

© М.М. Кононенко¹, О.Є. Хоменко¹, І.Л. Коваленко², І.Г. Миронова¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

² ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», Дніпро, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ГУСТИНИ ТА ШВИДКОСТІ ДЕТОНАЦІЇ ЕМУЛЬСІЙНИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН

© M. Kononenko¹, O. Khomenko¹, I. Kovalenko², I. Myronova¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

² Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

EXAMINATION OF DENSITY AND DETONATION VELOCITY OF EMULSION EXPLOSIVES

Мета. Розробити методику розрахунку зміни густини емульсійних вибухових речовин (ЕВР) за довжиною колонки заряду під дією гідростатичного тиску при різних кутах нахилу свердловин і дослідження зміни швидкості детонації вздовж заряду.

Методика дослідження. За допомогою загальновідомих законів гідростатики та ідеального газу розроблено методику розрахунку перерозподілу густини наливних ЕВР, що сенсибілізовані газовими порами, при різних кутах нахилу свердловин. Регресійним аналізом встановлено емпіричні закономірності зміни густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 за довжиною колонки заряду. Реостатним методом проведені виміри швидкості детонації ЕВР Україніт-ПП-2 в залежності від діаметру та густини заряду. За допомогою запропонованої методики та встановлених закономірностей виконано дослідження зміни швидкості детонації ЕВР у свердловинах з різним кутом нахилу.

Результати дослідження. Розроблено методику розрахунку зміни густини ЕВР, що сенсибілізовані газовими порами, за довжиною колонки заряду, яка дозволяє визначити густину вибухівки під дією гідростатичного тиску при різних кутах нахилу висхідних і низхідних свердловин. Отримано загальну квадратичну закономірність зміни густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 в залежності від початкової густини вибухівки, довжини заряду та кута нахилу свердловини. На підставі експериментальних даних встановлено степеневі закономірності зміни швидкості детонації в залежності від густини та діаметру заряду ЕВР Україніт-ПП-2, що дозволяє керувати густиною та швидкістю детонації при відбиванні руд.

Наукова новизна. У сформованій колонці заряду початкова густина наливної ЕВР Україніт-ПП-2 під дією гідростатичного тиску змінюється за квадратичною закономірністю в залежності від її довжини та кута нахилу свердловини, що дозволяє за степеневою закономірністю зміни швидкості детонації визначати місце розташування патронів-бойовиків і розробити конструкції зарядів у свердловинах.

Практичне значення. Результати досліджень дозволили встановити раціональну початкову густину ЕВР Україніт-ПП-2 для відбивання руд свердловинами, що становить 800 – 1000 кг/м³, при якій зберігається швидкість детонації за довжиною колонки заряду при різних кутах нахилу свердловин. Використання результатів розрахунку густини ЕВР Україніт-ПП-2 при різних кутах нахилу свердловин дозволяє визначити ділянки у колонці заряду з її критичними значеннями у понад 1410 кг/м³, при яких розпочинається різке згасання швидкості детонації.

Врахування цього негативного явища дозволяє запобігати виникненню відмов при висадженні зарядів у свердловинах при відбиванні руд.

Ключові слова: *емульсійні вибухові речовини, густина, швидкість детонації, довжина заряду, свердловина*

Вступ. Застосування вибухових речовин (ВР) у гірництві має свою історію. При відкритті нових вибухових хімічних сполук проводилося впровадження їх у гірничу промисловість. Підвищення вимог до безпеки проведення підривних робіт призвело до створення ряду промислових вибуховок на основі аміачної селітри, які застосовуються для відбивання та подрібнення твердих корисних копалин. Після створення ЕВР у 1961 році, а також розробки та удосконалення їх властивостей і характеристик [1], у всьому світі почалося їх широкомасштабне впровадження, як при відкритій розробці, так і при підземному видобуванні корисних копалин [2]. У порівнянні з ВР, що містять тротил, ЕВР є більш безпечними, як при використанні, так і при перевезенні та зберіганні, а також дозволяють знизити витрати на підривні роботи [3]. Ще одною перевагою ЕВР є їх екологічність [4, 5], яка пов'язана з малим техногенним впливом продуктів вибуху на атмосферу [6, 7]. Так для зниження негативного впливу підривних робіт на навколишнє середовище, всі залізородні підприємства України з відкритим способом розробки (кар'єри) перейшли на ЕВР [8]. Активне впровадження технології ведення підривних робіт за допомогою ЕВР вітчизняного виробництва типу «Україніт», що було розпочате на кар'єрах ще у 2003 році, призвело до логічного бажання дослідників і виробничників застосувати цю ж технологію і на підприємствах з видобування руд підземним способом. Але проста заміна тротилової ВР на ЕВР без зміни технології проведення підривних робіт є неприйнятною. Основними причинами цього є обмежені розміри гірничих виробок, в яких необхідно розмістити зарядне обладнання, якого на той час ще не існувало. Довжина колонки заряду ВР у підземних умовах в 3 – 4 рази більше у порівнянні з відкритою розробкою, але з меншим діаметром свердловин. І найважливіше – це те, що у підземних умовах при підривних роботах необхідно здійснювати заряджання, як висхідних, так і низхідних свердловин, які можуть розташовуватися, як за паралельною, так і за віяловою схемами. Це розробка високов'язких складів ЕВР, засобів утримання патронів-бойовиків у свердловинах, анти піритні добавки для ЕВР та багато іншого.

При заряджанні свердловин довжиною до 55 м, зростає гідростатичний тиск, що збільшує густину ЕВР у нижній частині зарядів, за рахунок зменшення розмірів газових пор. Зі збільшенням густини ЕВР відбувається зниження її чутливості, а детонаційна хвиля стає нерівномірною і переривчастою, аж до повного її згасання. Це призводить до відмов зарядів, ліквідація яких вимагає великих матеріальних і технічних витрат, а також складних заходів з безпеки праці. Тому дослідження зміни детонаційних характеристик ЕВР при заряджанні як висхідних, так і низхідних свердловин при різних схемах відбивання руди є актуальним завданням, яке дозволить визначити параметри заряджання та

забезпечить високу якість подрібнення руди, а також знизить собівартість її відбивання.

