

# УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ ВВ НА ОСНОВЕ ОКТОГЕНА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА В РАМКАХ ВЯЗКОУПРУГОЙ МОДЕЛИ МАКСВЕЛЛА – ВИХЕРТА С РАЗРУШЕНИЯМИ

*Т. Б. Григорьева, С. Ю. Седов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

В практике обращения со взрывчатыми веществами (ВВ) приходится сталкиваться с проблемой взрывов, возникающих при незапланированном механическом воздействии на конструкции, содержащие энергетические материалы. В связи с этим важное значение имеет разработка надежных критериев взрывов при механических нагрузках с достаточно малыми скоростями деформирования материала ВВ. В ИТМФ (ВНИИЭФ) ведется работа по созданию феноменологических моделей кинетики и критериев инициирования ВВ, которые калибруются и верифицируются с учетом имеющихся экспериментальных данных.

Изменение начальной плотности (пористости) взрывчатого состава на основе октогена может приводить к изменению его чувствительности и образованию дополнительных горячих пятен, особенно при низкоскоростном воздействии, где механизмы инициирования определяются не ударно-волновыми процессами, а условиями деформации и процессами прочностного разрушения. Поэтому, при численном моделировании низкоскоростного воздействия в реологических моделях и критериях взрыва необходимо учитывать вариацию начальной плотности ВС.

Данная работа проведена в целях развития модели реологии пластифицированных взрывчатых веществ, основанной на вязкоупругих элементах Максвелла. Эта модель используется в настоящее время в расчетах критериев начала взрыва при низкоскоростных воздействиях на ВВ методике МИМОЗА[1].

В работе проведено исследование корректировки параметров модели Максвелла – Вихерта с опорой на экспериментальные данные по исследованию деформирования и разрушения образцов ВВ из флегматизированного октогена с различной плотностью, нагружаемых по методу составных стержней Гопкинсона. С помощью модифицированного критерия взрыва удалось описать имеющуюся совокупность опытов экспериментов (ИФВ группы Белова Геннадия Викторовича) [2] по воздействию сферическими ударниками различного размера на образцы с номинальной и пониженной плотностью и получить единый порог критерия взрыва.

В докладе рассказывается о проделанной работе по введению в модель Максвелла – Вихерта учета

пористости ВВ и модификации единого порогового критерия взрыва, о котором будет рассказано чуть ниже.

## Общее описание модели Максвелла – Вихерта с разрушениями

При моделировании напряженного состояния твердого тела напряжение представляется в виде суммы девиаторной части, отвечающей за сдвиговые нагрузки материала, при которых не изменяется объем образца, и шаровой части:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \delta_{ij} \frac{\sigma_{kk}}{3}.$$

Здесь  $s_{ij}$  – девиатор напряжений,  $\sigma_{ij}$  – полное напряжение, давление  $p = -\frac{\sigma_{ii}}{3}$ . Тензор деформации

образца записывается так:  $e_{ij} = \varepsilon_{ij} + \frac{1}{3}\delta_{ij} \cdot e_{kk}$ . Здесь

$\varepsilon_{ij}$  – девиатор деформации,  $e_{ij}$  – полная деформация. В модели предполагается, что в каждом элементарном объеме сдвиговые напряжения описываются вязкоупругой моделью Максвелла, состоящей из пяти элементов (см. рис. 1), действующих параллельно друг другу.

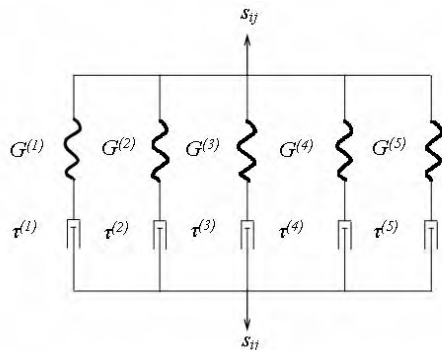


Рис. 1. Схема вязкоупругой модели Максвелла, состоящей из пяти элементов

Каждый  $k$ -ый элемент состоит из двух компонент, которые моделируют сопротивление сдвигу (модуль сдвига  $G^{(k)}$ ) и вязкость (время релаксации  $\tau^{(k)}$ ).

