

**Рясний В. М., к.т.н., с.н.с., завідувач лабораторії НДІБПГ (КНУ, Україна, rjs-bpg@ukr.net), Євстратенко І. А., к.т.н., командир загону Державного воєнізованого гірничорятувального (аварійно-рятувального) загону Державної служби України з надзвичайних ситуацій (Igor.yevstratenko@gmail.com), Євстратенко Л. І., к.т.н. (Компанія «ІнПро», Україна, Liliya.evstratenko@gmail.com), Чухарев С. М., Заєць В. В., к.т.н., доценти кафедри розробки родовищ та видобування корисних копалин (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, s.m.chukharev@nuwm.edu.ua, v.v.zayets@nuwm.edu.ua)**

### **ВІД ТЕОРЕТИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ТА НАДІЙНИХ ЗАСОБІВ ПРОВІТРЮВАННЯ ТА НОРМАЛІЗАЦІЇ УМОВ ПРАЦІ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК**

**Мета:** забезпечення ефективного застосування прогресивної техніки та технології для підвищення безпеки та поліпшення умов праці під час проведення гірничих виробок різного призначення (горизонтальних та підняттяєвих) буровибуховим способом.

**Методика:** аналіз існуючих способів проведення гірничих виробок з акцентом на безпеку для гірників, виконуючих цю роботу. Математичний аналіз оцінки ступеня забрудненості атмосфери тупикової гірничої виробки пилом після підірвних робіт.

**Результати:** як показали розрахунки, для отримання реальної оцінки ступеня забрудненості пилом атмосфери при проведенні тупикової гірничої виробки після підірвних робіт необхідно мати достовірні дані про швидкість та кількість повітря, що проходить через поперечний перетин цієї виробки, масовий розподіл крапель води та часток пилу за їх розмірами, зміни концентрації пилу в міру віддалення від зони відкидання пилогазової хмари з урахуванням впливу пилу, що раніше осів на поверхню стінок, ґрунту та покрівлі виробок. Треба встановити також дані відносно фракційного складу пилу в пилогазовому середовищі після підірвання вибою в залежності від довжини тупикової виробки. Практичне використання приведених в роботі формул та залежностей може бути здійснено тільки після проведення додаткових експериментів безпосередньо

**в шахтних умовах.**

Наукова новизна полягає в інтеграції запропонованих схем та засобів безтрубного (за допомогою ежекторів) способу провітрювання гірничих виробок під час їх проведення буровибуховим способом з гранулометричним складом продуктів вибуху.

Практична значимість. Проведені промислові (в тому числі державні приймальні) випробування розроблених схем та засобів провітрювання горизонтальних гірничих виробок (довжиною від 20 до 200 м та перетином від 3 до 14 м<sup>2</sup>) підтвердили можливість забезпечення швидкості повітряного струменя в цих виробках на рівні не менш як 0,25 м/с. Використання універсального пиловловлюючого апарата УПА-1М під час буріння шпурів у піднятєвих гірничих виробках забезпечує зниження забрудненості повітря пилом у робочій зоні до рівня гранично допустимої концентрації. При цьому час, потрібний для повного знешкодження продуктів вибуху, не перевищив 20–25 хв, що дозволяє проводити провітрювання виробок в період між робочими змінами.

**Ключові слова:** провітрювання; пиловловлювання; газознешкодження; умови праці прохідників.

**Вступ.** Беззаперечно, безпека робітників шахт – це головна прерогатива виконання гірничих робіт загалом і при проведенні гірничих виробок зокрема. При підготовці запасів корисної копалини до виймання проведені гірничі виробки (як горизонтальні, так і піднятєві) до збійки їх з іншими виробками є тупиковими, тому не можуть провітрюватися за рахунок загальношахтної циркуляції повітря. Саме з цієї причини дуже важливим є забезпечення якості повітря при проведенні таких виробок, особливо після вибухових робіт.

Цьому питанню присвячено багато наукових праць різних авторів, зокрема статті та монографії Янова О. П., Бересневича П. В., Гого В. Б., Фролова А. В., Лапшина О. Є. та інших [ 1–9; 14].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В одній із останніх публікацій [17], що висвітлює проблемні питання під час проведення гірничих виробок, зроблено висновок про те, що стан нормалізації умов праці гірників знаходиться в прямій залежності від прийнятої технології підземної розробки рудних родовищ та гірничого обладнання, що при цьому застосовується. Акцент також робиться на необхідності забезпечення подачі у кожний вибій, де проводяться і підривні роботи такої кількості повітря, що б перед допуском робітни-

ків до вибою вміст активних продуктів вибуху був меншим ніж 0,008% за об'ємом у перерахунку на умовний окис вуглецю. При цьому, щоб досягти такого вмісту отруйних продуктів потрібно не більше ніж 30 хвилин (тобто за час міжзмінної перерви). На вітчизняних гірничорудних підприємствах (шахтах) такі показники досягаються в основному за допомогою вентиляторів місцевого провітрювання та трубопроводів різної конструкції та діаметрів.