Постановка завдання. З практичного досвіду відомо, що відбивання руди свердловинами застосовується при розробці покладів потужністю понад 5 м незалежно від їх кута падіння та міцності рудного масиву при підповерхово- та поверхово-камерних системах розробки, системах підповерхового та поверхового обвалення, підповерхово- та поверхово-камерних системах розробки із закладанням виробленого простору [9]. Від обраної конструкції системи розробки, а також її особливостей, відбивання руди здійснюється на горизонтальний, вертикальний вільний простір або у «затисненому» середовищі горизонтальними, похилими й вертикальними шарами. Для цього застосовують паралельну, віялову, паралельно-пучкову та віяло-пучкову схеми розташування свердловин [10].

Аналіз технологічних схем ведення очисних робіт, що подано у роботі [11], а також проектно-технічної документації, дозволило встановити, що для відбивання залізних руд на шахтах України використовується віялова схема розташування свердловин. Умови використання паралельної або паралельно-пучкової схем розташування свердловин вельми обмежено із-за низки недоліків перед віяловою, яка на сьогодні набула найбільшого поширення. В основному ці дві схеми застосовуються для утворення вертикального компенсаційного простору, тобто відрізної щілини. Також встановлено, що рудними шахтами Криворізького басейну, для відбивання залізної руди використовуються висхідні віяла свердловин, а в умовах ПрАТ «ЗЗРК» – кругові віяла. Тому науково-виробничий інтерес представляє дослідження зміни густини та маси заряду наливної емульсійної вибухівки Україніт-ПП-2 за довжиною колонки заряду при різних кутах нахилу, як висхідних, так і низхідних свердловин, який коливається у межах від -90° до $+90^\circ$.

Аналітичними дослідженнями зміни густини ЕВР у свердловинах займалися Горінов С.А., Іляхін С.В., Маслов І.Ю., Оверченко М.М., Синіцин В.О., Фокін В.О. та ін., за результатами яких були розроблені математичні моделі визначення зміни густини ЕВР за довжиною вертикальної колонки заряду з урахуванням гідростатичного тиску. Так, Синіцин В.О., Меньшиков П.В. і Шеменев В.Г. у 2016 році запропонували методику розрахунку густини ЕВР, що сенсифілізована газовими порами, за довжиною низхідного свердловинного заряду [12]. Але ця запропонована методика не враховує зміну величини гідростатичного тиску при різних кутах нахилу колонки заряду ЕВР. За результатами аналітичних досліджень Брагінін П.О., Горіновим С.О., Масловим І.Ю., Іляхіним С.В. та Оверченко М.М. [13] у 2015 році запропоновано методику розрахунку розподілу густини у зарядах ЕВР, що сенсифілізована газовими порами, за висотою колонок зарядів у низхідних і висхідних свердловинних. За цією методикою встановлено, що при низхідних зарядах довжиною понад 30 м потрібно враховувати їх термоусадку. Перевагою методики слугує розрахунок зміни густини ЕВР за довжиною колонки заряду для висхідних і низхідних свердловин при різних кутах нахилу. Основним недоліком запропонованої методики є дуже великий масив вихідних даних та складний алгоритм розрахунку. Експериментальними і розрахунковими

даними [14], встановлено, що максимальна швидкість детонації та працездатність прийнятої ВР досягається при певній щільності (густині) заряджання. Тому виникає необхідність у дослідженні зміни густини та швидкості детонації ЕВР за довжиною колонки заряду при різних кутах нахилу свердловин.

Методика досліджень. Метою досліджень є розробка методики розрахунку зміни густини ЕВР за довжиною колонки заряду під дією гідростатичного тиску при різних кутах нахилу свердловин та дослідження зміни швидкості детонації вздовж заряду. Методика дослідження зміни густини та швидкості детонації ЕВР за довжиною колонки заряду містило наступні етапи:

- розробка розрахункової схеми та нової аналітичної методики розрахунку зміни густини та маси ЕВР у свердловині при різних кутах її нахилу;
- регресійний аналіз результатів розрахунку густини ЕВР Україніт-ПП-2 за довжиною колонки заряду при різних кутах нахилу свердловин;
- проведення експериментів та результати виміру швидкості детонації наливної ЕВР Україніт-ПП-2 у полігонних умовах;
- встановлення закономірностей зміни швидкості детонації в залежності від густини ЕВР та діаметру заряду;
- дослідження зміни швидкості детонації за довжиною заряду.

Розробку методики розрахунку зміни густини та маси ЕВР у свердловині при різних кутах її нахилу під дією гідростатичного тиску виконували за допомогою загальновідомих законів гідростатики та ідеального газу. Експериментальні виміри швидкості детонації ЕВР виконували реостатним методом фіксації швидкості детонації за зміною опору довжини дільниці заряду ЕВР у натурних умовах за допомогою вимірювального комплексу MicroTrap.

Виклад основного матеріалу. Розробка методики розрахунку зміни густини ЕВР, що сенсibilізовані газовими порами, за довжиною колонки заряду при різних кутах нахилу свердловин виконували згідно розрахункової схеми, що подана на рис. 1.

Для розрахунку густини ЕВР на розрахунковій глибині за довжиною колонки заряду у свердловині, треба задати фіксоване значення гідростатичного тиску стовпа ЕВР довжиною (висотою) Δl_i

$$\Delta P = \rho_{EVP} \cdot g \cdot \Delta l_i \cdot 10^{-6}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

де Δl_i – довжина (висота) шару ЕВР, що збільшує гідростатичний тиск на фіксоване значення, м; ρ_{EVP} – густина наливної ЕВР при фіксованому гідростатичному тиску, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, що дорівнює 9,81 м/с².