При записи определяющих уравнений среды на основе элементов Максвелла будем пользоваться уравнением Гука, записанным в дифференциальной форме. Тогда для каждого из  $N$  параллельно соединенных элементов Максвелла выполняется соотношение

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)} = 2G^k \dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)} - 2G^{(k)} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)(visc)},$$

где  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)}$  – скорость общих деформаций, для параллельного соединения элементов  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)} = \dot{\varepsilon}_{ij}$ ,  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)(visc)}$  – скорость вязких деформаций,  $2G \dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)(visc)} = \frac{\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)}}{\tau^{(k)}}$ .

Итак, скорость изменения девиатора напряжений одного элемента Максвелла определяется формулой:

$$\dot{s}_{ij} = 2G^{(k)} \varepsilon_{ij} - \frac{s_{ij}}{\tau^{(k)}},$$

где  $k$  – индекс ( $k=1, \dots, 5$ ), который указывает, к какому элементу Максвелла относится величина.

Учтем сдвиговое разрушение среды. Тогда в уравнении Гука из скорости сдвиговой деформации надо вычесть часть, связанную с разрушением:

$$\dot{s}_{ij}^{(k)} = 2G^{(k)} \dot{\varepsilon}_{ij} - 2G^{(k)} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)(visc)} - 2G^{(k)} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(c)}.$$

Для компонент тензора деформаций сдвигового разрушения  $\varepsilon_{ij}^{(c)}$  нужно свое отдельное определяющее соотношение. Предполагаем изотропию материала, то есть изначально трещины равномерно распределены по всему объему образцу, и их средний размер не зависит от направления. Логично связать  $\varepsilon_{ij}^{(c)}$  с компонентами напряжения соотношением типа:

$$2G^{(k)} \varepsilon_{ij}^{(c)} = f \cdot s_{ij}^{(k)},$$

где  $f$  – некоторая функция параметров среды. Вид этой функции может быть различным, зависящим от модели разрушения. Выберем ее здесь как это сделано в модели Аддзео – Джонсона – Дайниса. Это связано с тем, что константы этой модели известны для РВХ 9501, который является аналогом российского состава на основе октогена. В модели  $f = \left(\frac{c}{a}\right)^3$ , где  $c$  – текущий размер трещин,  $a$  – нормирующий, характерный размер трещин.

Итак,  $2G \cdot \varepsilon_{ij}^{(c)} = \left(\frac{c}{a}\right)^3 \cdot s_{ij}$ ,

и  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{(s)} = \frac{1}{2G} \left\{ 3 \left(\frac{c}{a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{a} \cdot s_{ij} + \left(\frac{c}{a}\right)^3 \cdot \dot{s}_{ij} \right\}$ .

Учтем выделение энергии вследствие диссипативных процессов в среде из максвелловских эле-

ментов. Они в принятой модели определяются процессами вязкости и разрушения. Для каждого параллельно соединенного максвелловского элемента нужно отдельно вычислять мощность вязкой диссипации на единицу массы:

$$w_{visc} = \frac{1}{\rho} \sum_{k=1}^5 s_{ij}^{(k)} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)} = \sum_{k=1}^5 \frac{s_{ij}^{(k)} s_{ij}^{(k)}}{2G^{(k)} \tau^{(k)}},$$

и мощность выделения энергии из-за сдвигового разрушения

$$w_{shear} = \frac{1}{\rho} s_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^{(c)} = \frac{1}{2G\rho} \left\{ 3 \left(\frac{c}{a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{a} \cdot s_{ij} s_{ij} + \left(\frac{c}{a}\right)^3 \cdot \dot{s}_{ij} s_{ij} \right\}.$$

Таким образом, суммарный вклад диссипативных процессов во внутреннюю энергию определяется суммой удельных мощностей

$$w_{diss} = w_{shear} + w_{visc}.$$

Отметим, что искусственная вязкость при счете не должна давать вклад, сравнимый с  $w_{diss}$ . В противном случае, при вычислении внутренней энергии  $E$  будут вноситься значительные погрешности.