**Мета статті** – детально проаналізувати стан умов праці гірників під час проведення гірничих виробок різного призначення (горизонтальних та піднятєвих), здійснити пошук та практично вирішити питання щодо його підвищення та поліпшення.

**Методи дослідження.** Для досягнення поставленої мети було проаналізовано звіти гірничорудних підприємств з питань охорони праці, статті, дослідження, які знаходяться у відкритому доступі, а також розглянуто способи й особливості технічних засобів та їх характеристики, опрацьовані за останні роки різними спеціалізованими організаціями і науковими установами України. Виконано відповідні теоретичні розрахунки.

**Викладення основного матеріалу.** Підвищити продуктивність праці, як відомо, можливо тільки за умови застосування високопродуктивної техніки та інтенсивної технології. Причому ця техніка і технологія повинні бути максимально безпечними для людей, які їх використовують.

Зараз на залізорудних шахтах України проведення піднятєвих виробок здійснюється різними, залежно від їх призначення та заданих параметрів, способами: комбайновим на весь перетин; секційним підриванням глибоких свердловин; механізованим за допомогою спеціальних монорейкових комплексів; звичайним немеханізованим способом.

Безумовно, найбільш прогресивним та перспективним є комбайновий спосіб, що повністю виключає перебування гірників безпосередньо у привибійній частині піднятєвої виробки, проте з деяких причин (насамперед економічного характеру) питома вага проведення піднятєвих за допомогою монорейкових прохідницьких комплексів, а також немеханізованим (тобто вручну) способом залишається до теперішнього часу все ще занадто значною, що вкрай негативно позначається не тільки на продуктивності, але й на умовах і безпеці праці гірників. Так, забрудненість повітря пилом в робочій зоні прохідників без активного провітрювання навіть під час буріння шпурів

з промивкою в десятки разів перевищує гранично дозвалені концентрації (ГДК).

Невипадково (і це підтверджено даними Інституту медицини праці АМН України) найбільш поширеними формами профпатології гірників є захворювання, пов'язані з вдиханням пилу (пневмоконіоз, хронічний бронхіт). Питома вага цих захворювань у загальній структурі профзахворюваності становить майже 50%.

Не маючи надійних ефективних рішень провітрювання та пило-вловлювання під час буріння шпурів, а також пило-, газознешкодження після вибухових робіт, кожен зміну прохідники наражаються на велику небезпеку порушення стану свого здоров'я.

Наведені обставини викликали необхідність прийняття термінових та дієвих заходів щодо поліпшення умов та безпеки праці прохідників. НДІБПГ у творчій співдружності з гірничорудними підприємствами Кривбасу було розроблено принципово новий універсальний апарат УПА-1М [10 ; 12], застосування якого дозволяє нормалізувати умови праці прохідників за пиловим фактором, надійно захистити останніх від бурового шламу, що також є значним джерелом дискомфорту на робочому місці, ефективно знешкодити пил та шкідливі гази під час підричних робіт, забезпечити надійне провітрювання виробок практично на всіх етапах прохідницького циклу, а також забезпечити дистанційний відбір проб повітря з привибійної частини виробки.

Апарат не має аналогів. Він складається з двох частин: навісної у вигляді пневматичної колонки з пилошламовловлюючим вузлом, що легко та швидко монтується безпосередньо на бурильну установку (телескопний перфоратор) та двоступінчастого спонукача тяги (ежектора).

Дія апарата в режимі пилошламовловлювання базується на відсмоктуванні продуктів буріння (пилу та шламу) від устя шпуру, а також пилу з привибійної частини за рахунок розрядження, що здійснює ежектор, з наступною нейтралізацією пилу в останньому. Дія апарата в режимі пило-, газознешкодження базується на активному впливові на пилогазову хмару, що утворилася після проведення підричних робіт, потужної повітроводяної суміші, її розріджування, а також доосадування пилу та шкідливих газів у самому ежекторі.

Як показали промислові випробування, застосування апарата під час буріння шпурів забезпечує зниження забрудненості повітря пилом у робочій зоні до рівня ГДК. Після виконання підричних робіт

час, потрібний для нейтралізації та повного знешкодження продуктів вибуху, не перевищує 20–25 хв інтенсивного провітрювання.

Апарат характеризується невеликими габаритами та масою, простою в обслуговуванні та експлуатації, високою надійністю.

Не менш складним є питання нормалізації умов та підвищення безпеки праці під час проведення горизонтальних гірничих виробок. Зараз у більшості випадків вони реалізуються за рахунок примусового провітрювання вентиляторами місцевого провітрювання (ВМП). При цьому використовується одна з трьох схем: всмоктувальна, нагнітальна або комбінована. Разом з тим, сучасні умови проведення цих виробок потребують застосування інших, більш ефективних та надійних способів, засобів та схем провітрювання.