Згідно розрахункової схеми (рис. 1), тиск при якому буде знаходитися шар ЕВР за довжиною колонки заряду, з урахуванням кута нахилу свердловини до горизонтальної площини

$$P_{x(i)} = P_{x(i-1)} + \Delta P \cdot \sin \varphi, \text{ МПа}, \quad (2)$$

де φ – кут нахилу свердловини до горизонтальної площини, що змінюється у межах 0° – 90°;

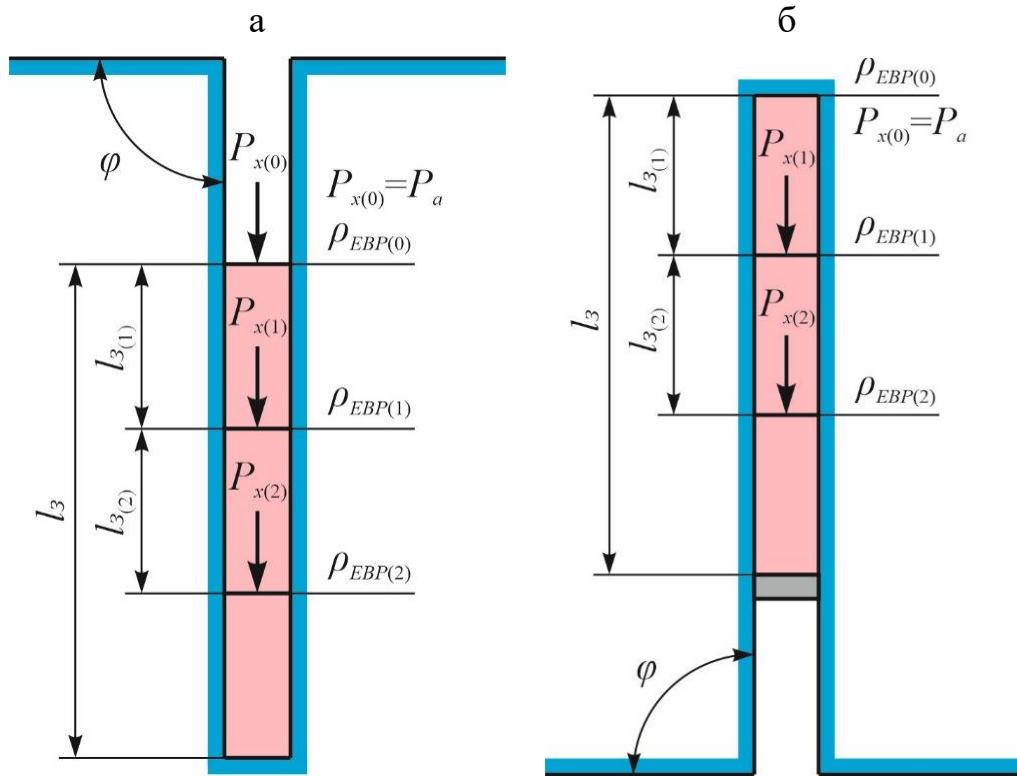


Рис. 1. Розрахункова схема до визначення густини ЕВР за довжиною колонки заряду в низхідних (а) і висхідних (б) свердловинах

Так, як емульсія складається з флюїдів, що не змішуються, тому максимальну густину можна розрахувати через питомі об'єми, що займає кожен з флюїдів у емульсії [12]. При атмосферному тиску $P_a = P_{x(0)}$:

– питомий об'єм емульсії у ЕВР

$$V_{EM} = \frac{1}{\rho_{EM}}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (3)$$

де ρ_{EM} – густина емульсії, $\text{кг}/\text{м}^3$.

– питомий об'єм газових включень у ЕВР

$$V_{\Gamma(0)} = \frac{1}{\rho_{EBP(0)}} - \frac{1}{\rho_{EM}}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (4)$$

де $\rho_{EBP(0)}$ – густина наливної ЕВР при атмосферному тиску, тобто густина вибухівки на виході зі шлангу зарядної машини, $\text{кг}/\text{м}^3$;

На шар ЕВР з розрахунковим кроком Δl_i за довжиною колонки заряду у зарядній порожнині діє гідростатичний тиск, при цьому об'єм емульсії не змінюється (рідина не стискається) $V_{EM} = const$, а загальний об'єм газових включень зменшиться до $V_{\Gamma(i-1)}$. Тоді згідно закону Бойля-Маріотта

$$V_{\Gamma(i)} = \frac{P_{x(i-1)} \cdot V_{\Gamma(i-1)}}{P_{x(i)}}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (5)$$

Густина наливної ЕВР у розрахунковій довжині Δl_i

$$\rho_{EVP(i)} = \frac{1}{V_{EM} + V_{\Gamma(i)}}, \text{ кг/м}^3. \quad (6)$$

Середня густина ЕВР у розрахунковій довжині Δl_i

$$\rho_{срEVP(i)} = \frac{\rho_{EVP(i-1)} + \rho_{EVP(i)}}{2}, \text{ кг/м}^3. \quad (7)$$

З формули (1) довжина шару ЕВР, у якому збільшиться гідростатичний тиск на фіксовану величину ΔP

$$\Delta l_i = \frac{\Delta P \cdot 10^6}{\rho_{срEVP(i)} \cdot g}, \text{ м.} \quad (8)$$

Довжина колонки заряду при гідростатичному тиску $P_{x(i)}$

$$l_{z(i)} = l_{z(i-1)} + \Delta l_i, \text{ м.} \quad (9)$$

Маса ЕВР у заряді довжиною l_i при гідростатичному тиску $P_{x(i)}$

$$m_i = m_{(i-1)} + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \Delta l_i \cdot \rho_{срEVP(i)}, \text{ кг,} \quad (10)$$

де d – діаметр свердловини, м.

Запропонована методика призначена для розрахунку густини та маси ЕВР, що сенсibilізована газовими порами, за довжиною колонки заряду при різних кутах нахилу, як висхідних, так і низхідних свердловин. Результати розрахунку густини ЕВР за новою методикою порівнювали з результатами, що отримано Брагіним П.О., Горіновим С.О., Масловим І.Ю., Іляхіним С.В., Оверченко М.М., Синіциним В.О., Меньшиковим П.В. і Шеменевим В.Г. у 2015 – 2016 рр. [12, 13]. Розбіжність результатів розрахунку для різних ЕВР коливається у межах від 1 до 8%, що вказує на високу збіжність отриманих результатів. Врахування величини густини ЕВР дозволяє дослідити зміни швидкості детонації за довжиною заряду наливної ЕВР Україніт-ПП-2.