Полная величина модуля сдвига равна:

$$G = \sum_{k=1}^5 G^{(k)}.$$

Для параллельного соединения элементов Максвелла полный девиатор напряжений  $s_{ij}$ :

$$s_{ij} = \sum_{k=1}^5 s_{ij}^{(k)},$$

а полный девиатор деформаций  $\varepsilon_{ij}$  равен:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{(c)} + \varepsilon_{ij}^{(k)},$$

так как при параллельном соединении деформации всех элементов одинаковы. Итак,

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{(k)} = 2G^{(k)} \dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{s_{ij}^{(k)}}{\tau^{(k)}} - \frac{G^{(k)}}{G} \left[ 3 \left(\frac{c}{a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{a} s_{ij} + \left(\frac{c}{a}\right)^3 \cdot \dot{s}_{ij} \right].$$

Скорость изменения девиатора напряжений  $s_{ij}$  находится суммированием по всем элементам Максвелла:

$$\dot{s}_{ij} = \frac{2G \dot{\varepsilon}_{ij} - \sum_{k=1}^5 \frac{s_{ij}^{(k)}}{\tau^{(k)}} - 3 \left(\frac{c}{a}\right)^2 \frac{\dot{c}}{a} s_{ij}}{1 + \left(\frac{c}{a}\right)^3}.$$

Предполагается, что скорость роста трещин происходит по двум режимам, медленному и быстрому:

$$\dot{c} \equiv \frac{dc}{dt} \begin{cases} v_{\max} \left( \frac{K}{K_1} \right)^m, & K \leq K_2 \\ v_{\max} \left( 1 - \left( \frac{K_0}{K} \right)^2 \right), & K > K_2 \end{cases},$$

где  $v_{\max}$ ,  $m$ ,  $K_0$  – константы. Величина  $v_{\max}$  есть максимальная скорость роста трещины,  $K_0$  – трещиностойкость,  $m$  – константа степенного роста трещины. Переход между медленным и быстрым режимами скорости роста трещин происходит при достижении порогового значения  $K_2$ , равного:

$$K_2 = K_0 \sqrt{1 + \frac{2}{m}}.$$

Значение величины  $K_1$  вычисляется как:

$$K_1 = K_2 \left( 1 + \frac{m}{2} \right)^{\frac{1}{m}}.$$

Критериальное значение разрушения  $K$  связано с эффективным напряжением в соответствии с теорией Гриффитса хрупкого разрушения следующим образом:

$$K \sim \sqrt{\pi c} \sigma_{\text{eff crack}},$$

где  $\sigma_{\text{eff crack}}$  – эффективное напряжение вдоль берегов трещины,  $c$  – текущая длина трещины. На основе теории Гриффитса в модели используется такое соотношение:

$$K^2 = \frac{3\pi a c}{2 a} s_{ij} s_{ij},$$

в предположении  $\sigma_{\text{eff crack}}^2 \sim s_{ij} s_{ij}$ .

### Опыты группы Г. В. Белова с образцами ВВ пониженной плотности

В данном разделе представлена схема проведения экспериментов группы Г. В. Белова (рис. 2) по воздействию стальными сферическими ударниками 4-х диаметров (массой 2, 12, 25 и 100 г соответственно), которые проводились с образцами из флегматизированного октогена с пониженной на 5,9–7,2 % плотностью (относительно номинальной 1,88 г/см<sup>3</sup>) [2].

