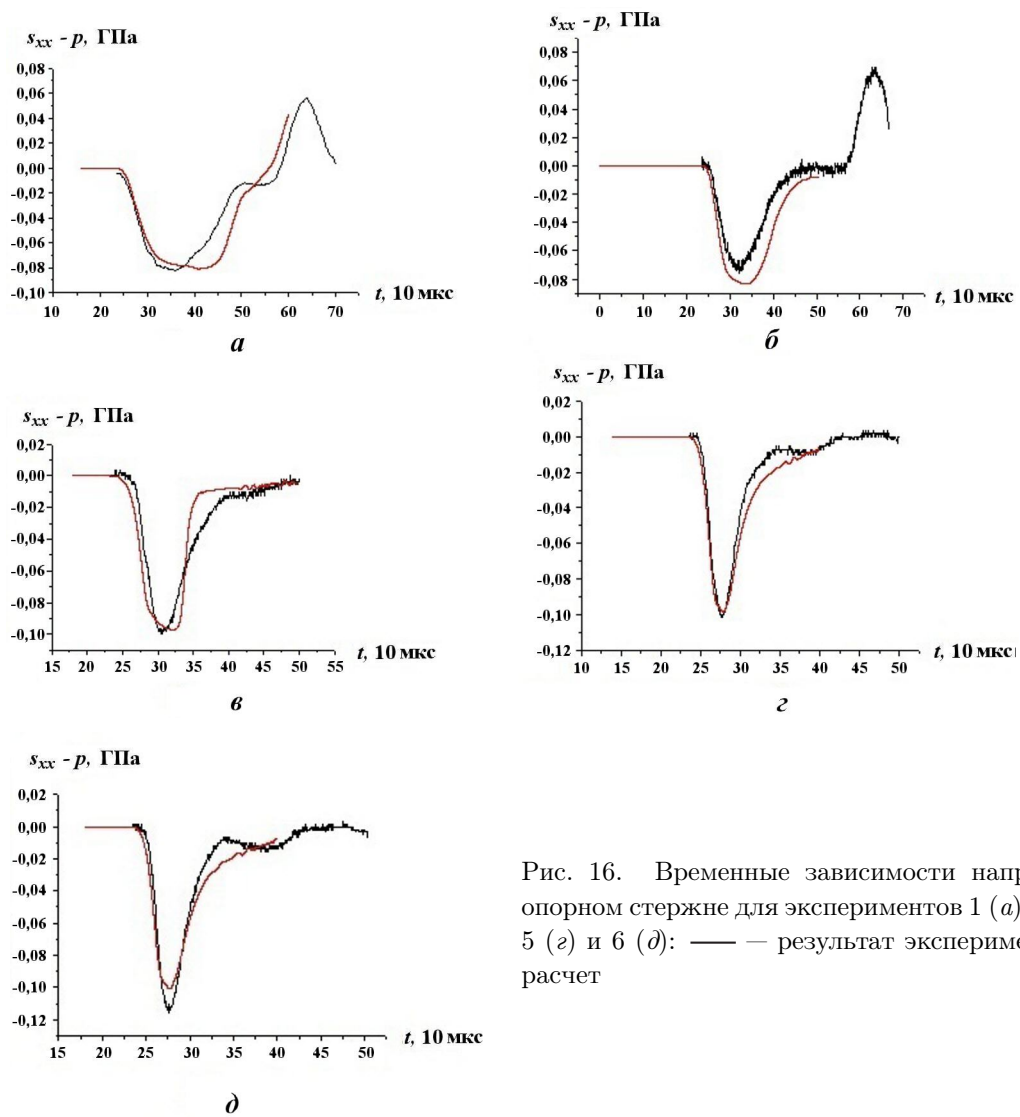


Рис. 16. Временные зависимости напряжений на опорном стержне для экспериментов 1 (*a*), 3 (*б*), 4 (*в*), 5 (*г*) и 6 (*д*): — — результат эксперимента; — — расчет

