

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ К ОБОСНОВАНИЮ КОНСТРУКЦИЙ СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ

В. П. Куринной, И. П. Гаркуша

НТУ «Днепровская политехника»

просп. Д. Яворницкого, 19, г. Днепр, 49600, Украина.

E-mail: ntm@ntm.org.ua

Проведен анализ процессов, определяющих эффективность взрыва скважинного заряда и выполнена оценка затрат энергии на дробление, нагревание и выброс. Приводятся некоторые формулы для определения параметров волн в скважине. Получены неравенства, определяющие параметры поля напряжений, необходимого для управляемого разрушения и разупрочнения породы. Рассмотрены процессы, протекающие в инертном промежутке при взрыве. Показано, что в случае эмульсионных взрывчатых веществ скорость детонации должна быть больше скорости волн напряжений в породе. Установлено, что части скважинного заряда действуют относительно друг друга независимо.

Ключевые слова: взрыв, сильные волны сжатия, ударная волна, конструкции зарядов.

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДО ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ СВЕРДЛОВИНИХ ЗАРЯДІВ

В. П. Куринний, І. П. Гаркуша

НТУ «Дніпровська політехніка»

просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49600, Україна.

E-mail: ntm@ntm.org.ua

Розробку конструкції заряду необхідно починати з оцінки параметрів поля напруг у породі для одержання заданого результату. Ефективне дроблення та знеміцнення породи забезпечують заряди із багатоточковим ініціюванням і інертними проміжками. Вони створюють у породі неоднорідне, нестационарне поле напружень. Для зменшення зони змінання необхідні конструкції, що забезпечують мінімальне значення модуля градієнта напружень на контакті продуктів детонації - порода. Це заряди з повітряною або інертною оболонкою. Заряди з інертними проміжками також зменшують зону змінання в породі в проміжку. Для контурного вибуху швидкості зміни напружень і їхніх градієнтів повинні бути мінімальними. Для струшувального вибуху і збільшення газо- і водопроникності заряди повинні створювати в породі короткий імпульс вибуху тривалістю $t \leq 150$ мкс. Повітряні проміжки створюють у породі біля проміжку сильно неоднорідне поле напружень, у якому відбувається зріз породи. Вони добре проробляють підшву уступу. При використанні емульсійних вибухових речовин, їхня швидкість детонації повинна бути більше швидкості хвилі напруг у породі, щоб усунути обтиснення вибухової речовини. Так як основні процеси знеміцнення і руйнування породи протікають за перші соті мкс, то частини свердловинного заряду діють незалежно один від одного. Запропонований підхід дозволить розро-

бити більше ефективні конструкції свердловинних зарядів, що поліпшить якість підричних робіт і знизить витрати на використання дорогих вибухових речовин. Проведено аналіз процесів, що визначають ефективність вибуху свердловинного заряду і виконано оцінку витрат енергії на дроблення, нагрівання і викид. Отримано деякі формули для визначення параметрів хвиль у свердловині. Задано нерівності, що визначають параметри поля напружень, необхідного для керованого руйнування і знеміцнення породи. Розглянуто процеси, що протікають в інертному проміжку при вибуху. Показано, що у випадку емульсійних вибухових речовин швидкість детонації повинна бути більше швидкості хвиль напружень у породі. Встановлено, що частини свердловинного заряду діють відносно один одного незалежно.

Ключові слова: вибух, сильні хвилі стиснення, ударна хвиля, конструкції зарядів.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время при взрывной отбойке породы широко применяются сплошные скважинные заряды. Однако они имеют существенные недостатки. Поле напряжений зарядов преимущественно осесимметрично. Поэтому в средней зоне взрыва большой процент радиальных трещин, т.е. порода разупрочняется незначительно. Если учесть, что на механическое дробление и измельчение породы тратится 4,5 – 5 % всей вырабатываемой энергии, то разупрочнение при взрыве необходимо. Кроме этого, работа разрушения породы при неравнокомпонентном сжатии существенно больше работы при растяжении и срезе. Сплошные скважинные заряды не позволяют эффективно проводить сотрясательное и контурное взрывание. Достаточно трудно качественно проработать подошву уступа и снизить процент негабарита. При решении этих задач более эффективны заряды различных конструкций [1–6].

