

## КОНСТРУКЦИЯ СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА ВЗРЫВАТЫХ ВЕЩЕСТВ С КУМУЛЯТИВНЫМ ЭФФЕКТОМ

Норов Ю.Д., Нутфуллоев Г.С., Таджиев Ш.Т., Равшанова М.Х.

*Разработана конструкция скважинного заряда ВВ с использованием кумулятивного эффекта, позволяющая понизить подошву уступа и уменьшить расходы на буровзрывные работы. Расположение в донной части скважины кумулятивной воронки оказывает влияние на интенсивность взрывного разрушения горных пород. Определены эффективные параметры кумулятивной воронки в конструкции скважинного заряда ВВ. Рекомендуется внутри заряда ВВ над конусной облицовкой использовать линзу. Линза увеличивает КПД заряда, она разворачивает детонационную волну на воронку. Без линзы воронка обжимается скользящей детонационной волной, а с линзой – падающей волной. Проведено численное моделирование действия заряда ВВ с кумулятивным эффектом в двумерной постановке с использованием Эйлера и совместного Эйлера-Лагранжева конечно-разностных алгоритмов. Определены потенциальные возможности и изучены физические особенности функционирования кумулятивного заряда на разных фокусных расстояниях, по горной породе конечной мощности, а также сравнение результатов расчета по двум разным моделям с экспериментальными данными.*

*Ключевые слова: скважина, конструкция, заряд ВВ, кумулятивный эффект, подошва уступа, глубина пробития, высота кумулятивной облицовки, действие детонационной волны, численное моделирование, Эйлера и Эйлера-Лагранжева конечно-разностные алгоритмы*

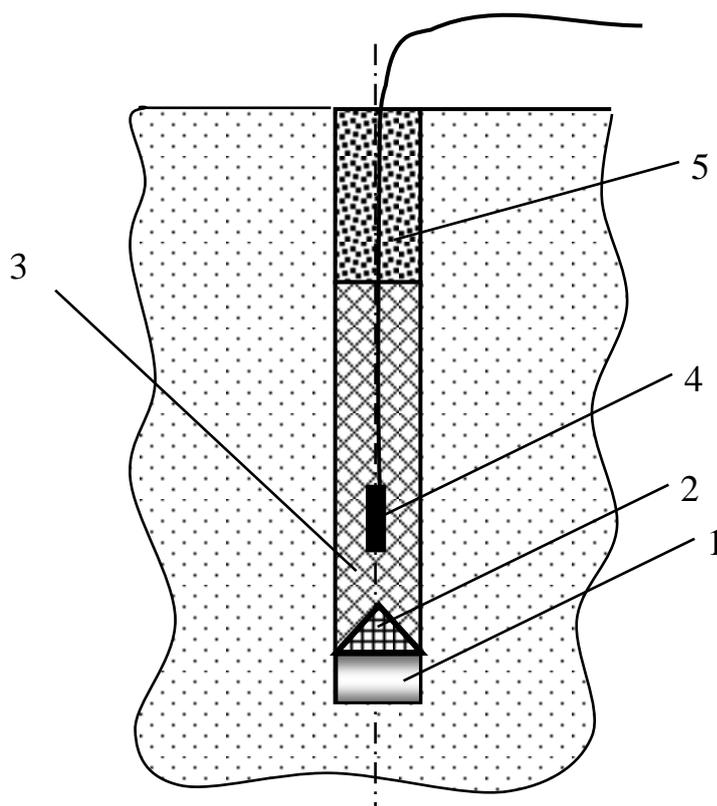
Широкий диапазон изменения физико-механических характеристик и многообразие горно-технологических свойств пород сложноструктурных месторождений требует индивидуального подхода к выбору рациональных технологических параметров горных работ для каждого разрабатываемого участка. В первую очередь это касается подготовки пород к выемке взрывным способом.