За допомогою запропонованої методики виконаємо розрахунок густини для наливної ЕВР Україніт-ПП-2 за наступними вихідними даними: густина емульсії $\rho_{EM} = 1500 \text{ кг/м}^3$, початкова густина ЕВР $\rho_{EVR(0)} = 800, 950 \text{ і } 1100 \text{ кг/м}^3$, величина атмосферного тиску $P_a = 0,1013 \text{ МПа}$, прийняте фіксоване значення гідростатичного тиску $\Delta P = 0,01 \text{ МПа}$, кут нахилу свердловини $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ \text{ і } 90^\circ$. У якості прикладу розглянемо зміну густини та маси за довжиною колонки заряду наливної ЕВР Україніт-ПП-2, що сенсibilізована газовими порами, яку розміщено у свердловині з різними кутами нахилу, подано на рис. 2.

Аналіз результатів розрахунку зміни густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 на виході зі шлангу зарядної машини, що дорівнювали $800 \text{ і } 950 \text{ кг/м}^3$, яка формується за довжиною заряду при куті нахилу свердловин від 0° до 90° при довжині

колонки заряду до 55 м, можна зробити висновок, що густина сформованого заряду ЕВР не перевищує 1410 кг/м^3 . Це вказує на нормальну швидкість детонації.

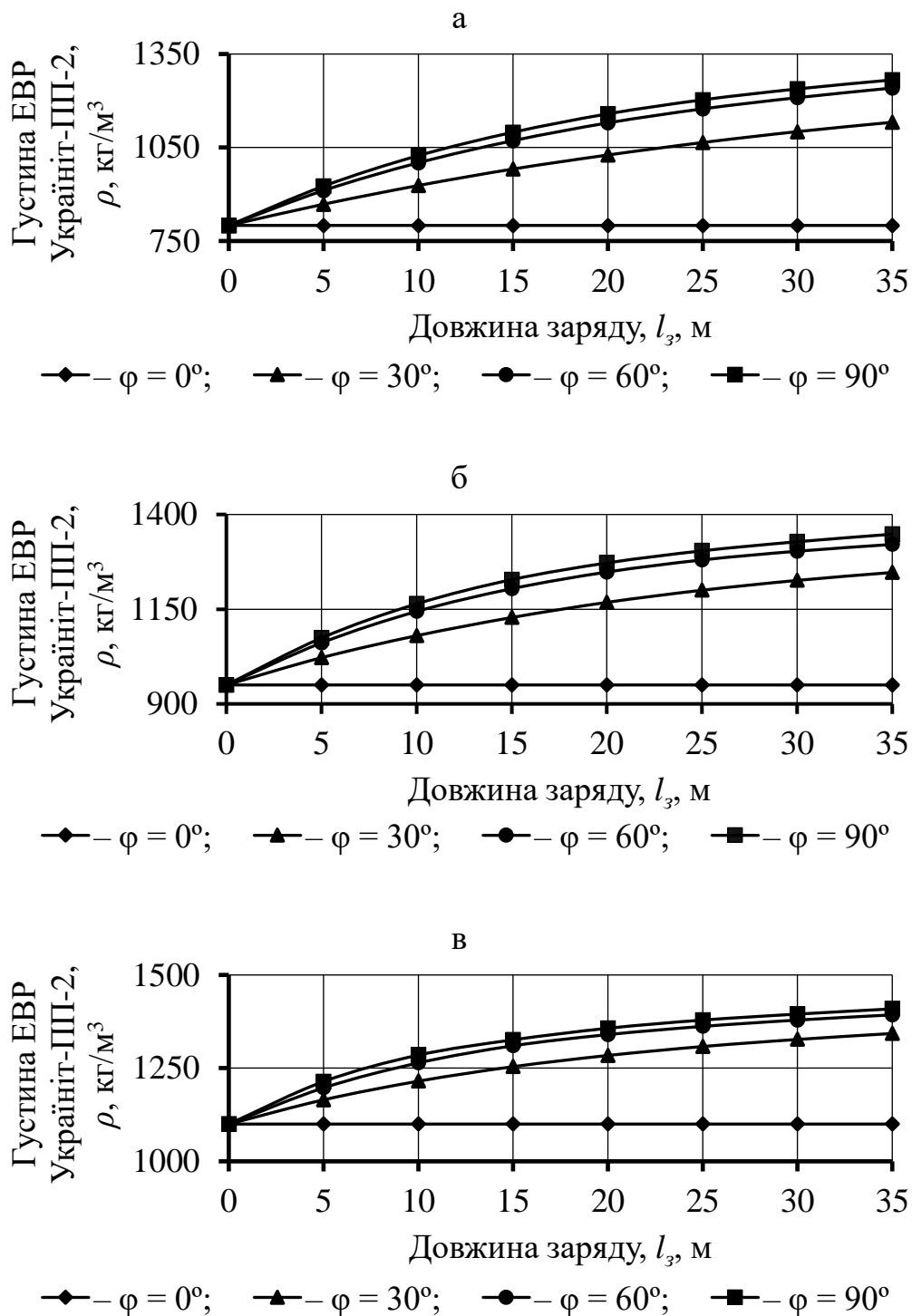


Рис. 2. Графік залежності зміни густини наливної ЕВР Українїт-ПП-2 за довжиною колонки заряду від кута нахилу свердловини при початковій густині 800 (а), 950 (б) і 1100 (в) кг/м^3

Із зміною густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 на виході зі шлангу зарядної машини, яка дорівнювала 1100 кг/м^3 , густина сформованого заряду ЕВР при довжині колонки заряду більше 35 м і кутах нахилу свердловин $60^\circ - 90^\circ$ починає перевищувати значення критичної густини у 1410 кг/м^3 . Це вказує на те, що на даній ділянці заряду буде знижуватися швидкість детонації аж до її згасання. Тому при виконання очисних робіт, що пов'язані з відбиванням руди віялами свердловин, для забезпечення проектних показників підривання необхідно використовувати початкову густина ЕВР Україніт-ПП-2, при заряджанні як висхідних, так і низхідних свердловин, у межах $800 - 1100 \text{ кг/м}^3$.