З урахуванням значного досвіду, накопиченого в цій галузі спеціалістами НДІБПГ, під час розробки нових способів та засобів за основу була прийнята безтрубна каскадна схема провітрювання вибоїв [11 ; 12].

Сутність, взагалі відомої, схеми полягає в розподілі повітряного струменя в активно провітрюваній частині горизонтальної виробки на два протилежно направлених потоки, один з яких, рухаючись уздовж однієї з стінок виробки, доставляє свіже повітря до вибою, а другий, рухаючись уздовж протилежної стінки виробки в зворотному, по відношенню до першого потоку, напрямку, видає забруднене повітря.

Схеми, що рекомендуються, передбачають ефективне провітрювання горизонтальних виробок протяжністю до 200 м за допомогою комбінації особливим чином встановлених у виробці спеціальних повітродувок ежекторного типу. Відмінність розроблених ежекторів від відомих апаратів аналогічного призначення полягає в тому, що вони не тільки здатні ефективно, в стислий термін, провітрити виробку, але й дозволяють одночасно активно обробляти пилогазову хмару, що утворилася після підривних робіт.

Ежектори можуть працювати в декількох режимах:

в режимі подачі у виробку тільки повітря для її провітрювання під час виконання робіт, пов'язаних з бурінням шпурів, прибиранням породи, кріпленням виробки та ін.;

в режимі подачі у виробку перед підривними роботами одночасно повітря та повітроводяної суміші;

в режимі подачі у виробку перед вибуховими роботами повітря та повітроводяної суміші з подаванням в ежектор висококонцентро-

ваних поверхнево-активних речовин (ПАР);

в режимі подачі у виробку перед вибуховими роботами повітря або повітроводяної суміш і (по довжині), а в привибійну частину ще й повітромеханічної піни (ПМП).

Перший режим забезпечує ефективне провітрювання виробки. Другий і наступні режими одночасно з провітрюванням забезпечують активне пило-, газознешкодження.

Режим роботи ежектора з використанням ПАР та ПМП рекомендується використовувати в екстремальних ситуаціях, коли з тих чи інших причин неможливо забезпечити провітрювання виробки за час міжзмінної перерви (30 хв).

Розроблені схеми дозволяють організувати провітрювання виробок, що знаходяться в проходці, перетином від 3 до 14 м<sup>2</sup>. За необхідності разом з ежекторами можуть використовуватись ВМП (комбінований варіант). За своїми аеродинамічними характеристиками ежектори належать до високонапірних та високопродуктивних. У режимі подачі на ежектор повітроводяної суміші його продуктивність складає 1,4 м<sup>3</sup>/с, в режимі подачі тільки повітря – 1,9 м<sup>3</sup>/с. Це дозволяє вже на першій стадії оброблення повітряної маси (за лічені хвилини після включення каскаду ежекторів) нейтралізувати до 70% пилу та до 50% окислів азоту, що знаходяться в ній.

На етапі промислових випробувань встановлено, що всі розроблені схеми провітрювання виробок (довжиною від 20 до 200 м) забезпечують швидкість повітряного струменя в них не менш як 0,25 м/с, а час, потрібний для повного знешкодження продуктів вибуху, не перевищував 20–25 хв, що відповідає вимогам діючих правил безпеки. Практично після 25 хв інтенсивного провітрювання з одночасною подачею в ежектори води в кількості 3–4 л/хв не виявлено навіть слідів наявності в повітрі оксидів вуглецю та азоту. Атмосфера у виробках під час роботи ежекторів була чистою та прозорою.

Запропоновані способи та засоби провітрювання гірничих виробок отримали високу оцінку спеціалістів та виробничників. Практичне їх застосування на шахтах Кривбасу дозволило значно поліпшити умови та безпеку праці гірників.

Державний комітет України з нагляду за охороною праці, розглянувши матеріали досліджень НДІБПГ, позитивні відгуки гірничорудних підприємств (ВАТ «Кривбасзалізорудком», ВАТ «Суха Балка», ШУ ПАТ «АМКР»), експертні висновки Криворізького ЕТЦ та пропозиції Криворізького гірничого округу з цього питання, дозволив пос-

тійне застосування паспортів і схем провітрювання гірничих виробок під час їх проведення з використанням ежекторів-пиловловлювачів УПА-1М, а також ежекторів-піногенераторів ЕПГ-2ПМ.

Широкомасштабному впровадженню розроблених засобів, виготовлення яких освоєно власними силами на більшості (перерахованих вище) гірничорудних підприємств Кривбасу, а також компанії-єю «ІнПро» передували відповідні теоретичні розрахунки, сутність яких полягає в наступному.