Для выбора оптимальной конструкции заряда и обоснования его параметров необходимо знать механизмы и параметры протекающих при взрыве процессов в скважине и породе. При разработке конструкций заряда часто не рассматриваются волновые процессы в скважине. Зачастую действие заряда определенной конструкции не объясняется достаточно адекватно. Например, основное действие заряда с воздушными промежутками объясняется снижением пикового давления в скважине, а при рассмотрении действия заряда с водными промежутками применяется закон Паскаля, который справедлив в гидростатике.

По-видимому, теоретический анализ процессов, протекающих при взрыве зарядов различных конструкций достаточно актуален, в первую очередь, для взрывников-практиков.

Цель работы – разработка теоретических предпосылок для обоснования наиболее эффективных конструкций скважинных зарядов.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В настоящее время точные значения параметров процессов практически невозможно получить. В уравнении адиабаты для продуктов детонации показатель адиабаты постоянная величина. Хотя известно, что он убывает (для тротила от 3 до 1,4). Уравнения для ударных волн получены с использованием закона сохранения импульса, кото-

рий применим, строго говоря, для материальных точек. Уравнения адиабаты взяты из равновесной термодинамики, когда время установления равновесного состояния пренебрежимо мало (скорость звука бесконечно большая). Точные значения пределов прочности породы при скоростях нагружения $10^8 - 10^{11}$ Па/с отсутствуют и т.д. В этом случае даже рассмотрение механизмов процессов и оценка величин их параметров допустима.

Давление продуктов детонации (ПД) в скважине (шпуре) можно оценить по формуле:

$$P_d(1 - b)^\gamma = P((r/r_0)^2 - b)^\gamma, \quad (1)$$

где P_d , P – соответственно давление в точке Жуге и при радиусе скважины (шпура) r ; b – коэффциент, отнесенный к 1 м^3 ПД при давлении P_d , γ – не зависящий от объема показатель адиабаты ($\gamma = n(1-b)$, где n – принятый показатель адиабаты). Для переменных (P , T), (V , T) и работы ПД формулы приведены в [7].

При рассмотрении процессов на начальной стадии взрыва (порядка 100 мкс с момента поступления детонационной волны в заданное сечение скважины) необходимо знать, возникает или нет ударная волна (УВ) в породе. Авторами статьи показано, что в скальных породах УВ возникает лишь при давлениях $P_s = 35-60$ ГПа, а в забойке и породах с малой скоростью волны напряжений и плотностью может возникнуть. Для подтверждения приведенных значений P_s можно сослаться на работу [8], где показано, что в граните при давлении 33 ГПа фиксируется только упругая волна. Наличие большого числа экспериментальных работ, в которых приводятся параметры УВ при давлениях, меньше P_s объясняется тем, что принято считать, что если скорость волны сжатия больше скорости упругой волны, то это УВ. Но скорость сильных волн сжатия (СВС) больше скорости упругой волны при атмосферном давлении. В сильных волнах сжатия порода течет, но отсутствует ударный скачок давления, плотности, скорости, температуры, энтропии и т.п. УВ испытывает силу сопротивления вещества, а СВС практически нет. При взрыве бризантных взрывчатых веществ (ВВ) начальные параметры УВ и СВС практически совпадают. Кроме этого, параметры СВС можно оценивать по формулам для УВ.

Параметры УВ в сухой забойке или инертном промежутке можно оценивать по формулам:

$$D = \sqrt{\frac{P}{\alpha \rho_0}} = \frac{u}{\alpha}, \quad u = \sqrt{\frac{P\alpha}{\rho_0}}, \quad P = \rho_0 u D = \frac{\rho_0 u^2}{\alpha} = \alpha \rho_0 D^2, \quad (2)$$

где D – скорость УВ; P – давление; u – массовая скорость вещества забойки; ρ_0 – плотность материала; α – часть объема, занимаемая воздухом.

Для обводненной забойки приведены формулы в [7]. Следует отметить, что в материале забойки УВ распространяется, но в твердых частицах забойки она не возникает.

В работе [9] рассмотрены разрушения породы в зоне смятия. Показано, что размер частиц d_1 , на которые разрушается порода, равен:

$$d_1 \approx \frac{\sigma_s}{dP/dr}, \quad (3)$$

где σ_s – предел прочности при срезе.