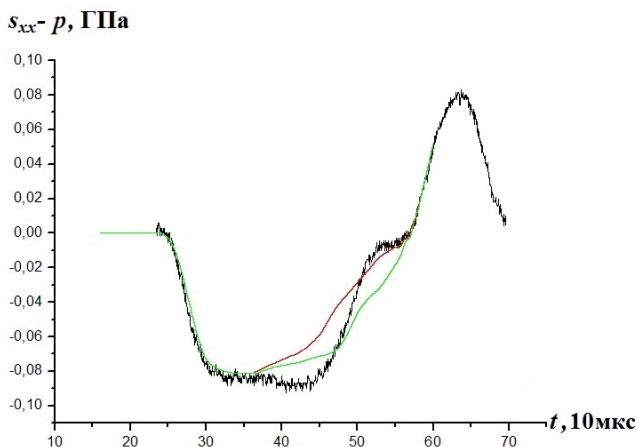
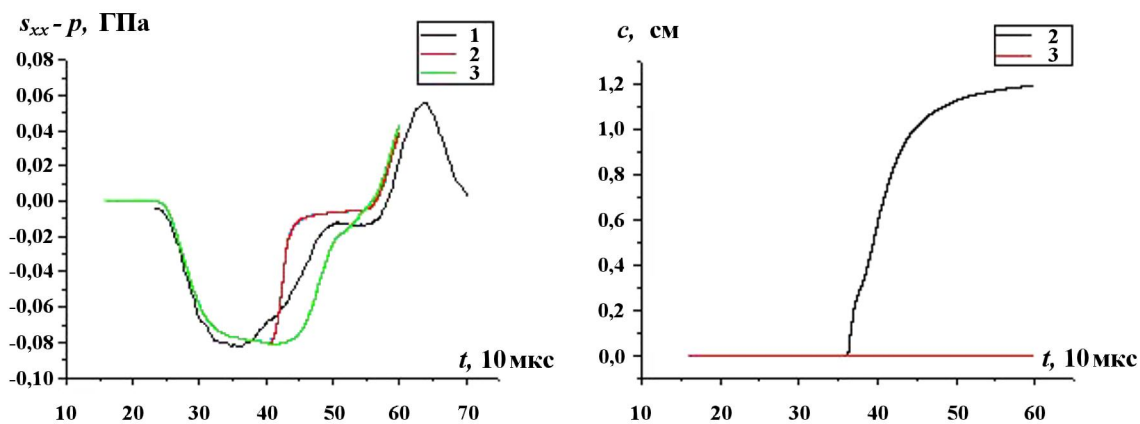
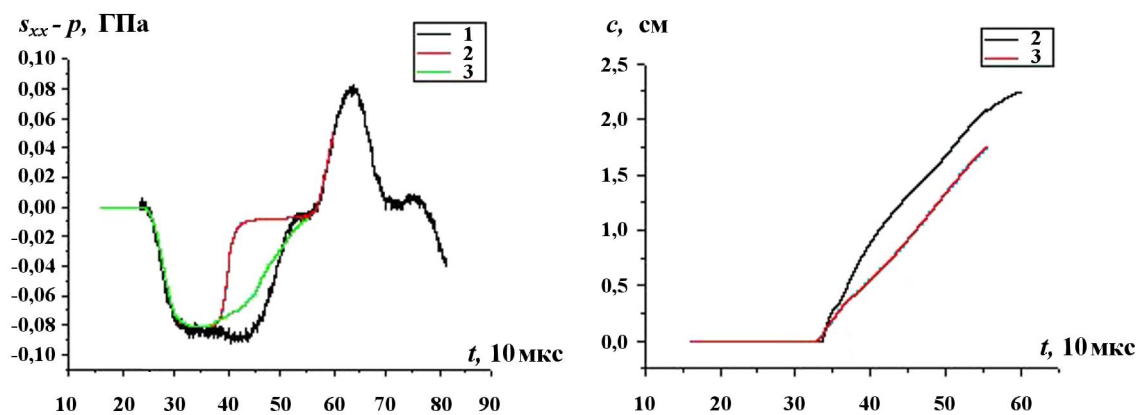