Найбільш простим, доступним, а тому і найбільш розповсюдженим способом зниження забрудненості повітря пилом в шахтних умовах є зрошення пилу водою. Саме цей спосіб активного знешкодження пилу було взято за основу під час розробки НДІБПГ ефективних і надійних схем та технічних засобів провітрювання гірничих виробок, що проводяться буропідривним способом.

Гідрознепилювання являє собою складний фізичний процес. Ці теоретичні дослідження спрямовані на розкриття одного з основних його механізмів, оснований на інерційному захопленні пилу водяними краплями та водяною завією.

При реальній середній швидкості вильоту речовини з форсунки або ежектора 20 м/с максимальний розмір крапель можна визначити виходячи із значення числа Вебера для води [14]

$$W_E = \frac{\rho d V^2}{\delta}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність повітря (кг/м<sup>3</sup>);  $d$  – діаметр краплі (м);

$V$  – відносна швидкість краплі в повітрі (м/с);  $\delta$  – поверхневий натяг (Н/м).

Критичне значення числа Вебера, при якому крапля ще може існувати у потоці для води, дорівнює  $W_{E\text{кр}} = 10 - 14$ .

Звідкіля

$$d_{\text{кр}} = \frac{10\delta}{\rho V^2}. \quad (2)$$

Якщо підставити числові значення, то для крапель води одержимо числа Рейнольдса  $Re_c < 1200$ , що дає можливість використання для подальших розрахунків в якості виразу для лобового опору формули Клячко [15].

Коефіцієнт інерційного захоплення пилу у випадку сферичного тіла-перешкоди описується співвідношенням

$$E_p = \frac{K_p^2}{(K_p + 0,7)^2}, \quad (3)$$

де  $K_p$  – безрозмірний параметр інерції, який, в свою чергу, для сферичної частки дорівнює

$$K_p = \frac{\rho_r d_r^2 V}{9\mu_g d_k}. \quad (4)$$

В цій формулі  $\rho_r$  – щільність частки ( $\text{кг/м}^3$ );  $d_r$  – діаметр частки (м);  $\mu_g$  – динамічна в'язкість газу (Па.с).

Виразимо безрозмірний параметр інерції через значення числа Рейнольдса для краплі

$$K_p = \frac{\rho_r d_r^2}{9\rho_k d_k^2} \cdot \text{Rec} = A \cdot \text{Rec}. \quad (5)$$

Тоді, відповідно з формулою (3)

$$E_p = \frac{A^2 \text{Rec}^2}{(A \text{Rec} + 0,7)^2}. \quad (6)$$

Оскільки крапля має початкову відносну швидкість  $V_0$  та з часом вона зменшується, то і значення  $R_e$  змінюється з часом. Тому вираз (6) можна розглядати як миттєве значення коефіцієнта захоплення краплею часток пилу.

Згідно [14], рівняння руху краплі для умов даної задачі має вигляд

$$\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_k}{2}\right)^3 \rho_k \frac{dV_k}{dt} = -\left(\frac{24}{\text{Rec}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\text{Rec}}}\right)\pi\left(\frac{d_k}{2}\right)^2 \frac{\rho_e V_e^2}{2}. \quad (7)$$

Розділимо змінні і одержимо

$$\frac{d(\text{Rec})}{\left(\frac{6}{\text{Rec}} + \frac{1}{\sqrt[3]{\text{Rec}}}\right) \text{Rec}^2} = -\frac{3\rho_e V_e}{\rho_k d_k^2} \cdot dt, \quad (8)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість повітря.



Введемо змінну  $Rec = x^3$ , тоді

$$\frac{dx}{x(x^2 + 6)} = - \frac{\rho v_{\epsilon \epsilon}}{\rho d_{\kappa \kappa}^2} \cdot dt. \quad (9)$$

Розв'язання цієї задачі має вигляд

$$\frac{1}{12} \ln \left| \frac{x^2}{6 + x^2} \right| = - \frac{\rho v_{\epsilon \epsilon}}{\rho d_{\kappa \kappa}^2} \cdot t + c. \quad (10)$$

Повернемося до змінної  $Rec$

$$\frac{1}{12} \ln \left| \frac{\sqrt[3]{Rec^2}}{6 + \sqrt[3]{Rec^2}} \right| = - \frac{\rho v_{\epsilon \epsilon}}{\rho d_{\kappa \kappa}^2} \cdot t + c. \quad (11)$$

При  $t=0$   $Rec = Rec_0$

$$\frac{1}{12} \ln \left| \frac{\sqrt[3]{Rec^2}}{6 + \sqrt[3]{Rec^2}} \right| - \frac{1}{12} \ln \left| \frac{\sqrt[3]{Rec_0^2}}{6 + \sqrt[3]{Rec_0^2}} \right| = - \frac{\rho v_{\epsilon \epsilon}}{\rho d_{\kappa \kappa}^2} \cdot t. \quad (12)$$