Провівши апроксимацію максимальних значень (див. рис. 2) було отримано емпіричні формули розрахунку зміни густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 за довжиною заряду для різних кутів нахилу свердловин при густині на виході зі шлангу зарядної машини:

– 800 кг/м^3

$$\rho = 2,9 \cdot \varphi^{0,4} \cdot l_3 - 0,01 \cdot \varphi^{0,6} \cdot l_3^2 + 0,9 \cdot \varphi + 800, \text{ кг/м}^3; \quad (11)$$

– 950 кг/м^3

$$\rho = 2,75 \cdot \varphi^{0,35} \cdot l_3 - 0,01 \cdot \varphi^{0,55} \cdot l_3^2 + 0,8 \cdot \varphi + 950, \text{ кг/м}^3; \quad (12)$$

– 1100 кг/м^3

$$\rho = 2,6 \cdot \varphi^{0,3} \cdot l_3 - 0,01 \cdot \varphi^{0,5} \cdot l_3^2 + 0,7 \cdot \varphi + 1100, \text{ кг/м}^3, \quad (13)$$

де φ – кут нахилу свердловини, який змінюється у межах $0^\circ - 90^\circ$; l_3 – довжина колонки заряду, для низхідних свердловин розраховується від устя до вибою свердловини, а у висхідних свердловин – від вибою убік устя свердловини, яка змінюється у межах $0 < l_3 \leq 55 \text{ м}$.

Подальші дослідження дозволили отримати загальну формулу розрахунку густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 за довжиною заряду для різних кутів нахилу свердловин:

$$\rho = (3,7 - 0,001 \cdot \rho_n) \cdot \varphi^{0,635 - 0,0003 \cdot \rho_n} \cdot l_3 - 0,01 \cdot \varphi^{0,835 - 0,0003 \cdot \rho_n} \cdot l_3^2 + (1,43 - 0,0007 \cdot \rho_n) \cdot \varphi + \rho_n, \text{ кг/м}^3, \quad (14)$$

де ρ_n – початкова густина наливної ЕВР Україніт-ПП-2, кг/м^3 .

Розбіжність результатів розрахунку густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 за формулою (14) у порівнянні з результатами, що подано на графіках (рис. 2) коливається у межах від 3 до 7% , що говорить про високу збіжність отриманих результатів та придатність формули до інженерних розрахунків.

Під детонацією ВР розуміють процес хімічного перетворення, який супроводжується вивільненням енергії і поширюється за речовиною з надзвуковою швидкістю, що називається детонаційною хвилею. Як відомо ЕВР являє собою суміш окиснювача у вигляді висококонцентрованого розчину селітри та невибухового пального – нафтопродукту. На відміну від інших ВР при детонації ЕВР хімічні

реакції у фронті детонаційної хвилі відбуваються у декілька стадій, а сам механізм у даному випадку визначається наявністю вторинних реакцій, що проходять за фронтом хвилі детонації й залежать від газової дифузії та змішення окремих продуктів первинного розпаду. Завдяки чому процес детонації у ЕВР здійснюється у неідеальному режимі. Це пояснюється тим, що час і повнота завершення хімічних реакцій залежать від швидкості розкладання та згоряння окремих частинок ЕВР. А це у свою чергу залежить від рівномірності змішання частинок, їх розміру та наявності гарячих точок. Всі ці особливості перетворення у детонаційній хвилі визначають розміри зони хімічних реакцій і встановлюють пряму залежність швидкості детонації ЕВР від діаметру та щільності заряду, тобто густини ЕВР [11].

Вимірювання експериментальної швидкості детонації наливної ЕВР Україніт-ПП-2 проводили в умовах випробувального полігону промислової площадки ПрАТ «Промвибух» (Запоріжжя) за допомогою вимірювального комплексу MicroTrap. Для імітації зарядної порожнини використовували пластикові труби з внутрішнім діаметром 30, 40 і 100 мм і довжиною 0.5 м, у яких розміщували патрон-бойовик та заряд наливної ЕВР Україніт-ПП-2. Визначення швидкості детонації проводили при різній густині ЕВР, що дорівнювала 800, 900, 1000, 1100, 1150, 1200, 1250, 1300, 1350 і 1400 кг/м³. Так, як регістратор MicroTrap дозволяє фіксувати до чотирьох вимірів одночасно, то виконували 2 серії по 3 вибухи проб для різних діаметрів та густини ЕВР Україніт-ПП-2. Обов'язковою умовою при вимірюванні швидкості детонації є використання зворотного ініціювання з використанням електричного способу висадження. Тому патрон-бойовик розташовували у нижній частині труби, а провідник-датчик розміщували на протилежній стороні від дротів електродетонатору вздовж заряду. Провідник-датчик перед розміщенням у пластиковій трубі замикають на коротко. Після його розміщення у трубі його з'єднують з коаксіальним кабелем і перед вибухом підключають до входних гнізд комплексу MicroTrap. Схему розміщення провідника-датчика у пробному заряді та фотофіксація підготовленої серії зарядів до проведення експерименту подано на рис. 3.



Рис. 3. Фотофіксація підготовленої серії зарядів до проведення експерименту з виміру швидкості детонації

Реєстратор MicroTrap відразу після спрацьовування тригера, починає автоматично збирати данні вимірів без присутності персоналу, які передає до незалежної пам'яті. Збережені файли з USB-носія переносилися до персонального комп'ютеру, де за допомогою програмного забезпечення MicroTrap Software оброблялися та будувалися графіки заміру експериментальної швидкості детонації за пробами. Результати виміру швидкості детонації наливної ЕВР Україніт-ПП-2 подано у табл. 1.

Таблиця 1

Результати виміру експериментальної швидкості детонації ЕВР Україніт-ПП-2

Густина, кг/м ³	Діаметр заряду, м		
	0,03	0,04	0,10
850	3400	3800	4400
900	4000	4300	4600
1000	4200	4700	5000
1100	4400	4800	5100
1150	4300	4900	5300
1200	4300	5000	5500
1250	4100	5100	5600
1300	3700	4800	5450
1350	3200	4300	5100
1400	2800	3600	4500

Провівши апроксимацію максимальних значень (див. табл. 1) отримано емпіричні залежності зміни величини швидкості детонації від густини ЕВР Україніт-ПП-2 та діаметру заряду. Для визначення швидкості детонації ЕВР Україніт-ПП-2 при різній її густині та діаметру заряду емпіричні залежності мають вид:

– при густині ЕВР Україніт-ПП-2 – $800 \leq \rho < 1300$ кг/м³

$$D = (4,8 \cdot \rho + 1926) \cdot d^{0,014 \cdot \sqrt[3]{\rho}}, \text{ м/с}; \quad (15)$$

– при густині ЕВР Україніт-ПП-2 – $1300 \leq \rho \leq 1400$ кг/м³

$$D = (70,6 \cdot \rho - 0,025 \cdot \rho^2 - 38665) d^{1,288 \cdot \ln(\rho) - 8,94}, \text{ м/с}. \quad (16)$$

Розбіжність результатів розрахунку швидкості детонації за формулами (15) і (16) у порівнянні з результатами, що подано у табл. 1 коливається у межах від 1 до 5%, що говорить про високу збіжність отриманих результатів. Врахування отриманих емпіричних формул розрахунку швидкості детонації дозволить дослідити її зміни за довжиною заряду наливної ЕВР Україніт-ПП-2.