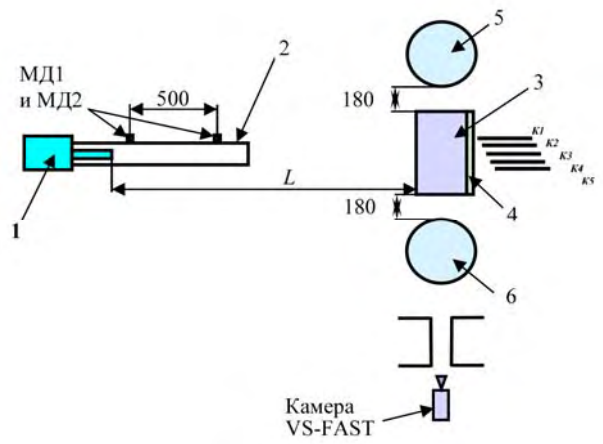


Рис. 2. Схема проведения экспериментов: 1 – метательное устройство (БМУ-14,5); 2 – ствольная насадка с датчиками МД1 и МД2 для измерения скорости ударника; 3 – образец ВВ; 4 – пластинка-индикатор; К1, К2, К3, К4, К5 – игловые контактные датчики (контактный приемник); 5, 6 – импульсомеры ( $d = 90$  мм;  $m \approx 2,9$  кг)

Постановка и исходные данные эксперимента следующие: образцы из флегматизированного октогена, армированного волокном СВМ, представляли собой цилиндры диаметром 120 мм и толщиной 60 мм, со средней плотностью 1,745–1,769 г/см<sup>3</sup>, изготовленные в отделе 0310 ИФВ. В дополнение к этим образцам было изготовлено 3 контрольных образца такой же плотности для определения физико-механических свойств. Размеры этих образцов:  $\varnothing 20 \times 30$  мм. Нагружение образцов ВВ осуществлялось стальными сферическими ударниками диаметром 29 мм (масса 99,66 г  $\approx$  100 г). Разгон ударников производился с помощью взрывного ствольного метательного устройства калибра 30 мм, которое располагалось на расстоянии  $\sim 0,8$ –1 м от образца ВВ. Погрешность измерения скорости удара не превышала 1 %.

Определение физико-механических характеристик образцов ВВ пониженной плотности проведено на трех цилиндрических образцах (п. 107, ч/п 42,  $\varnothing 20$  мм,  $h = 30$  мм, плотность:  $\rho = 1,74$ –1,75 г/см<sup>3</sup>).

Результаты по определению физико-механических характеристик ВВ на образцах пониженной и номинальной плотности представлены в табл. 1 и рис. 3.

Полученные значения физико-механических характеристик (предела прочности и модуля упругости) ВВ при сжатии на образцах пониженной плотности на 30 % и 20 % соответственно ниже полученных на образцах ВВ номинальной плотности.

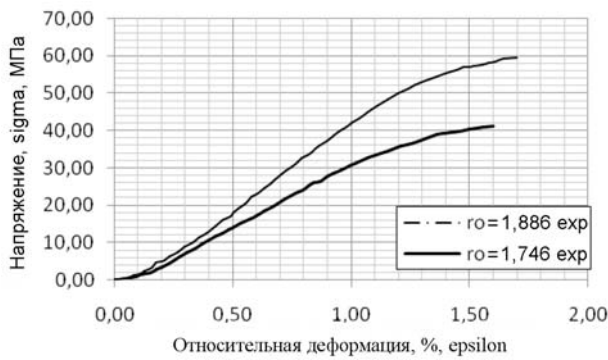


Рис. 3. Диаграмма нагружения образцов номинальной и пониженной плотности

Таблица 1  
Физико-механические характеристики ВВ при сжатии на образцах пониженной плотности

№ образца	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости, $E$ , МПа	Предел прочности, $\sigma$ , МПа	Отн. деф-я, $\epsilon$ , %
1	1,746	33	41,3	1,6
2	1,749	38	41,8	1,5
3	1,751	40	42,5	1,4
Ср. знач.	1,749	37	41,9	1,5±0,1
4	1,886	47	59,6	1,7

### Численное моделирование опытов с составными стержнями Гопкинсона

При прогнозировании последствий ударного воздействия на ВВ и тестировании физических моделей происходящих при этом процессов необходимо учитывать факторы, влияющие на инициирование и развитие взрыва. Одним из таких факторов является плотность ВВ. В области низкоскоростного ударного воздействия механизмы инициирования определяются не ударно-волновыми процессами, а условиями деформации и процессами прочностного разрушения образца ВВ. Поэтому выявление зависимости условий инициирования и динамики развития взрывчатого превращения из первичного очага при вариации плотности ВВ важно для понимания физики процессов и построения адекватных предсказательных моделей.