Після потенціювання будемо мати

$$\frac{\sqrt[3]{Rec^2} (6 + \sqrt[3]{Rec_0^2})}{\sqrt[3]{Rec_0^2} (6 + \sqrt[3]{Rec^2})} = \exp\left(-12 \frac{\rho v_{\epsilon \epsilon}}{\rho d_{\kappa \kappa}^2} \cdot t\right). \quad (13)$$

Вирішуючи відносно  $R_{ec}$ , одержимо

$$Rec = \frac{6\sqrt{6}^{EXP} \left( -\frac{18\rho v_{\epsilon \epsilon} t}{\rho d_{\kappa \kappa}^2} \right) \cdot Rec_0}{\sqrt{\left\{ 6 + \sqrt[3]{Rec_0^2} \left[ 1 - \exp\left( -\frac{12\rho v_{\epsilon \epsilon} t}{\rho d_{\kappa \kappa}^2} \right) \right] \right\}^3}}. \quad (14)$$

Підставивши цей вираз в формулу (6), отримуємо залежність коефіцієнта інерційного захоплення пилу від часу.

Ефективність вловлювання пилу поодинокую краплею як функції від часу буде дорівнювати

$$\eta_p = \frac{\int_0^t E_p \pi \left(\frac{d_k}{2}\right)^2 \cdot C \cdot V \cdot dt}{\int_0^t \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot C \cdot V \cdot dt}, \quad (15)$$

де  $C$  – концентрація пилу в повітрі.

При переході до  $Rec$  одержимо

$$\eta_p = \frac{\int_0^t E_p Rec dt}{\int_0^t Rec dt}. \quad (16)$$

Якщо розглядати сукупність крапель, то спочатку необхідно визначити час перебування краплі в потоці. Нехай відстань між перетином розбризкування води та перешкодою, на якій відбувається осадження крапель, дорівнює  $\ell$ .

Рівняння, яке дає можливість визначити час перебування краплі в потоці, має вигляд

$$X + W_b t = \ell, \quad (17)$$

де  $X$  – відносне переміщення краплі в потоці;  $t$  – час перебування краплі в потоці;  $W_b$  – швидкість повітря у виробці.

Час перебування краплі в потоці можна визначити зі співвідношення (15), тобто

$$t = -\ell n \frac{\sqrt[3]{Rec^2 \left(6 + \sqrt[3]{Rec_0^2}\right)} \cdot \frac{\rho_k d_k^2}{12 \rho_v v_v}}{\left(6 + \sqrt[3]{Rec^2}\right) \sqrt[3]{Rec_0^2}}. \quad (18)$$

Відносне переміщення краплі визначимо з рівняння руху краплі

$$\frac{4}{3} \left(\frac{d_k}{2}\right)^3 \rho_k \frac{dV_k}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = - \left( \frac{24}{Rec} + \frac{4}{\sqrt[3]{Rec}} \right) \pi \left(\frac{d_k}{2}\right)^2 \frac{\rho_v V^2}{2}. \quad (19)$$

Перейдемо до запису через критерій Рейнольдса

$$\frac{d Rec}{dx} = - \frac{3 \rho_v}{d \rho_k} \left(6 + \sqrt[3]{Rec^2}\right). \quad (20)$$

Розділимо змінні та введемо нову змінну  $Rec=x^3$ ,

отримаємо 
$$\frac{x^2 dx}{6 + x^2} = -\frac{\rho_\epsilon}{d_\kappa \rho_\kappa} \cdot dx. \quad (21)$$

Після інтегрування та повернення до змінної  $Rec$ , одержимо

$$x = -\frac{\rho d}{\rho_\epsilon} \left( \sqrt[3]{Rec^2} - \sqrt{6} \arctg \frac{\sqrt[3]{Rec^2}}{\sqrt{6}} - \sqrt[3]{Rec^2} + \sqrt{6} \arctg \frac{\sqrt[3]{Rec^2}}{\sqrt{6}} \right). \quad (22)$$

Підставивши у формулу (17) значення  $t$  та  $x$ , одержимо рівняння відносно  $Rec$ , з якого можна чисельно визначити  $Rec$  та  $t$ .

При відомому  $t$  можна визначити кількість пилу, що буде вловлено однією краплею, тобто

$$\Delta M_p = 0 \int^t \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 C \cdot \eta_p(t) \cdot V dt. \quad (23)$$

Кількість пилу, що буде вловлено всією сукупністю крапель за час  $t$

$$\Delta M_p = N \cdot \Delta m_p, \quad (24)$$

де  $N$  – кількість крапель.

В свою чергу, кількість крапель  $N$  дорівнює

$$N = \frac{T}{\frac{4}{3} \pi \left( \frac{d}{2} \right)^3 \rho_\kappa}, \quad (25)$$

де  $T$  – кількість води, що розпилюється краплею за час  $t$ .