Выполненные ранее теоретические и лабораторные исследования [1, 2] показали, что форма донной части заряда оказывает существенное влияние на состояние поверхности и уровень подошвы уступа после взрыва. Различные формы донной части предлагается выполнять с помощью кумулятивных воронок, представляющих собой конус, изготовленный из инертного материала. При определенных геометрических параметрах кумулятивной воронки обеспечивается увеличение зоны усиленного динамического нагружения на донную часть скважины и уменьшается воздействие отраженной ударной волны на материал забойки. Таким образом, используя полученные результаты, можно предложить конструкцию заряда, в которой на дне скважины

расположена кумулятивная воронка. Это позволит снизить величину перебура скважинных зарядов, выйти на проектную отметку подошвы уступа и обеспечить необходимый гранулометрический состав взорванной массы.

Формирование данной конструкции производят следующим образом (рис. 1).

На дно скважины опускают поливинилхлоридный или деревянный цилиндр 1, который служит для создания фокусного расстояния, над ним устанавливают кумулятивную воронку 2, засыпают ВВ 3, опускают промежуточный детонатор 4, заряжают остальное количество ВВ 3 и формируют забойку 5.



1 – деревянный цилиндр; 2 – кумулятивная воронка; 3 – заряд ВВ;  
4 – промежуточный детонатор; 5 – забойка

**Рис. 1. Конструкция скважинного заряда ВВ с использованием кумулятивного эффекта**

Использование конструкции заряда, в донной части которого располагается кумулятивная воронка, приводит к занижению подошвы уступа. Расположение в донной части скважины кумулятивной воронки оказывает влияние на интенсивность взрывного разрушения горных пород.

Для кумулятивных зарядов существует оптимальное расстояние  $z = F$  от заряда до дна скважины, называемое фокусным расстоянием [3]. При срабатывании заряда на фокусном расстоянии пробитие кумулятивной струи максимально по сравнению с другими вариантами. Для конических зарядов обычно  $F = (2-3)d$ , где  $d$  – диаметр заряда ВВ. Для прецизионных зарядов

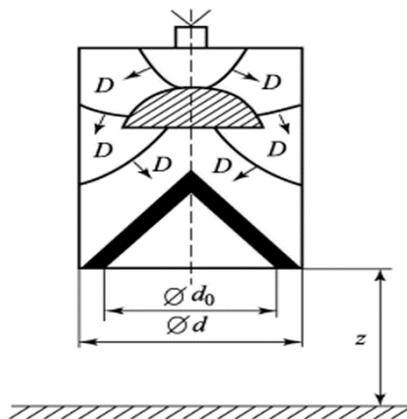
$$F = (6-10)d.$$

Высота кумулятивной облицовки определяется по формуле:

$$h = \frac{d}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)},$$

где  $\alpha$  – угол между стенками облицовки.

Рекомендуется внутри заряда ВВ над конусной облицовкой использовать линзу. Линза увеличивает КПД заряда, она разворачивает детонационную волну на воронку. Без линзы воронка обжимается скользящей детонационной волной, а с линзой – падающей волной (рис. 2).



**Рис. 2.** Действие детонационной волны на воронку

Линзы обычно имеют цилиндрическую форму или форму усеченного конуса. Материалом для линзы может быть пенопласт, металл, дерево и т.п. Обычно её толщина подбирается такой, чтобы детонация не передавалась через линзу. Основной путь детонации должен проходить в обход линзы сбоку.