Была поставлена задача: в комплексе программ МИД ввести в модель Максвелла учет пористости ВВ и изучить ее влияние на порог инициирования.

Для проверки правильности внедрения модели по понижению плотности и ее параметров выполнено численное моделирование экспериментов по исследованию деформирования и разрушения образцов ВВ, нагружаемых по методу составных стержней Гопкинсона. Основным результатом данных опытов является диаграмма напряжения–деформации  $\sigma(\epsilon)$

цилиндрического образца ВВ при его одноосном сжатии.

На рис. 4 представлена двумерная осесимметричная геометрия задачи ( $x$  – ось симметрии). Расчетные области (физические) представляют собой цилиндры: I – ударная болванка, II – нагружающий стержень, III – исследуемый образец, IV – опорный стержень. Материал областей I, II, IV – титановый сплав, материал области III – ВВ на основе октогена. В начальный момент времени задается скорость  $U_1$  болванки (обл. I). Болванка I ударяет с заданной скоростью по нагружающему стержню II, формируя в нем прямоугольный импульс упругой волны. Геометрические параметры эксперимента:

- а) радиусы цилиндров:  $R_1 = 0,3175$  см,  $R_2 = 0,47$  см;
- б) линейные размеры:  $X_1 = 20$  см,  $X_2 = 75$  см,  $X_3 = 75,635$  см,  $X_4 = 225,635$  см.



Рис. 4. Геометрия задачи

Для моделирования ВВ в расчетах используется трехчленное уравнение состояния с параметрами ВВ на основе октогена. Были проведены расчеты как с номинальной плотностью 1,886 г/см<sup>3</sup>, так и с пониженной 1,746 г/см<sup>3</sup>. Параметры для уравнений состояния приведены в табл. 2. Поведение ВВ в области III описывается вязкоупругой моделью с трещинами.

Таблица 2  
Параметры трехчленного уравнения состояния

Вещество (номер области)	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$c_0$ , км/с	$n$	$\gamma$
Титан (I, II, IV)	4,39	4,9	3	2,2
ВВ на основе октогена (III)	1,875	2,52	7,003	2

Было проведено большое число тестовых расчетов для подбора оптимальных параметров вязкоупругой модели с трещинами. В итоге для дальнейшего численного моделирования были выбраны параметры № 1 и № 2, представленные в табл. 3 и 4. Наборы № 1 и № 2 являются значениями для американского ВВ, подобранными в гидрокоде MESA. Для описания в соответствии с пониженной плотностью потребовалось изменение параметра трещиностойкости  $K_0$  и коэффициентов  $G_i$ .

Параметры № 1 вязкоупругой модели ВВ на основе октогена

$k$	1	2	3	4	5
$G^{(k)}$ , ГПа	1,1328	0,2088	0,62544	1,0908	0,8256
$1/\tau^{(k)}$ , $10^{-1}$ мкс	0	$7,32 \cdot 10^{-2}$	$7,32 \cdot 10^{-1}$	7,32	20,0
$a$ , см	$c_0$ , см	$v_{\max}$ , км/с	$K_0$ , ГПа·см <sup>1/2</sup>		$m$
0,1	0,003	0,3	$1,1 \cdot 10^{-2}$		10

Физико-механические характеристики ВВ

№ образца	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Предел прочности, $\sigma$ , МПа	Отн. деф-я, $\epsilon$ %
Эксперимент	1,746	41,3	1,6
Расчет МИД	1,746	40,78	1,3
Эксперимент	1,886	59,6	1,7
Расчет МИД	1,886	58,21	1,67

По результатам численных экспериментов нами предложены аппроксимационные формулы для вычисления величины параметра трещиностойкости  $K_0$  с учетом плотности ВВ: где  $\rho$  – плотность пористого ВВ. При  $\rho = 1,746$  г/см<sup>3</sup>  $k = k_1 = 0,007$ .