Тоді

$$\Delta M_p = \frac{T}{\frac{4}{3} \pi \left( \frac{d_\kappa}{2} \right)^3 \rho_\kappa} 0 \int^t \pi \left( \frac{d_\kappa}{2} \right)^2 \cdot C \cdot \eta_p(t) V \cdot dt = \frac{3T V_\epsilon}{2 d_\kappa^2 \rho_\kappa} 0 \int^t C \cdot \eta_p(t) Rec \cdot dt. \quad (26)$$

Ефективність вловлювання пилу водяною завісою дорівнює

$$\eta_{\epsilon.з.} = \frac{\Delta M_p}{Q \cdot C}, \quad (27)$$

де  $Q$  – кількість повітря, що проходить через поперечний перетин каналу (виробки) за час  $t$ .

Якщо підставити значення  $\Delta M_p$  та виконати деякі перетворення, то одержимо

$$\eta_{\text{в.з.}} = \frac{3T v_{\text{в}}}{2d_{\text{к}}^2 \rho_{\text{к}} Q_0} \int_0^t \eta_p(t) \text{Rec} \cdot dt. \quad (28)$$

Оскільки  $T=T_0 \cdot t$ , а  $Q=Q_0 \cdot t$ , де  $T_0$  – витрати води, а  $Q_0$  – витрати повітря, то

$$\eta_{\text{в.з.}} = \frac{3T_0 v_{\text{в}}}{2d_{\text{к}}^2 \rho_{\text{к}} \cdot Q_0} \int_0^t \eta_p(t) \text{Rec} \cdot dt, \quad (29)$$

за умови, що

$$Q_0 \geq \frac{3 \cdot m \cdot v_{\text{в}}}{2d_{\text{к}}^2 \rho_{\text{к}}} \int_0^t \text{Rec} \cdot dt.$$

Ефективність вловлювання (осадження) пилу водяною завісою може бути визначена також по початковій (на вході) та кінцевій (на виході) концентраціям часток пилу. Теоретично це може бути вирішено таким чином.

Нехай за 1 с на 1 м<sup>2</sup> підшови виробки випадає М кг води у вигляді крапель водяної завіси. Кількість крапель в одиниці об'єму завіси дорівнює

$$N = \frac{M}{\frac{\pi d^3}{6} \cdot \rho \cdot V_{\text{к}}}, \quad (30)$$

де  $d_{\text{к}}$  – діаметр краплі;  $\rho$  – густина води;  $V_{\text{к}}$  – швидкість падаючої краплі та швидкість зустрічі краплі з часткою пилу.

Розіб'ємо водяну завісу впродовж виробки на  $n$  прошарків товщиною  $\Delta x$ . Потік повітря, забрудненого пилом, спрямований впродовж виробки. В об'ємі 1 м<sup>3</sup>  $\Delta x$  знаходиться кількість крапель  $N \cdot \Delta x$ .

Краплі при цьому перекривають перетин 1 м<sup>2</sup> на величину

$$\Delta S = N \cdot \Delta x \frac{\pi d^2}{4}. \quad (31)$$

Якби частки пилу рухались по прямолінійних траєкторіях, то вірогідність захоплення частки в прошарку  $\Delta x$  рівнялась би

$$\Delta P = \frac{3M \cdot \Delta x}{2d_{\text{к}} \cdot \rho \cdot V_{\text{к}}}. \quad (32)$$

Насправді зустріч з краплею характеризується коефіцієнтом захоплення

$$\varepsilon = \varepsilon(\delta, d), \quad (33)$$

де  $\delta$  – розмір частки пилу.

Коефіцієнт захоплення визначається виразом [3]

$$\varepsilon = \frac{Stk^2}{(Stk + 0,125)^2}. \quad (34)$$

В свою чергу, число Стокса визначається виразом

$$Stk = \frac{1}{18} \cdot \frac{\delta^2 \rho_r \cdot V}{d_k \cdot \mu_g}, \quad (35)$$

де  $\rho_r$  – густина частки пилу;  $\mu_g$  – в'язкість повітря.

Таким чином, вірогідність захоплення частки пилу в прошарку  $\Delta x$  фактично дорівнює

$$\Delta P_\phi = \frac{3M \cdot \Delta x}{2d_k \cdot \rho \cdot V_k} \cdot \varepsilon(\delta, d). \quad (36)$$

Вірогідність того, що частка не буде захоплена в прошарку  $\Delta x$

$$\Delta q_\phi = 1 - \frac{3M \cdot \Delta x}{2d_k \cdot \rho \cdot V_k} \cdot \varepsilon(\delta, d). \quad (37)$$

Вірогідність того, що частка не буде захоплена ні в одному з  $n'$  прошарків буде дорівнювати

$$\Delta q_\phi = \left[ 1 - \frac{3M \cdot \Delta x}{2d_k \cdot \rho \cdot V_k} \cdot \varepsilon(\delta, d) \right]^{n'}. \quad (38)$$

Введемо позначення  $\lambda = n' \cdot \Delta P_\phi$ , тоді

$$q_\phi = \left( 1 - \frac{\lambda}{n'} \right)^{n'}. \quad (39)$$

Якщо  $\Delta x \rightarrow 0$ , а  $n' \rightarrow \infty$ , то

$$q_\phi = \exp(-\lambda) = \exp\left(-\frac{3M \cdot x \cdot \varepsilon}{2d_k \cdot \rho \cdot V_k}\right), \quad (40)$$

де  $x$  – довжина водяної завіси.