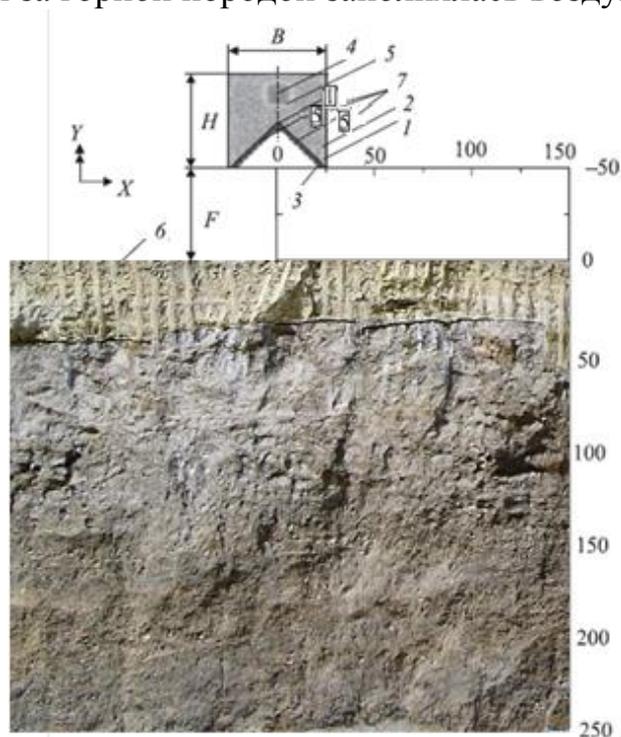
Согласно [4] проведено численное моделирование действия заряда ВВ с кумулятивным эффектом в двумерной постановке с использованием Эйлера [3, 5] и совместного Эйлера-Лагранжева [6-8] конечно-разностных алгоритмов. Для описания поведения взаимодействующих материалов использовалась идеальная упругопластическая модель среды [5-7].

Анализировалась динамика формирования кумулятивной струи и конечные профили каверн в горной породе мощностью 250 мм (рис. 3), расположенных на расстоянии  $F \approx 0-50$  мм от основания кумулятивного заряда.

В качестве заряда использовался удлиненный кумулятивный заряд шириной  $B=50$  мм и высотой  $H=50$  мм с металлической кумулятивной облицовкой толщиной 2 мм и углом раствора  $90^\circ$ . В качестве ВВ использовалось эмульсионное ВВ *Nobelit-216Z*.

Расчетная схема функционирования кумулятивного заряда показана на рис. 3, где 1 – кумулятивный заряд, состоящий из взрывчатого вещества (ВВ, поз. 2) и кумулятивной облицовки (КО, поз. 3). Полагается, что в начальный момент времени ( $t=0$ ) в точке 4 (точка инициирования) осуществляется подрыв заряда ВВ с начальной плотностью  $\rho_{ex}$  и теплотой взрывчатого

превращения  $Q$ . От точки инициирования начинает распространяться фронт детонационной волны (кривая 5) со скоростью  $D$  с образованием продуктов детонации. С течением времени детонационная волна начинает отражаться от поверхности облицовки, на которую действуют давления порядка 25–35 ГПа. Величина давления зависит от свойств используемого ВВ, конструктивного оформления заряда, используемых материалов и толщин кумулятивной облицовки. Под действием продуктов детонации кумулятивная облицовка деформируется с образованием кумулятивной струи, которая через небольшой промежуток времени начинает взаимодействовать с горной породой (поз. 6), размещенной на расстоянии  $F$  от основания кумулятивного заряда. Расчетная область вокруг заряда и за горной породой заполнялась воздухом.



1 – кумулятивный заряд высотой  $H$  и шириной  $B$ ; 2 – ВВ; 3 – кумулятивная облицовка; 4 – точка инициирования заряда ВВ; 5 – фронт детонационной волны; 6 – горная порода; 7 – подвижные реперные точки (маркеры);  $F$  – фокусное расстояние

**Рис. 3. Расчетная схема взаимодействия заряда ВВ с кумулятивным эффектом с горной породой**

Для описания поведения взаимодействующих материалов (облицовки и горной породы) принимается идеальная упругопластическая модель среды. Распространение детонации рассматривается вне общей системы уравнений. При этом фронт детонационной волны определяет границу области, охваченную течением в текущий момент времени. С учетом сделанных допущений система уравнений, описывающая двумерное плоское течение в переменных Эйлера, имеет классический вид [4-7]