Минимальный размер частиц можно оценить по формуле:

$$d_1 = \frac{\sigma_s \tau c_l}{P_d}, \quad (4)$$

где τ – время химических реакций; c_l – скорость продольной волны напряжений.

При срезе породы, который происходит мгновенно, разгружаются тангенциальные напряжения. В радиальном направлении размер d_2 частиц можно оценить по формуле:

$$d_2 \approx \frac{\sigma_t}{dP/dr}, \quad (5)$$

где σ_t – предел прочности при растяжении.

С учетом формул (3), (5) можно записать неравенства, определяющие параметры поля напряжений, необходимого для заданной степени дробления и разупрочнения породы

$$\begin{aligned} \sigma_{min} < \sigma < \sigma_{max}; \quad \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t}\right)_{min} < \frac{\partial \sigma}{\partial t} < \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t}\right)_{max}; \\ |grad \sigma|_{min} < |grad \sigma| < |grad \sigma|_{max}, \quad \Delta t, \end{aligned} \quad (6)$$

где σ – соответствующие напряжения (сжимающие, растягивающие, сдвиговые); σ_{min} , σ_{max} – критические напряжения для роста трещин длиной от l_{min} до l_{max} при выбранном механизме разрушения; Δt – время существования величин в данных пределах. Из неравенств (6) вытекает, что поле напряжений должно быть неоднородным и нестационарным.

Для разупрочнения породы можно создавать поле достаточной интенсивности для роста трещин, а время его существования такое, что не происходит разделения породы на малые куски. При сотрясательном взрывании необходимо развить короткие трещины, которые разгружают массив, но чтобы длинные трещины выросли на относительно малую длину. При увеличении водо- и газопроницаемости массива с помощью взрыва, необходимо генерировать в породе короткий взрывной импульс большой амплитуды. Во всех случаях длительность взрывного импульса оцениваем, исходя из скорости роста трещин, которые необходимо развить.

Известно, что коэффициент использования энергии взрыва определяется зоной смятия. Действительно, если положить, что время химических реакций $\tau = 4$ мкс, давление $P_d = 5$ ГПа, а скорость волн напряжений в породе $c_l = 5,5$ км/с, то $P_d/\tau c_l = 2,27 \cdot 10^{11}$ Па/м. В зоне смятия эта величина убывает примерно на два порядка. При таком модуле градиента давления, размеры частиц в среднем будут меньше 1 мм. Если учесть, что в этой зоне энергия ПД рассеивается равномерно, в зависимости от расстояния до оси скважины, то легко показать, что интенсивность цилиндрической волны I убывает по формуле:

$$I = \frac{r_0}{r} I_0 e^{-\mu_1 r}, \quad (7)$$

где r_0 – радиус скважины; r – радиус фронта волны; I – интенсивность волны на расстоянии r от оси; I_0 – начальная интенсивность; μ_1 – линейный коэффициент поглощения, который убывает с расстоянием r .

Для сферической волны I равно:

$$I = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 I_0 e^{-\mu_2 r}. \quad (8)$$

Формулы (7), (8) справедливы лишь в зоне смятия. При появлении отдельных трещин, волны разгрузки от них усложняют картину. При распространении СВС в первую очередь уменьшается крутизна импульса взрыва.

Оценим потери энергии на нагревание породы в зоне смятия. Пусть теплота взрыва ВВ $q = 4$ МДж/кг; плотность ВВ $\rho_{\text{в}} = 1100$ кг/м³; скорость волны напряжений в породе $c_l = 5700$ м/с, плотность породы $\rho_{\text{п}} = 2600$ кг/м³. Энергия ВВ, приходящаяся на 1 м скважины равна

$$\left(\frac{Q}{h}\right)_{\text{в}} = q \cdot \rho_l \pi r_0^2. \quad (9)$$

В работе [10] получена формула зависимости радиуса скважины от времени при мгновенной детонации. Через время t с начала расширения скважины фронт сильной волны сжатия будет иметь радиус r (при реальной детонации r будет больше), а радиус скважины r_0 . Масса породы (отнесенной к 1 м), охваченной волной, равна:

$$\frac{m}{h} = \pi \left(\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - 1 \right) r_0^2 \rho_{\text{п}}, \quad (10)$$

а количество теплоты, необходимой для нагревания ее на Δt^0 , равно:

$$\frac{Q}{h} = \pi c \rho_{\text{п}} r_0^2 \left(\left(\frac{r}{r_0}\right)^2 - 1 \right) \Delta t, \quad (11)$$

где c – удельная теплоемкость породы.