Таблица 4

Параметры № 2 вязкоупругой модели ВВ на основе октогена

$k$	1	2	3	4	5
$G^{(k)}$ , ГПа	0,849	0,156	0,469	0,818	0,619
$1/\tau^{(k)}$ , $10^{-1}$ мкс	0	$7,32 \cdot 10^{-2}$	$7,32 \cdot 10^{-1}$	7,32	20,0
$a$ , см	$c_0$ , см	$v_{\max}$ , км/с	$K_0$ , ГПа·см <sup>1/2</sup>		$m$
0,1	0,003	0,3	$7,0 \cdot 10^{-3}$		10

$$K_0(\rho_0) = -0,03039 + 0,02142$$

$$G_i = G_i * \alpha(\rho_0),$$

где:  $\alpha(\rho_0) = 1,428 * \rho_0 - 1,593$ .

**Постановка расчетов в комплексе МИД опытов группы Г. В. Белова с образцом ВВ номинальной и пониженной плотности**

На рис. 5 представлена итоговая диаграмма напряжения-деформации для образца ВВ номинальной и пониженной плотности в расчетах составного стержня Гопкинсона с набором параметров № 1 и № 2 и результаты экспериментов группы Белова. Как видно из табл.5 физико-механических характеристик ВВ, результаты расчета и эксперимента имеют удовлетворительное согласие. В основном в параметрах модели варьировались  $G_i$  и величина  $K_0$  – трещиностойкость. Хорошо удалось смоделировать участок возрастающей ветви. Эти расчеты были бы точнее, если бы экспериментаторы приводили бы не только графики  $\sigma(\epsilon)$ , но и зависимость  $\epsilon(t)$ .

Для модификации критерия взрыва с учетом пористости в комплексе программ МИД были проведены расчеты экспериментов группы Белова как с номинальной, так и пониженной плотностью. Результаты экспериментов группы Белова приведены в табл. 6–7.

Таблица 6

Результаты экспериментов Г. В. Белова и соавторов с образцом ВВ номинальной плотности  $\rho = 1,886$  г/см<sup>3</sup>

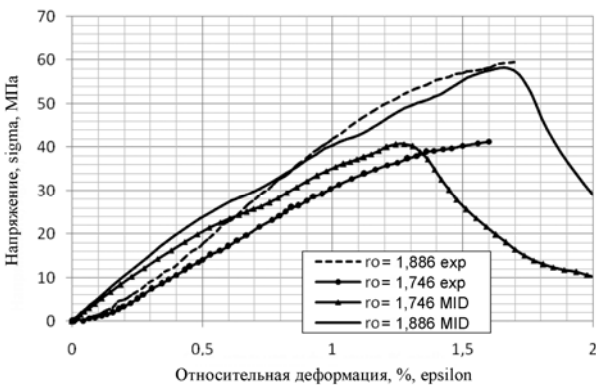


Рис. 5. Итоговая диаграмма напряжения–относительной деформации эксперимента и расчета с параметрами № 1

№	Масса ударника, (г)	$V_{\text{ударн}}$ (м/с)	Результат эксперимента
1	2	73	Реакция в образце отсутствует
		78	Иницирование ВП
2	12	49,2	Реакция в образце отсутствует
		52,25	Иницирование ВП
3	25	46	Реакция в образце отсутствует
		54	Иницирование ВП
4	100	32	Реакция в образце отсутствует
		35	Иницирование ВП

Таблица 7

Результаты экспериментов Г. В. Белова и соавторов с образцом ВВ пониженной плотности  $\rho = 1,746 \text{ г/см}^3$

№	Масса ударника, (г)	$V_{\text{удара}}$ (м/с)	Результат эксперимента
1	12	76	Реакция в образце отсутствует
		82	Инициирование ВП
2	100	64	Реакция в образце отсутствует
		69	Инициирование ВП

По результатам опытов с двумя диаметрами ударников и пониженной на 6,9–7,3 % и 5,9–7,2 % плотностью (относительно номинальной: 1,886 г/см<sup>3</sup>), авторами был сделан вывод, что снижение плотности образца ВВ приводит к увеличению предельной скорости:

1. Для ударника массой 100 г при снижении плотности на 6–7 % (с 1,88 г/см<sup>3</sup> до 1,745–1,769 г/см<sup>3</sup>) предельная скорость увеличивается с 32–35 м/с до 66–67 м/с.