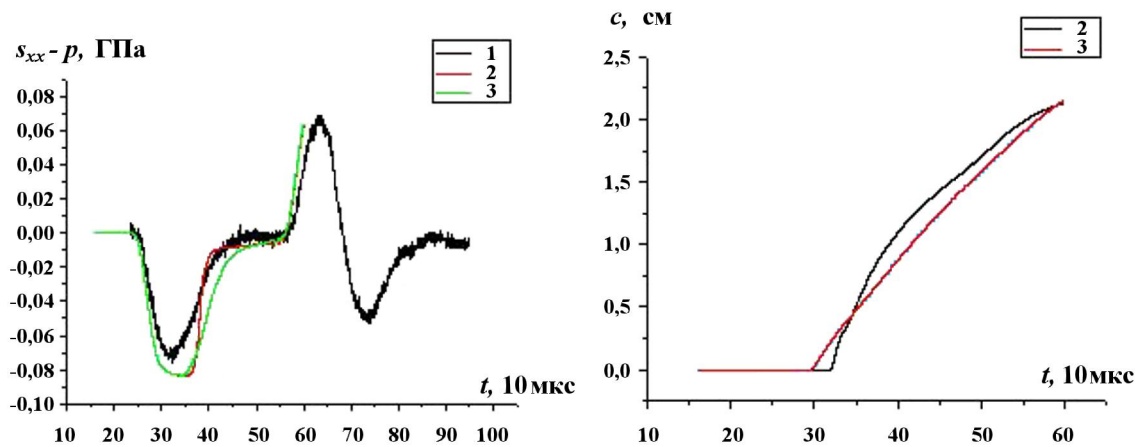
Рис. 17. Временные зависимости напряжений на опорном стержне для эксперимента 2: — — эксперимент; — — расчет с $ctr_0 = 3,0 \cdot 10^{-3}$ см и τ^{-1} по формуле (6); — — расчет с $ctr_0 = 2,9 \cdot 10^{-3}$ см и τ^{-1} по формуле (6)



a



б



в

Рис. 18. Временные зависимости напряжений на опорном стержне (слева) и размера трещин (справа) для экспериментов 1 (a), 2 (б) и 3 (в): 1 — результат эксперимента; 2 — расчет с параметрами из табл. 7; 3 — расчет с параметрами из табл. 8

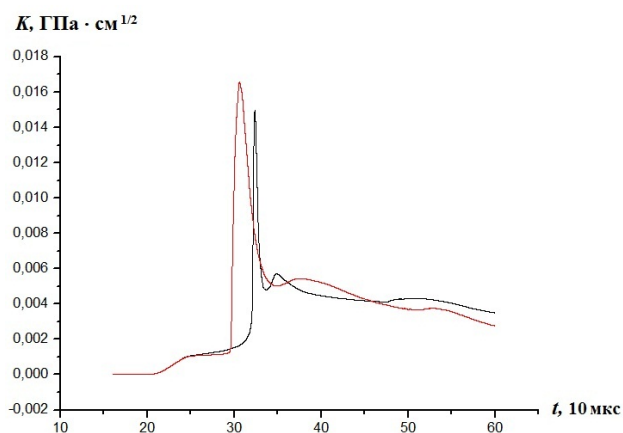


Рис. 19. Временные зависимости величины K в расчете эксперимента 3: — — на базе параметров из табл. 7; — — на базе параметров из табл. 8

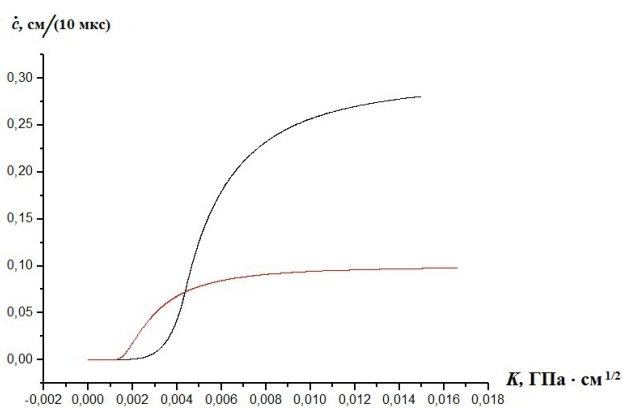


Рис. 20. Зависимости скорости роста трещин от интенсивности напряжения в расчете эксперимента 3: — — по формуле (2) и табл. 7; — — по формуле (7) и табл. 8