При відбиванні руди віялами, як висхідних, так і низхідних свердловин, коли довжина заряду досягає до 35 м, науково-практичний інтерес викликає дослідження зміни швидкості детонації за довжиною заряду при різних кутах нахилу

зарядних порожнин. Це пов'язано з використанням різних схем ініціювання зарядів ВР та місцем розташування патронів-бойовиків у зарядній порожнині. У зв'язку з цим здійснити інструментальні заміри швидкості детонації уздовж колонки заряду досить важко або неможливо. Врахування величини густини та швидкості детонації має вагомий вплив на параметри БПР [15, 16], як при видобуванні руд, так і при проведенні гірничих виробок [17, 18].

Для встановлення раціональної початкової густини ЕВР Україніт-ПП-2 для використання при веденні очисних робіт виконаємо розрахунок зміни швидкості детонації за довжиною заряду при різних кутах нахилу свердловин. Для цього скористуємось новою методикою розрахунку величини зміни густини ЕВР за довжиною заряду та отриманими формулами (11) і (12). Розрахунок величини швидкості детонації за довжиною колонки заряду при різних кутах нахилу свердловин виконували з використанням наступних вихідних даних: діаметр заряду – 0,105 м, довжина колонки заряду – 35 м, густина емульсії – 1500 кг/м³, початкова густина ЕВР Україніт-ПП-2 – 800, 950 і 1100 кг/м³, величина атмосферного тиску – 0,1013 МПа, прийняте фіксоване значення гідростатичного тиску – 0,01 МПа, кут нахилу зарядної порожнини $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ і 90° .

У якості прикладу розглянемо зміну швидкості детонації за довжиною заряду при початковій густині ЕВР Україніт-ПП-2 – 800 кг/м³ (рис. 4, а). Як видно з графіку при куті нахилу зарядної порожнини $\varphi = 0^\circ$ швидкість детонації буде дорівнювати – 4300 м/с, а при кутах нахилу зарядної порожнини $0^\circ < \varphi \leq 90^\circ$ – буде зростати з 4300 до 5690 м/с. Максимальне значення швидкості детонації набуває на максимальній довжині колонки заряду, що дорівнює 35 м. Подальші дослідження зміни швидкості детонації за довжиною заряду при початковій густині ЕВР Україніт-ПП-2 – 950 кг/м³ (рис. 4, б), дозволило встановити, що при куті нахилу зарядної порожнини $\varphi = 0^\circ$ швидкість детонації буде дорівнювати – 4750 м/с. При кутах нахилу зарядної порожнини $0^\circ < \varphi \leq 30^\circ$ – буде зростати з 4750 до 5690 м/с. При куті нахилу $\varphi = 60^\circ$ – швидкість детонації набуває максимальної величини – 5730 м/с на довжині колонки заряду – 25 м і далі зменшується до 5385 м/с на 35 м довжини колонки заряду. При кутах нахилу $60^\circ < \varphi \leq 90^\circ$ – при довжині колонки заряду – 20 м, швидкість детонації буде мати максимальну величину – 5700 м/с, яка на довжині колонки заряду з 20 до 35 м буде зменшуватися до 5100 м/с. При початковій густині ЕВР Україніт-ПП-2 – 1100 кг/м³ (рис. 4, в), та куті нахилу зарядної порожнини $\varphi = 0^\circ$ швидкість детонації дорівнює – 5200 м/с. Для кутів нахилу зарядної порожнини $0^\circ < \varphi \leq 30^\circ$ на довжині колонки заряду – 20 м швидкість детонації набуває максимальної величини – 5740 м/с і далі зменшується до 5170 м/с на 35 м довжини колонки заряду. При кутах нахилу $30^\circ < \varphi \leq 60^\circ$ – на довжині колонки заряду з 15 до 20 м, швидкість детонації набирає максимальну величину – 5500 – 5700 м/с, яка зменшується до 4700 м/с на довжині колонки заряду – 35 м. При кутах нахилу $60^\circ < \varphi \leq 90^\circ$ та довжині колонки заряду – 10 м, швидкість детонації буде мати максимальну величину – 5700 м/с, яка на довжині колонки заряду 30 м може зникнути, що пов'язано з перевищенням критичної густини.