2. Для массы ударника 12 г получено увеличение предельной скорости с 50–52 м/с до 60–65 м/с при снижении плотности на 4–5 % (с 1,88 г/см<sup>3</sup> до 1,788–1,8 г/см<sup>3</sup>) и до 77–81 м/с при снижении плотности на 7 % (с 1,88 г/см<sup>3</sup> до 1,747–1,754 г/см<sup>3</sup>).

Далее представлены результаты расчетов в методике МИМОЗА с использованием модификации модели Максвелла с учетом пористости и образцом ВВ пониженной плотности **1,746 г/см<sup>3</sup>** (на 7 % относительно номинальной 1,886 г/см<sup>3</sup>). Для расчетов брались параметры № 2 вязкоупругой модели из табл. 4. Для описания экспериментов с ВВ номинальной плотности был использован набор параметров № 1 из табл. 3.

### Критерий с единым пороговым значением

Для лучшей предсказательности ситуации «взрыв-не взрыв» может служить критерий с единым пороговым значением. Данная функция была подобрана эмпирическим путем на основе расчетов по моделированию большого набора опытов с ВВ на основе октогена [3].

На данный момент до введения учета пористости ВВ критерий выглядел следующим образом [3]:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot f \cdot g \left( \frac{c}{c_a} \right)$$

где:  $\varphi_0$  – базовый критерий (1), функция  $f$  – функция, учитывающая динамический масштабный эффект, определенная с помощью интенсивности напряжения (2);  $g$  – функция, характеризующая разру-

шенностью среды ВВ (3). Величина  $\varphi_0$  рассчитывается по формулам:

$$\frac{d\varphi_0}{dt} = G(p, \rho, E, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, \dots) - \frac{\varphi_0}{\tau_0},$$

где  $G$  – скорость генерации дефектов

$$\frac{d\varphi_0}{dt} = \left( \frac{1}{W_0} \frac{\sigma_{ij}}{\rho} \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} \right)^m \cdot \theta(\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_{0cr}) \cdot \left( 1 + \left( \frac{p}{p_0} \right)^n \right) \cdot \theta(p) - \frac{\varphi_0}{\tau_0},$$

$$\theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$f = \left( \int_0^t (\sigma - \sigma_0)^m \theta(\sigma - \sigma_0) \theta(p) dV \right)^\alpha \quad m = 1; \alpha = 1,3 \quad (2)$$

$$g \left( \frac{c}{c_a} \right) = 1 - 0,0001 \cdot \frac{c}{c_a} \quad (3)$$

где:  $W_0$ ,  $m$ ,  $\dot{\gamma}_{0cr}$ ,  $n$ ,  $\tau_0$  – параметры критерия  $\varphi_0$ ,  $\sigma_0 = 0,5$  ГПа,  $\frac{\sigma_{ij}}{\rho} \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt}$  – мощность общих деформаций,  $\dot{\gamma}$  – скорость общих деформаций (инвариант),  $c$  – текущая длина,  $c_a$  – характерный размер трещины.

### Модификация критерия с единым пороговым значением с учетом пористости

Авторами была проведена работа по модификации критерия  $\varphi$ : в него был введен учет пористости в виде функций  $\beta(\rho)$  и  $A(\rho)$ :

$$\varphi = \varphi_0 \cdot g \cdot f^{\beta(\rho)} \cdot A(\rho)$$

где:  $A(\rho)$  и  $\beta(\rho)$  – функции плотности.