Список литературы

1. Величко О. М. Расчетное моделирование деформирования энергетических материалов в условиях низкоскоростного нагружения методом С. К. Годунова // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 1. С. 42–52.
Velichko O. M. Raschetnoe modelirovaniye deformirovaniya energeticheskikh materialov v usloviyakh nizkoskorostnogo nagruzheniya metodom S. K. Godunova // Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovaniye fizicheskikh protsessov. 2018. Vyp. 1. S. 42–52.
2. Годунов С. К. Элементы механики сплошных сред. М.: Наука, 1978.
Godunov S. K. Elementy mekhaniki sploshnykh sred. M.: Nauka, 1978.
3. Clancy S. P., Jonson J. N., Burkett M. W. Modelling the viscoelastic and brittle fracture response of a high-explosive in a Eulerian hydrocode // XI Int. Symp. on Detonation. Snowmass, Colorado, 1998. P. 3–10.
4. ABAQUS. Providence, RI: DS Simulia, 2007.
5. Whirley R. G., Engelmann B. E. DYNA3D — A Nonlinear, Explicit, Three-dimensional Finite Element Code for Solid and Structural Mechanics User Manual. LLNL, UCID-19592, Revision, 1993.
6. Dey T. N., Kamm J. R. Numerical modeling of shear band formation in PBX-9501 // XI Int. Symp. on Detonation. Snowmass, Colorado, 1998. P. 540–541.
7. Robert M. Hackett, Joel G. Bennett. An implicit finite element material model for energetic particulate composite materials // Int. J. Meth. Eng. 2000. No 49. P. 1191–1209.
8. Bennett J. G., Haberman K. S., Johnson J. N., Asay B. W., Henson B. F. A constitutive model for the non-shock ignition and mechanical response of high explosives // J. Meth. Phys. Solids. 1998. Vol. 46, No 12. P. 2303–2221.
9. Седов С. Ю., Величко О. М., Денисова О. В., Кривонос А. С., Вялых А. М. Расчеты на основе вязкоупругой модели критериев начала взрыва при низкоскоростном воздействии на взрывчатый состав на основе октогена // Межд. конф. "XV Харитоновские науч. чтения": сб. трудов. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. С. 246–253.
Sedov S. Yu., Velichko O. M., Denisova O. V., Krivonos A. S., Vyalykh A. M. Raschetny na osnove vyazkouprugoy modeli kriteriev nachala vzryva pri nizkoskorostnom vozdeystvii na vzryvchaty sostav na osnove oktogena // Mezhd. konf. "XV Kharitonovskie nauch. chteniya": sb. trudov. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 2013. S. 246–253.