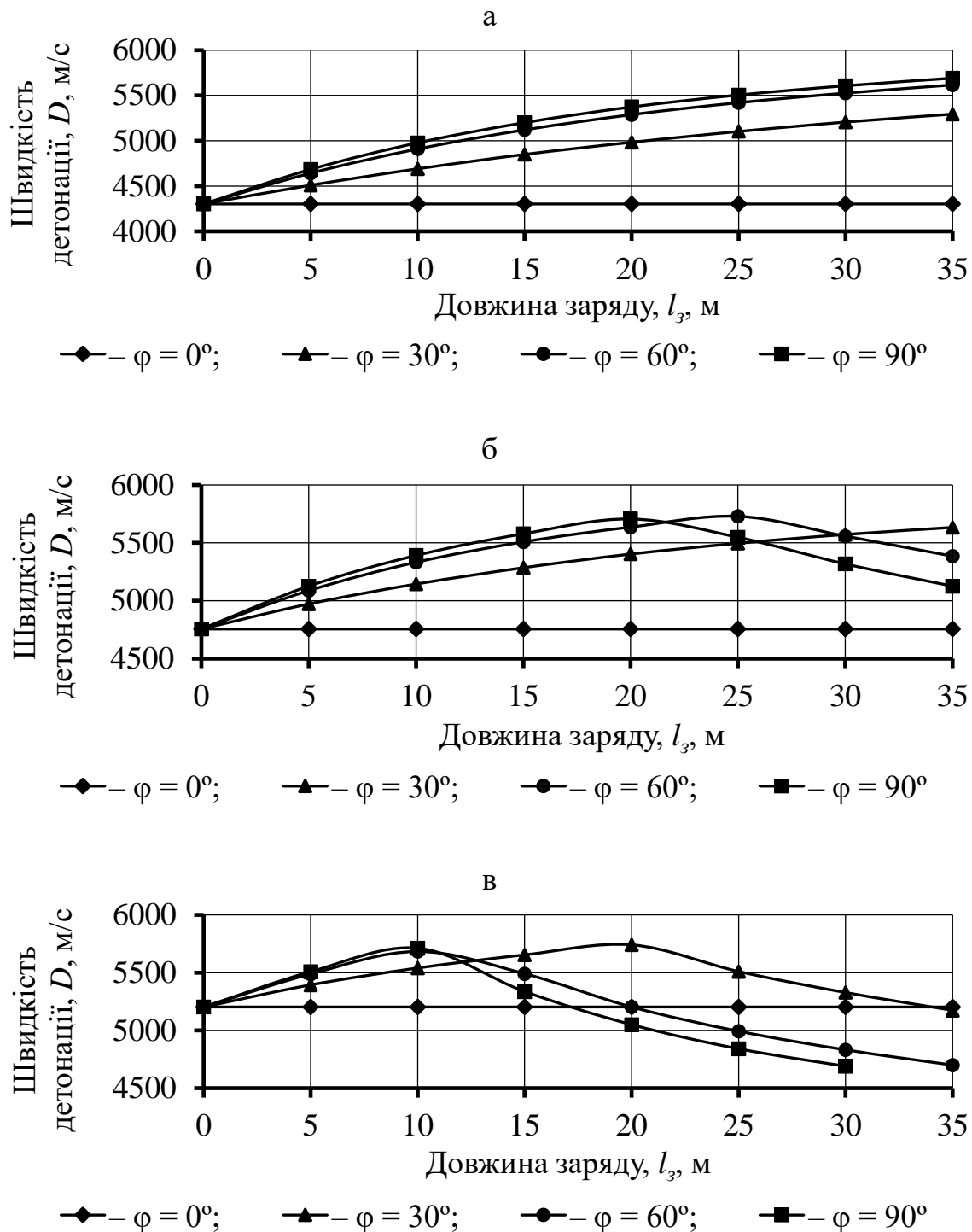


Рис. 4. Графік зміни швидкості детонації ЕВР Україніт-ПП-2 початковою густиною 800 (а), 950 (б) і 1100 (в) кг/м³ та діаметром заряду 0,105 м

Таким чином, за результатами визначення експериментальної швидкості детонації ЕВР Україніт-ПП-2 дозволило:

- натурними дослідженнями за допомогою реєстратору MicroTrap визначити експериментальні значення швидкості детонації ЕВР при діаметрах заряду 0,03, 0,04 і 0,10 м та густині емульсійної вибухівки у межах 850 – 1400 кг/м³;
- виявити степеневі закономірності зміни швидкості детонації ЕВР Україніт-ПП-2 в залежності від густини вибухівки та діаметру заряду;

– встановити раціональну початкову густину ЕВР Україніт-ПП-2 для відбивання руди свердловинами, яка дорівнює $800 - 1000 \text{ кг/м}^3$ при якій буде зберігатися нормальна швидкість детонації за довжиною колонки заряду до 35 м при різних кутах нахилу свердловин.

Висновки: 1. Аналіз технологічних схем ведення очисних робіт на рудних шахтах України дозволив встановити, що у переважній більшості для відбивання руд використовується віялова схема розташування свердловин, яка сьогодні набула найбільшого поширення. Але при заряджанні свердловин довжиною до 55 м зростає гідростатичний тиск, що призводить до збільшення густини ЕВР у нижній частині зарядів. Це відбувається за рахунок зменшення розмірів газових пор у ЕВР. Збільшення густини ЕВР призводить до зниження її чутливості, а детонаційна хвиля стає нерівномірною та переривчастою, аж до повного її згасання. На підставі цього було розроблено методику, яка дозволяє визначити густину ЕВР під дією гідростатичного тиску при різних кутах нахилу свердловин.

2. За результатами розрахунку зміни густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 з початковими значеннями 800 і 950 кг/м^3 за довжиною заряду до 55 м при кутах нахилу свердловин від 0° до 90° було встановлено, що густина сформованого заряду ЕВР не перевищує критичного значення, яке дорівнює 1410 кг/м^3 . Із зміною початкової густини наливної ЕВР Україніт-ПП-2 до 1100 кг/м^3 , її густина при довжині колонки заряду більше 35 м і кутах нахилу свердловин $60^\circ - 90^\circ$ починає перевищувати значення критичної густини. Це вказує на те, що на даній ділянці заряду буде знижуватися швидкість детонації аж до її згасання.

3. Проведені в умовах полігону ПрАТ «Промвибух» (Запоріжжя) за допомогою реєстратору MicroTrap виміри експериментальних значень швидкості детонації ЕВР Україніт-ПП-2 при діаметрах заряду $0,03$, $0,04$ та $0,10$ м і густині емульсійної вибухівки у межах $850 - 1400 \text{ кг/м}^3$ дозволило виявити параметри зміни швидкості детонації ЕВР в залежності від густини вибухівки та діаметру заряду, що змінюється за степеневим законом.

4. За допомогою наведеної методики та встановлених закономірностей виконано розрахунки зміни швидкості детонації за довжиною заряду, що дозволило встановити раціональну початкову густину ЕВР Україніт-ПП-2 для відбивання руди, що дорівнює $800 - 1000 \text{ кг/м}^3$ при якій буде зберігатися нормальна швидкість детонації за довжиною колонки заряду до 35 м при різних кутах нахилу свердловин.