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} &= 0 \\
\rho \frac{\partial v_y}{\partial t} &= \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial x}, \quad \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{xx}}{\partial y}, \\
\rho \frac{de}{dt} &= \sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + 2\sigma_{xy} \varepsilon_{xy}, \\
p &= p(\rho, e), \quad \sigma_{ij} = -p g_{ij} + D_{ij}, \\
\varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xx} = \frac{\partial v_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}, \\
\frac{DD_{yy}}{Dt} &= 2G \left( \varepsilon_{yy} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right), \\
\frac{DD_{yy}}{Dt} &= 2G \left( \varepsilon_{yy} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right), \\
\frac{DD_{xx}}{Dt} &= 2G \left( \varepsilon_{yy} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right), \quad \frac{DD_{xy}}{Dt} = G(\varepsilon_{xy}), \\
f &= 2(D_{xx}^2 + D_{xy}^2 + D_{yy}^2 + D_{xx} D_{yy}) \leq \frac{2}{3} \sigma_{td}^2.
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $e$  – удельная внутренняя энергия;  $t$  – текущее время;  $x, y$  – осевая и радиальная координаты;  $v_x, v_y$  – компоненты вектора скорости;  $g_{ij}$  – метрические коэффициенты основного базиса выбранной системы координат, причем  $i, j = x, y$ ;  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}$  – нормальные напряжения в осевом, радиальном и тангенциальном направлениях;  $\sigma_{xy}$  – касательные напряжения;  $D_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $D(\dots)/Dt$  – производная в смысле Яуманна,  $D$  – модуль сдвига;  $\sigma_{td}$  – динамический предел текучести среды.

В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы, импульса и энергии, в общем виде уравнения состояния взаимодействующих сред (кумулятивной облицовки, ВВ продуктов детонации, воздуха и горной породы), взаимосвязь компонентов тензора полных напряжений с шаровой и девиаторной составляющими, кинематические соотношения, физические соотношения в виде закона Гука в дифференциальной форме и условия пластического течения Мизеса.

Предполагается также, что в зоне растягивающих напряжений при выполнении условия  $\sigma_i > \sigma_p$  ( $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\sigma_p$  – предел прочности на растяжение) горная порода или кумулятивная струя теряет свою прочность и ведет себя как сыпучее тело.

Динамический предел текучести ( $\sigma_{td}$ ) материалов кумулятивной облицовки и горной породы, в процессе проведения расчетных исследований принимался постоянным. В качестве уравнений состояния для всех

рассматриваемых материалов, за исключением воздуха, использовались либо линейная зависимость вида  $p = K(\rho/\rho_0 - 1)$ , либо ударная адиабата вида  $D_\phi = as + bv$ , позволяющая вычислить давление в ударно-сжатом веществе посредством задания констант  $a$  и  $b$  [3], где  $K$  – модуль объемного сжатия вещества;  $D_\phi, a$  – скорости ударной волны и звука в материале,  $b$  – коэффициент сжимаемости;  $v$  – массовая скорость за фронтом ударной волны.

Для воздуха используется уравнение состояния совершенного газа  $p = (\gamma - 1)\rho e$  с постоянным показателем адиабаты  $\gamma = 1,4$ . При этом удельная внутренняя энергия подбирается таким образом, чтобы начальное давление в воздухе при его начальной плотности  $\rho_a = 1,2921 \text{ кг/м}^3$  соответствовало атмосферному давлению  $p_a = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ ГПа}$  [8], т.е.  $e = 0,196 \text{ МДж/кг}$ .

Для продуктов детонации используется уравнение состояния в форме Джонсона–Уилкинса–Ли [3]

$$\rho = A_{ex} \left(1 - \frac{\omega}{r_1 v}\right) \exp(-r_1 v) + B_{ex} \left(1 - \frac{\omega}{r_2 v}\right) \exp(-r_2 v) + \frac{\omega}{v} e_v, \quad (2)$$

где  $V = \rho_{BB}/\rho$  – относительный удельный объем;  $A_{ex}, B_{ex}, r_1, r_2, \omega$  – эмпирические коэффициенты;  $e_v = e\rho_{ex}$ . В нашем случае принимаются следующие числовые значения:  $A_{ex} = 524 \text{ ГПа}$ ;  $B_{ex} = 7,678 \text{ ГПа}$ ;  $r_1 = 4,2$ ;  $r_2 = 1,1$ ;  $\omega = 0,34$ ;  $e_v = 8,5 \text{ ГДж/м}^3$ .