Для сравнения энергии ПД и теплоты нагревания, в качестве примера взято минимальное давление для бризантных ВВ $P_{\text{б}} = 4$ ГПа, $c = 311$ Дж/кгК, а радиус скважины $r_0 = 0,125$ м. При подстановке значений величин получим $\left(\frac{Q}{V}\right)_{\text{в}} = 2,16$ МДж/м. Количество теплоты, выделившейся в зоне смятия по истечению 50 мкс при нагревании породы на $20^0 - 80^0$, равно 33 – 130 МДж/м. Когда время равно 75 мкс, то для нагревания породы на $20^0 - 40^0$ необходимо 84 – 167 МДж/м. Таким образом, можно заключить, что в зоне смятия основные потери энергии ПД приходятся на нагревание породы. Кроме этого, отдельные части зарядов

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

действуют независимо от других. Действительно, за время 200 мкс ДВ проходит расстояние 0,9 м (при $D = 4500$ м/с), т.е. действием части заряда, находящейся на 1 – 1,5 м от, например, промежутка, можно пренебречь.

При поступлении УВ в промежуток (забойку), содержащий твердые частицы, ширина фронта УВ как минимум на порядок больше, чем в гомогенном материале. Это связано с тем, что в твердых частицах промежутка УВ не возникает. Ширина фронта УВ в промежутке размывается. На промежуток действуют сила трения и ПД. Сила трения F_f равна:

$$F_f = \mu P_s 2\pi r l, \quad (12)$$

где μ – коэффициент трения; P_s – давление в УВ; l – расстояние, пройденное волной; r – радиус поверхности скольжения.

Продукты детонации начинают действовать с силой $F_d = P_s \pi r_0^2$. Сравнивая формулы для сил, можно заключить, что на начальном этапе ($t_1 \ll r_0/c_s$, где c_s – скорость фронта волны разрежения в ПД, при $r_0 = 0,125$ м, $t_1 \approx 36$ мкс) забойка скользит по поверхности скважины. Через время $t_2 \geq t_1$, благодаря увеличению радиуса скважины и волне разгрузки в промежутке, осевая часть промежутка приобретает большую скорость. Когда забойка неоднородна по плотности (содержит куски породы), то промежуток неустойчив. Время его распада, по порядку величины, равно времени прохождения УВ по промежутку. Когда на равном расстоянии от промежутка расположены боевики, то промежуток наиболее устойчив. В процессе взрыва инертные промежутки генерируют существенно более короткий взрывной импульс. Это объясняется тем, что в ударной сжимаемости воды и скальной породы показатели степени соответственно равны 7,15 и 4.

Водный промежуток отличается тем, что ширина фронта УВ в воде меньше мкм и значение градиента давления чрезвычайно велико, т.е. основная энергия инертного промежутка расходуется в зоне смятия.

В работе [6] рассмотрены волновые процессы, протекающие при взрыве заряда с воздушным промежутком. Показано, что за первые 0,3 мс давление в промежутке примерно на порядок меньше, чем среднее в скважине, т.е. в породе у промежутка действуют интенсивные сдвиговые напряжения. По отзывам к.т.н. Швыдька П.В, при массовых взрывах в Запорожье заряды с воздушными промежутками, у линии подошвы уступа, позволяют хорошо проработать подошву.

Когда между стенкой скважины и ВВ присутствует воздушный зазор, то градиент давления у стенки скважины уменьшается в несколько раз (при зазоре 2 см примерно в 4 раза).

При взрыве водоземлюсионного ВВ в породе со скоростью волны напряжений больше скорости детонации, волны в породе обгоняет детонационную волну. Происходит сжатие ВВ, в первую очередь, за счет воздуха во взрывчатом веществе. Количество «горячих точек» будет сокращаться и детонация будет не полной.

ВЫВОДЫ. Разработку конструкции заряда необходимо начинать с оценки параметров поля напряжений в породе для получения заданного результата.