Опишем подробнее вид данных функций:

$$\beta(\rho) = (\beta_0 - \mu \cdot x)$$

где  $\mu = 5,38$ ;  $\beta_0 = 0,8$ ;  $x = \frac{\rho_{nom} - \rho}{\rho_{nom}}$  ( $\rho_{nom}$  – номинальная начальная плотность образца ВВ,  $\rho_{low}$  – пористая начальная плотность образца ВВ,  $\rho_{low} \leq \rho \leq \rho_{nom}$ ).

Окончательно получаем формулу:

$$A(\rho) = 0,1428 * \rho + 0,0006.$$

На основе результатов проведенных расчетов опытов группы Белова с набором параметров № 1 и № 2, с ВВ номинальной и пониженной плотности, удалось построить критерий  $\varphi$  с единым порогом с учетом пористости ВВ. Его вид представлен

на рис. 6. Значения критерия пористого ВВ отмечены круглым маркером, а значения критерия непористого ВВ – маркером типа «треугольник» (закрашенный маркер описывает ситуацию «взрыв», незакрашенный маркер – «не взрыв»). Превышение критерия  $\phi$  значения 1 означает взрыв.

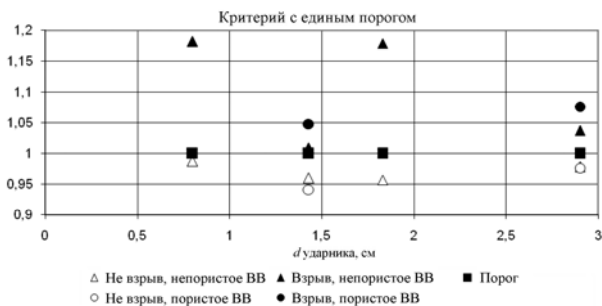


Рис. 6. Критерий с единым порогом

### Заключение

Выполнено численное моделирование экспериментов по исследованию деформирования и разрушения образцов ВВ, нагружаемых по методу составных стержней Гопкинсона для учета влияния пористости ВВ на параметры модели Максвелла – Вихерта и подобраны оптимальные константы модели. Данный набор параметров позволил удовлетворительно описать диаграмму напряжения-деформации для опытов группы Г. В. Белова (ИФВ) по воздействию сферическими стальными ударниками четырех диаметров на образцы ВВ номинальной и пониженной на 6–7 % плотности.

На основе проведенного численного моделирования предложены формулы зависимости параметра трещиностойкости и модулей сдвига от начального значения плотности ВВ.

Выполнена модификация вязкоупругой модели Максвелла – Вихерта и критерия взрыва  $\phi$ : введен учет плотности ВВ. Опыты группы Г. В. Белова показали существенное влияние пористости ВВ на порог взрыва. С помощью модифицированного критерия с единым порогом взрыва удалось описать имеющуюся совокупность экспериментов группы Г. В. Белова по соударению сферических ударников с ВВ на основе октогена и получить единый порог критерия для нагружения образцов номинальной и пониженной плотности.

Это позволяет сделать вывод о возможности использования модифицированной модели Максвелла – Вихерта и критерия взрыва с единым пороговым значением для оценки взрывобезопасности конструкций, содержащих ВВ.

### Литература

1. Софронов И. Д., Винокуров О. А, Змушко В. В. и др. Комплекс программ МИМОЗА. Решение многомерных задач гидродинамики // Вопросы математического моделирования вычислительной математики и информатики. Сборник научных трудов. Москва – Арзамас-16, 1994.
2. Белов Г. В., Базаров Ю. Б. и др. Влияние предварительного механического повреждения и пористости взрывчатого вещества на условия инициирования и параметры взрыва при низкоскоростном ударе // Физика горения и взрыва, 2017. Т. 53, № 2.
3. Седов С. Ю., Мицура М. Н. Критерий начала взрыва при низкоскоростном воздействии на взрывчатые составы на основе октогена / Международная конференция «XII Забабахинские научные чтения» // Сборник тезисов. Снежинск: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2014. С. 116.