Перелік посилань

1. Lyashenko, V., Vorob'ev, A., Nebolin, V., Vorob'ev, K. (2018). Improving the efficiency of blasting operations in mines with the help of emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 95-102.
<https://doi.org/10.15407/mining12.01.095>
2. Kholodenko T., Ustimenko Y., Pidkamenna L., & Pavlychenko A. (2014). Ecological safety of emulsion explosives use at mining enterprises. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 255-260.
<http://doi.org/10.1201/b17547-45>
3. Kholodenko T., Ustimenko Y., Pidkamenna L., & Pavlychenko A. (2015). Technical, economic and environmental aspects of the use of emulsion explosives by ERA brand in underground and

- surface mining. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 211-219. <http://doi.org/10.1201/b19901-38>
4. Mironova I., & Borysovs'ka O. (2014). Defining the parameters of the atmospheric air for iron ore mines. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 333-339. <http://doi.org/10.1201/b17547-57>
 5. Khomenko O., Kononenko M., Myronova I., & Savchenko M. (2019). Application of the emulsion explosives in the tunnels construction. *E3S Web of Conferences*, 123, 01039. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301039>
 6. Myronova I. (2015). The level of atmospheric pollution around the iron-ore mine. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 193-197. <http://doi.org/10.1201/b19901-35>
 7. Myronova, I. (2016). Prediction of contamination level of the atmosphere at influence zone of iron-ore mine. *Mining Of Mineral Deposits*, 10(2), 64-71. <http://doi.org/10.15407/mining10.02.0064>
 8. Gurin, A.A., & Lyashenko, V.I. (2018). Improvement of the Assessment Methods of the Effect of Mass Emissions in Pits on the Environment. *Occupational Safety in Industry*, (1), 35-41. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2018-1-35-41>
 9. Pysmennyi, S., Brovko, D., Shwager, N., Kasatkina, I., Paraniuk, D., & Serdiuk, O. (2018). Development of complex-structure ore deposits by means of chamber systems under conditions of the Kryvyi Rih iron ore field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(1 (95)), 33-45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142483>
 10. Kosenko A.V. (2021). Improvement of sublevel caving mining methods during high-grade iron ore mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 19-25. <http://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/019>
 11. Kononenko M., Khomenko O., Kovalenko I., & Savchenko M. (2021). Control of density and velocity of emulsion explosives detonation for ore breaking. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 69-75. <http://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/069>
 12. Sinitsyn V.A., Menshikov P.V., & Shemenyev V.G. (2016). Mathematical model of determination of density and aeration length hole charges of emulsion explosives the example Nitronit E-70. *Advances in current natural sciences*, (8), 205-210.
 13. Bragin P.A., Gorinov S.A., Maslov I.Y., Iliakhin S.V., & Overchenko M.N. (2015). On the density distribution in the charge of emulsion explosives sensitized with gas pores. *Mining informational and analytical bulletin*, (S5-20), 21-37.
 14. Kozyrev S.A., Vlasova E.A., & Sokolov A.V. (2020). Estimation of factual energetics of emulsion explosives by experimental detonation velocity test data. *Gornyi Zhurnal*, (9), 47-53. <http://doi.org/10.17580/gzh.2020.09.06>
 15. Kononenko M., & Khomenko O. (2021). New theory for the rock mass destruction by blasting. *Mining Of Mineral Deposits*, 15(2), 111-123. <http://doi.org/10.33271/mining15.02.111>
 16. Khomenko, O., Kononenko, M., & Lyashenko, V. (2018). Safety improving of mine preparation works at the ore mines. *Occupational safety in industry*, (5), 53-59. <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2018-5-53-59>
 17. Khomenko O., Rudakov D., & Kononenko M. (2011). Automation of drill and blast design. *Technical And Geoinformational Systems In Mining*, 271-275. <http://doi.org/10.1201/b11586-45>.
 18. Kononenko M., Khomenko O., Savchenko M., & Kovalenko I. (2019). Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*, 13(3), 22-30. <http://doi.org/10.33271/mining13.03.022>

ABSTRACT

Purpose. To develop a method for calculating the change in the density of emulsion explosives (EE) along the length of the charge column under the action of hydrostatic pressure at different angles of inclination of the boreholes and to examine the change in the detonation velocity along the charge.

The methodology of research. Using the well-known laws of hydrostatics and ideal gas, the method for calculating the redistribution of the density of bulk explosives, which are sensitized by gas pores, at different boreholes inclination angles has been developed. Empirical regularities of changes in the density of the bulk EE Ukrainit-PP-2 along the length of the charge column were established by regression analysis. The rheostat method was used to measure the detonation velocity of the EE Ukrainit-PP-2 depending on the diameter and density of the charge. With the help of the proposed methodology and the established regularities, an examination of the change in the detonation velocity in boreholes with different inclination angles has been performed.

Findings. The method for calculating the change in the density of explosives sensitized by gas pores along the length of the charge column, which makes it possible to determine the density of explosives under the action of hydrostatic pressure at different angles of inclination of ascending and descending boreholes has been developed. A general quadratic regularity was obtained for the change in the density of the bulk EE Ukrainit-PP-2, depending on the initial density of the explosive, the length of the charge, and the angle of inclination of the borehole. On the basis of experimental data, power-law patterns of change in the detonation velocity depending on the density and diameter of the Ukrainit-PP-2 explosive charge were established, which makes it possible to control the density and velocity of detonation during ore breaking.

The originality. In the formed charge column, the initial density of the bulk EE Ukrainit-PP-2 under the influence of hydrostatic pressure changes according to a quadratic pattern depending on its length and the angle of inclination of the borehole, which makes it possible to determine the location of the priming cartridges and develop designs of charges in boreholes by the power-law pattern of change in the detonation velocity.

Practical implications. The results of the research allowed to establish a rational initial density of EE Ukrainit-PP-2 for breaking ores by the boreholes, which is 800 – 1000 kg/cu.m, at which the detonation velocity is maintained along the length of the charge column at different angles of inclination of the boreholes. The application of the results of calculating the density of EE Ukrainit-PP-2 at different angles of inclination of the boreholes makes it possible to determine areas in the charge column with its critical values of more than 1410 kg/cu.m, at which a sharp attenuation of the detonation velocity begins. Accounting for this negative phenomenon allows to prevent the occurrence of failures during the explosion of charges in boreholes during ore breaking.

Keywords: *emulsion explosives, density, detonation velocity, charge length, borehole*