Величина

$$P_\phi = 1 - \exp\left[-\frac{3M \cdot x \cdot \varepsilon(\delta, d)}{2d_k \cdot \rho \cdot V_k}\right]. \quad (41)$$

Для полідисперсних крапель можна записати, що

$$d_{\kappa} (P_{\phi}) = 1 - \frac{3M \cdot x}{2\rho \cdot V_{\kappa}} q(d) \frac{\varepsilon(\delta, d)}{d} \cdot d(d), \quad (42)$$

$$\text{а } P_{\phi} = 1 - \left[ -\frac{3M \cdot x}{2\rho \cdot V} \int_0^{dM} q(d) \frac{\varepsilon(\delta, d)}{d} \cdot d(d) \right]. \quad (43)$$

В цих формулах  $q(d)$  – диференціальна функція масового розподілу крапель за розмірами.

Вірогідність захоплення однієї частки відповідає ефективності захоплення великої кількості часток.

Якщо концентрація часток пилу на вході дорівнює  $C_0$ , а на виході  $C$ , то ефективність пиловловлювання буде дорівнювати

$$\frac{C_0 - C}{C_0} = 1 - \exp \left[ -\frac{3M \cdot x}{2\rho \cdot V} \int_0^{dM} q(d) \frac{\varepsilon(\delta, d)}{d} \cdot d(d) \right]. \quad (44)$$

Звідкіля остаточна забрудненість повітря пилом на виході з водної завіси має вигляд

$$C = C_0 \exp \left[ \frac{3M \cdot x}{2\rho \cdot V} \int_0^{dM} q(d) \frac{\varepsilon(\delta, d)}{d} \cdot d(d) \right]. \quad (45)$$

Для полідисперсного пилу можна записати

$$dC = C_0 \cdot q(\delta) \exp \left[ -\frac{3M \cdot x}{2\rho \cdot V} \int_0^{dM} q(d) \frac{\varepsilon(\delta, d)}{d} \cdot d(d) \right] \cdot d\delta, \quad (46)$$

де  $q(\delta)$  – диференціальна функція масового розподілу пилу за розмірами.

Остаточно маємо

$$C = C_0 \int_0^{\delta n} q(\delta) \exp \left[ -\frac{3M \cdot x}{2\rho \cdot V} \int_0^{dM} q(d) \frac{\varepsilon(\delta, d)}{d} \cdot d(d) \right] d\delta. \quad (47)$$

Як видно з розрахункових формул, для реальної оцінки ступеня забрудненості атмосфери тупикової гірничої виробки пилом після підричних робіт необхідно мати достовірні дані про швидкість та кількість повітря, що проходить через поперечний перетин цієї виробки, масовий розподіл крапель води та часток пилу за їх розмірами, зміни концентрації пилу в міру віддалення від зони відкидання пилогазової хмари з урахуванням впливу пилу, що раніше осів на поверхню

стінок, ґрунту та кривлі виробок. Треба встановити також дані відносно фракційного складу пилу в пилогазовому середовищі після підривання вибою в залежності від довжини тупикової виробки. Тобто практичне використання вищенаведених формул та залежностей може бути здійснено тільки після ряду уточнюючих експериментів безпосередньо в шахтних умовах.

**Висновки.** На основі розгляду проблем та проведеного аналізу стану охорони праці гірників під час проведення гірничих виробок різного призначення (горизонтальних та підняттяєвих) буровибуховим способом, а також проведених теоретичних розрахунків запропоновано цілий комплекс принципово нових технічних рішень, що базуються на безтрубних схемах провітрювання виробок за допомогою ежекторів різних конструкцій. Розроблені засоби значно підвищують не тільки безпеку і продуктивність, але й поліпшують умови праці прохідників, що підтверджується проведеними широкомасштабними їх випробуваннями в умовах практично всіх діючих гірничорудних підприємств Криворізького залізорудного басейну (АТ «Кривбасзалізрудком», ПрАТ «СУХА БАЛКА», ШУ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПРАТ «ЦГЗК» та ін.).

Державна служба з нагляду за охороною праці, розглянувши матеріали проведених досліджень та результати промислових випробувань розроблених засобів провітрювання та нормалізації умов праці, дозволила їх постійне практичне застосування. Ці способи та засоби знайшли своє відображення також в новітній редакції «Правил безпеки під час розробки родовищ рудних та нерудних корисних копалин підземним способом» (НПАОП 0.00-1.77-16, розділ IV) [13].