10. *Седов С. Ю., Мицура М. Н.* Критерий начала взрыва при низкоскоростном воздействии на взрывчатые составы на основе октогена // Межд. конф. "XII Забобахинские науч. чтения": тез. докл. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2014. С. 116.
Sedov S. Yu., Mitsura M. N. Kriteriy nachala vzryva pri nizkoskorostnom vozdeystvii na vzryvchatye sostavy na osnove oktogena // Mezhd. konf. "XII Zababakhinskie nauch. chteniya": tez. dokl. Snezhinsk: RFYaTs-VNIITF, 2014. S. 116.
11. *Белов Г. В., Базаров Ю. Б., Дякин Е. П., Екимчев С. Н., Жиёмбетов А. К., Зималин В. С.* Влияние скорости удара на параметры взрыва образцов флегматизированного октогена // Межд. конф. "XI Харитоновские науч. чтения". Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: сб. трудов. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 51–55.
Belov G. V., Bazarov Yu. B., Dyakin E. P., Ekimchev S. N., Zhiembetov A. K., Zimalin V. S. Vliyanie skorosti udara na parametry vzryva obraztsov flegmatizirovannogo oktogena // Mezhd. konf. "XI Kharitonovskie nauch. chteniya". Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny: sb. trudov. Sarov: RFYaTs-VNIEEF, 2009. S. 51–55.
12. *Пушков В. А., Абакумов А. И., Юрлов А. В., Кальманов А. В., Седов А. А., Родионов А. В.* Реакция ВВ на основе октогена на низкоскоростное нагружение стальным цилиндрическим ударником // Межд. конф. "XIII Харитоновские науч. чтения". Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: сб. трудов. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. С. 9–13.
Pushkov V. A., Abakumov A. I., Yurlov A. V., Kalmanov A. V., Sedov A. A., Rodionov A. V. Reaktsiya VV na osnove oktogena na nizkoskorostnoe nagruzhenie stalnym tsilindricheskim udarnikom // Mezhd. konf. "XIII Kharitonovskie nauch. chteniya". Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny: sb. trudov. Sarov: RFYaTs-VNIEEF, 2011. S. 9–13.
13. *Володина Л. В., Гердюков Н. Н., Зотов Е. В.* Реакция полусферических оболочек из ВВ на действие импульсной нагрузки (экспериментально-расчетное исследование). Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях // Межд. конф. "V Харитоновские науч. чтения". Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: сб. трудов. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 60–67.
Volodina L. V., Gerdyukov N. N., Zotov E. V. Reaktsiya polusfericheskikh obolochek iz VV na deystvie impulsnoy nagruzki (eksperimentalno-raschetnoe issledovanie). Veshchestva, materialy i konstruktсии pri intensivnykh dinamicheskikh vozdeystviyakh // Mezhd. konf. "V Kharitonovskie nauch. chteniya". Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny: sb. trudov. Sarov: RFYaTs-VNIEEF, 2003. S. 60–67.
14. *Абросимов Н. А., Куликова Н. А.* Идентификация параметров моделей вязкоупругого деформирования композитных материалов на основе анализа импульсного нагружения оболочек вращения // Механика твердого тела. 2011. № 3. С. 42–57.
Abrosimov N. A., Kulikova N. A. Identifikatsiya parametrov modeley vyazkoupругого deformirovaniya kompozitnykh materialov na osnove analiza impulsnogo nagruzheniya obolochek vrashcheniya // Mekhanika tverdogo tela. 2011. № 3. S. 42–57.
15. *Абакумов А. И., Большаков А. П., Гушанов А. Р., Карпенко И. И., Синицын В. В.* Расчетно-экспериментальное исследование деформирования энергетических материалов в условиях низкоскоростного нагружения в опытах с составными стержнями Гопкинсона // Вопросы материаловедения. 2008. № 1 (53). С. 184–196.
Abakumov A. I., Bolshakov A. P., Gushanov A. R., Karpenko I. I., Sinitsyn V. V. Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie deformirovaniya energeticheskikh materialov v usloviyakh nizkoskorostnogo nagruzheniya v opytakh s sostavnymi sterzhnyami Gopkinsona // Voprosy materialovedeniya. 2008. № 1 (53). S. 184–196.
16. *Годунов С. К., Демчук А. Ф., Козин Н. С., Мали В. И.* Интерполяционные формулы зависимости максвелловской вязкости некоторых металлов от интенсивности касательных напряжений и температур // ПМТФ. 1974. № 4. С. 114–118.

Godunov S. K., Demchuk A. F., Kozin N. S., Mali V. I. Interpolyatsionnye formuly zavisimosti maksvellovskoy vyazkosti nekotorykh metallov ot intensivnosti kasatelnykh napryazheniy i temperatur // PMTF. 1974. № 4. S. 114–118.

Статья поступила в редакцию 19.02.19.

APPLICATION OF A RELAXATION MODEL OF FRACTURED VISCOELASTICITY FOR THE DESCRIPTION OF HIGH-EXPLOSIVE SPECIMEN TESTING USING A SPLIT-HOPKINSON PRESSURE BAR / O. M. Velichko (FSUE “RFNC-VNIIEF”, Sarov, Nizhniy Novgorod region).

A single-material viscoelastic model of a fractured medium is considered, which has been formulated based on publications of US authors, and its modification for viscous relaxation and fracture growth kinetics is presented. An approximate computational algorithm accelerating the process of model fitting for an HMX-based high explosive has been developed. The fitting is based on the criterion of acceptable agreement between calculated data and results of HE specimen testing on a split-Hopkinson pressure bar apparatus from a publication of Russian authors. Numerical modeling of HE specimen deformation is performed based on a computational model implemented by the Godunov method.

Keywords: HE, deformation and fracture, fractured viscoelastic model, Godunov method, numerical modeling.