Эффективное дробление и разупрочнение породы обеспечивают заряды с многоточечным иницированием и инертными промежутками. Они создают в породе неоднородное, нестационарное поле напряжений. Для уменьшения зоны смятия необходимы конструкции, обеспечивающие минимальное значение модуля градиента напряжений на контакте ПД – порода. Это заряды с воздушной или инертной оболочкой. Заряды с инертными промежутками также уменьшают зону смятия в породе у промежутка. Для контурного взрывания скорости изменения напряжений и их градиенты должны быть минимальными. Для сотрясательного взрывания и увеличения газо- и водопроницаемости заряды должны создавать в породе короткий импульс взрыва длительностью $t \leq 150$ мкс. Воздушные промежутки создают в породе у промежутка сильно неоднородное поле напряжений, в котором происходит срез породы. Они хорошо прорабатывают подошву уступа. При использовании эмульсионных ВВ, их скорость детонации должна быть больше скорости волны напряжений в породе, чтобы устранить обжатие ВВ. Так как основные процессы разупрочнения и разрушения породы протекают за первые сотни мкс, то части скважинного заряда действуют независимо друг от друга. Предложенный подход позволит разработать более эффективные конструкции скважинных зарядов, что улучшит качество взрывных работ и снизит затраты на использование дорогостоящих взрывчатых веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ракшиев Б.Р., Ракшиева З.Б., Ауэзова А.М. Скорости и время расширения цилиндрической взрывной полости в массиве горных пород. *Взрывное дело № 111/68*. М.: МВК по ВД при АГН, 2014. С. 3–17.
2. Одинцев В.Н. Оценка влияния давления во взрывной полости на предразрушение горных пород. *Взрывное дело № 115/72*. М.: МВК по ВД при АГН, 2016. С. 5–17.
3. Дугарцыренов А.В. К механизму разрушения упругой среды (горной породы) при взрыве сосредоточенного и удлиненного зарядов. *ГИАБ*. 2008. № 3. С. 12–17.
4. Воробьев В.В., Помазан М.В., Воробьева Л.Д. Оценка динамического воздействия газокумулятивного потока на дно скважины при взрыве удлиненного заряда. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Кременчук: КрНУ, 2016. Вип. 1(17). С. 28–38.
5. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Куринной В.П. Пути повышения эффективности передачи энергии взрыва горным массивам с учетом соотношения физических свойств ВВ и пород. *Информационный бюллетень Украинский союз инженеров взрывников*. 2015. № 3 (28). С. 9–11.
6. Чебенко В.Н., Козловская Т.Ф., Комир В.М. Об особенностях изменения параметров детонации при взрывчатых превращениях различных ВВ. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Кременчук: КрНУ, 2009. Вип. 1(3). С. 7–13.
7. Куринной В.П., Гаркуша И.П. Об уравнении адиабаты для продуктов детонации ВВ. *«Деформирование и разрушение материалов с дефектами и дина-*

мические явления в горных породах и выработках»: материалы XXII Международной конференции им. С.А. Христиановича. Симферополь: ТНУ, 2012. С. 193–196.

8. Физика взрыва: научное пособие / под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3. Т.1. М.: Физматлит, 2002. 832 с.

9. Куринной В.П., Гаркуша И.П., Никифорова В.А. Теоретические исследования процессов на начальной стадии расширения зарядной полости скважинного заряда. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. Кременчук: КрНУ, 2017. Вип. 19. С. 21–27.

10. Kurinnoy V.P., Garkusha I.P., Nikiforova V.A. Processes of initial state explosion of cavity of explosion of mining hole charge. *Науковий вісник НГУ*. 2016. № 6. Р. 49–54.

THEORETICAL PREMISE TO RATIONAL OF THE BOREHOLE CHARGES CONSTRUCTIONS

V. Kurinnoy, I. Garkusha

NSU "Dnieper polytechnics"