Граничными условиями для данной задачи являются: условие симметрии на оси  $x(v_y = 0)$ , задание параметров Чепмена–Жуге на фронте детонационной волны, на контактных границах типа «оболочка – продукты детонации», «оболочка – воздух» –  $\sigma_n = p$ , где  $p$  – давление в продуктах детонации или воздухе,  $\sigma_n$  – нормальные составляющие напряжения в текущем элементе оболочки. Предполагается также, что в начальный момент времени ВВ детонирует в точке инициирования (поз. 4, рис. 3), рассматриваемые среды находятся в покое, а состояние пород соответствует невозмущенной среде [4].

Для получения более полной информации о кинематических характеристиках движения элементов облицовки они маркируются подвижными реперными точками (маркерами или трассерами), в которых дополнительно вычисляются параметры текущего состояния среды.

При анализе действия кумулятивного заряда по горной породе, проводился сравнительный анализ слоя пород.

В модели пористой упругопластической среды, деформирование среды при динамическом нагружении описывается соотношениями  $P$ – $\alpha$ –модели Хермана–Кэрролла–Холта [4, 9, 10]. В данной модели зависимость давления в среде от удельного объема представляется в параметрическом виде посредством введения некоторого  $\alpha$ , характеризующего степень пористости породы, с помощью двух функций

$$P = f(\alpha, V, e) \quad \text{и} \quad \alpha = g(P).$$

Здесь  $V = 1/\rho$ ,  $V_s = 1/\rho_s$ , – удельный объем пористой и монолитной сред;  $e$  и  $\alpha = V/V_s = \rho_s/\rho$  – удельная внутренняя энергия и степень пористости среды.

Зависимость  $\alpha = g(P)$  определяется согласно выражению [4]

$$\alpha = 1 + (\alpha_x - 1) \left[ \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s - \rho_e} \right]^2, \quad (3)$$

где  $p$  – текущее давление;  $p_s$  – давление, определяющее переход материала из пористого в сплошное состояние;  $p_e$  – давление, определяющее переход пористого материала из упругого в пластическое состояние;  $\alpha_x$  – степень пористости, соответствующая давлению  $p_e$ . Для сплошного состояния в качестве уравнения состояния используется полиномиальная зависимость.

При сжатии

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\rho}{\rho_0} - 1 > 0, \\ \rho_s &= f_1(\mu, e) = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e. \end{aligned} \quad (4)$$

При растяжении

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{\rho}{\rho_0} - 1 < 0, \\ \rho_s &= f_2(\mu, e) = T_1 + B_0\rho_0 e. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $A_1=35,27$  ГПа,  $A_2=39,6$ ,  $A_3=9,04$ ,  $T_1=35,27$  ГПа,  $B_0=B_1=1,22$ .

Остальные параметры модели принимались следующими: начальная плотность среды  $\rho_0 = 2,25$  г/см<sup>3</sup>, плотность сплошной среды  $\rho_s = 2,75$  г/см<sup>3</sup>,  $C_0 = 2,92$  км/с,  $p_e = 0,0233$  ГПа,  $p_s = 6,0$  ГПа,  $G = 16,7$  ГПа. Прочность на сжатие горной породы принималась равной  $\sigma_{td} = 0,0375$  ГПа, прочность на растяжение –  $\sigma_p = 0,00375$  ГПа ( $\sigma_p / \sigma_{td} = 0,1$ ) ( $\sigma_p / \sigma_{td} = 0,1$ ), прочность на сдвиг –  $\sigma_s = 0,00675$  ГПа ( $\sigma_p / \sigma_{td} = 0,18$ ).

В качестве меры дробимости горной породы, использовалась величина наносимого ущерба  $D$ , рассчитываемая по формуле:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon^f}, \quad 0 \leq D \leq 1. \quad (6)$$

Здесь  $\Delta \varepsilon_p$  – накопленные пластические деформации,  $\varepsilon^f$  – предельные пластические деформации, при которых происходит разрушение хрупкого материала.