prosp. Dmytro Yavotnytsky, 19, Dnipro, 49005, Ukraine. E-mail: nmu@nmu.org.ua

Purpose. To develop theoretical premise to rational most effective borehole charges constructions. **Methodology.** The analytical method of research based on fundamental positions solid medium mechanics was applied. **Results.** In the article shown, that development of the charge construction must begin with the evaluation of the stress field parameters in the rock to obtain a given result. Effective crushing and softening of the rock provides charges with multipoint initiation and inert gaps. It creates in the rock an inhomogeneous, nonstationary stress field. To reduce the collapsing zone, structures are needed that ensure the minimum value of the stress gradient modulus at the contact the “detonation products – rock”. These are charges with an air or inert envelope. Charges with inert gaps also reduce the zone of crushing in the rock near the gap. For a contour explosion, the velocity of stresses change and their gradients should be minimal. For shaking explosions and increasing gas and water permeability, charges should create a short pulse in the rock with a duration $t \leq 150 \mu\text{s}$. Air gaps create in the rock at the gap a highly inhomogeneous stress field in which the rock cuts off. It's well bench button working. When using emulsion explosives, their detonation velocity should be greater than the stress wave velocity in the rock in order to eliminate the compression of explosives. Since the main processes of softening and fracture of the rock occur in the first hundreds of microseconds, the parts of the borehole charge act independently of each other. **Practical value.** The proposed approach will allow to develop most effective borehole charges constructions, that will improve quality blasting operations and reduce expenses for used of costly explosives. **Conclusions.** The analysis of the processes determining the efficiency of a well charge explosion was carried out. The estimation of expenses of energy on crushing, heating and emission is made. Some formulas are given for determining of the waves in the borehole parameters. The inequalities that determine the parameters of the stress field necessary for controlled fracture and softening of the rock are given. The processes occur-

ring in the inert gap during the explosion are considered. It is shown that with the case of emulsion explosives, the detonation velocity must be greater than the velocity of stress waves in the rock. It is obtained that parts of the borehole charge act independently relative to each other.

Key words: explosion, strong compression waves, shock wave, charge structures.

REFERENCES

1. Rakshiev, B.R., Rakshieva, Z.B. Auezova, A.M. (2014), “Speeds and time of a cylindrical explosive cavity expansion in a file of rocks”, *Vzrivnoe delo, No 111/68*, Moscow, Russia, pp. 3–17.

2. Odintsev, V.N. (2016), “The estimation of pressure influence in an explosive cavity on destruction of rocks”, *Vzrivnoe delo, No 115/72*, Moscow, Russia, pp. 5–17.

3. Dugaryntsev, A.V. (2008), “To the mechanism of destruction of the elastic medium (rock) at explosion of the concentrated and extended charges”, *GIAB*, no 3, pp. 12–17.

4. Vorobyov, V.V., Pomazan, M.V. Vorobyova, L.D. (2016), “Evaluation of the dynamic effect of a gas-cumulative stream on the bottom of a well in the explosion of an elongated charge”, *Suchasni resursoenergozberigauchi tehnologiyi girnichogo virobnitstva*, vol. 1, no. 17, pp. 28–38.

5. Efremov, E.I., Nikiforova, V.A. Kurinnoy, V.P. (2015), “Ways to increase the efficiency of energy transfer of explosion to mountain massifs taking into account the correlation of physical properties of explosives and rocks”, *Informatsionnyi biuleten Ukrainskiy soyuz ingenerov vzrivnikov*, vol. 3, no. 28, pp. 9–11.

6. Chebenko, V.N., Kozlovskaya, T.F. Komir, V.M. (2009), “On the features of the change in detonation parameters during explosive transformations of various explosives”, *Suchasni resursoenergozberigauchi tehnologiyi girnichogo virobnitstva*, vol. 1, no. 3, pp. 7–13.

7. Kurinnoy, V.P. Garkusha, I.P. (2012), “About the equation of an adiabatic curve for products detonation of explosives”, *Deformirovaniye I razrusheniye materialov s defektami I dinamicheskiye yavleniya v gornyh porodah I vyrabotkah: Materialy XX Mezhdunarodnoy nauchnoy shkoly im. akademika S.A. Khristianovicha*, Simferopol, Ukraine, pp. 193–196.

8. Ed. by Orlenko L.P. (2002), *Physica vzryva* [Physics of explosion. Ed. 3rd], in 1 vol. Phizmatlit, Moscow, Russia.

9. Kurinnoy, V.P., Garkusha, I.P. Nikiforova, V.A. (2017), “Theoretical studies of processes at the initial stage of the expansion of the charge cavity of a borehole charge”, *Suchasni resursoenergozberigauchi tehnologiyi girnichogo virobnitstva*, vol. 1, no. 19, pp. 21–27.

10. Kurinnoy, V.P., Garkusha, I.P. Nikiforova, V.A. (2016), “Processes of initial state explosion of cavity of explosion of mining hole charge”, *Naukovy visnik NGU*, no. 6, pp. 49–54.

Стаття надійшла 03.05.2018.