Величина предельных деформаций рассчитывается по формуле

$$\varepsilon^f = D_1 (p^* - p_{spall}^*)^{D_2} \geq \varepsilon_{min}^f, \quad (7)$$

где  $p^* = p / \sigma_p$ ;  $p_{spall}^* = \sigma_p / \sigma_{td}$ ;  $D_1 = 0,04$ ;  $D_2 = 1$  – параметры дробления;  $\varepsilon_{min}^f = 0,01$  – минимально возможная деформация разрушения горной породы. Согласно модели, прочностные параметры корректировались в соответствии с условием

$$Y^* = (1 - D)Y_s + DY_r. \quad (8)$$

Например

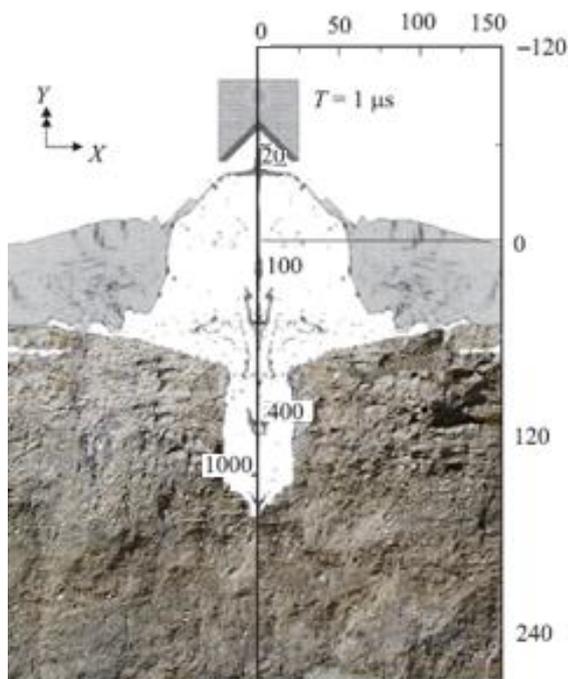
$$G^* = (1 - D)G_s + DG_r, \quad (9)$$

где  $G^*$  – скорректированное значение модуля сдвига;  $G_s = G$  – модуль сдвига

монолитного тела;  $G_r = G_{residual} = 0,13$  – остаточное значение.

Определены потенциальные возможности и изучены физические особенности функционирования кумулятивного заряда на разных фокусных расстояниях, по горной породе конечной мощности, а также сравнение результатов расчета по двум разным моделям с экспериментальными данными.

На рис. 4 представлена динамика развития взрывного взаимодействия кумулятивного заряда с горной породой.



**Рис. 4. Динамика развития взрывного взаимодействия кумулятивного заряда с горной породой**

Таким образом, проведено численное моделирование действия заряда ВВ с кумулятивным эффектом, позволившее разработать новую конструкцию скважинного заряда ВВ.

### Список литературы:

1. Воробьев В.В., Пеев А.М., Щетинин В.Т. Снижение динамического воздействия ударных волн на материал забойки скважинного заряда // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 6/2004(29). – С. 124 – 126.
2. Воробьев В.В., Пеев А.М., Славко Г.В. Изменение степени проработки подошвы уступа при взаимодействии зарядов с различной формой донной части // Науковий вісник гірничого університету: Науково–технічний журнал. – Дніпропетровськ. – 2005. – №3 (2005). – С. 31 – 33.
3. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – 3-е изд., исправленное. – В 2 т. – М.: Физматлит, 2004. – 488 с.
4. Колпаков В.И., Савенков Г.Г., Мазур А.С., Рудомёткин К.А. Численное моделирование функционирования удлиненного кумулятивного заряда по железобетонной преграде // Журнал технической физики. – Москва, 2015. – Том 85. – Вып. 1. – С. 3-10.
5. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 520 с.
6. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под ред. А.В. Герасимова. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2007. – 572 с.
7. Нох В.Ф. СЭЛ – совместный Эйлера-Лагранжев метод для расчета нестационарных двумерных задач // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 128–184.
8. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоиздат, 1991. – 1232 с.
9. Rebecca M., Leelavanichkul B., Leelavanichkul C. Survey of Four damage Models for Concrete // Sandia Report. SAND 2009–5544. 2009. 80 p.
10. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др. Высокоскоростное взаимодействие тел. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 600 с.