1. Бересневич П. В., Лапшин А. А. Обоснование параметров и технологических схем использования эжекторной установки в процессе пылегазоподавления и проветривания выработок. *Разработка рудных месторождений*. 2005. Вып. 89. С. 199–203. 2. Гого В. Б., Малеев В. Б., Булыч А. С. Обоснование параметров диффузор-конфузорных элементов гидродинамической установки пылеулавливания. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. 2007. № 13 (123). С. 40–44. 3. Фролов А. В., Телегин В. А. Исследование высоконапорного гидрообеспыливания пылеулавливающими водовоздушными ежекторами с плоскоструйными форсунками. *Горный информационно-аналитический бюллетень. Аэрология*. 2008. Вып. 5. С. 164–168. 4. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Худик М. В. Підвищення безпеки при проведенні підняттяєвих виробок в шахтах. *Гірничий вісник*. Кривий Ріг, 2021. Вип. 109. С. 51–55. 5. Енергетичні характеристики процесу гідродина-

мічного кондиціювання рудникового повітря / Гого В. Б., Кобилянський Б. Б., Чепіга Д. А., Черних Н. С., Кипко О. Е., Кружилко О. Є. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2021. Вип. 2 (49). С. 113–123. **6.** Jundika С., Agus P., Arun S. Introduction and evaluation of a novel hybrid brattice for improved dust control in underground mining faces : a computational study. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. V. 25. Issue 4. P. 537–543. **7.** Zegong L., Kicki J., Xinzhu H., Shujie Y. Mine Safety and Efficient Exploitation Facing Challenges of the 21st Century. *International Mining Forum*, 2010. 300 p. **8.** Goodman G. R., Pollock D. E., Beck T. W. A comparison of a directional spray system and a flooded-bed scrubber for controlling respirable dust exposures and face gas concentrations. *Proceedings of the 10th U.S. North American Mine Ventilation Symposium* (Anchorage, AK, May 16–19, 2004). 2004. P. 241–248. **9.** Chekan G. J., Listak J. M., Colinet J. F. Laboratory testing to quantify dust entrainment during shield advance. *Proceedings of the Seventh International Mine Ventilation Congress* (Krakow, Poland, June 17–22, 2001). 2001. P. 291–298. **10.** Рясной В. М., Гладырь В. А., Моргун А. В., Суковач А. А. Создание высокоэффективных технических решений и схем, обеспечивающих надежную вентиляцию восстающих выработок при их проходке. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. Москва, 2000. № 7. С. 243–245. **11.** Гладырь В. В., Рясной В. М. Повышение эффективности проветривания горизонтальных горных выработок при их проходке путем использования эжекторно-каскадных схем. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. Москва, 2000. № 7. С. 241–243. **12.** Рясной В. М., Митина М. А., Евстратенко Л. И. Создание и внедрение высокоэффективных технических решений и схем, обеспечивающих надежное проветривание горных выработок при их проходке буровзрывным способом. *Форум гірників – 2012 : матеріали міжнародної конференції / Національний гірничий університет*. Дніпропетровськ, 2012. С. 31–36. **13.** Правила безпеки під час розробки рудних та нерудних корисних копалин підземним способом (НПАОП 0.00-1.77-16). Київ, 2017. **14.** Янов А. П., Жовтуха Г. А., Швидкий Н. И. Эффективность инерционного улавливания пыли водяными каплями. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. Новосибирск : Наука, 1976. № 6. С. 112–116. **15.** Распыливание жидкостей / Дитяпин Ю. Ф., Клячко Л. А., Новиков Б. В. и др. М. : Машиностроение, 1977. 208 с. **16.** Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М. : Изд. АН СССР, 1955. 352 с. **17.** Хоменко О. Є., Кононенко М. М., Савченко М. В. Технологія підземної розробки рудних родовищ : підручник / М-во освіти і науки України. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. 450 с.



## REFERENCES:

1. Beresnevich P. V., Lapshin A. A. Obosnovanie parametrov i tehnologicheskikh shem ispolzovaniya ejetornoy ustanovki v protsesse pyilegazopodavleniya i provetrivaniya vyirabotok. *Razrabotka rudnykh mestorojdeniy*. 2005. Vyp. 89. S. 199–203.
2. Gogo V. B., Maleev V. B., Bulyich A. S. Obosnovanie parametrov diffuzor-konfuzornykh elementov gidrodinamicheskoy ustanovki pyileulavlivaniya. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnogo tekhnichnogo universytetu*. 2007. № 13 (123). S. 40–44.
3. Frolov A. V., Telegin V. A. Issledovanie vyisokonapornogo gidroobespyilivaniya pyileulavlivayuschimi vodovozdushnyimi ejetorami s ploskostruynymi forsunkami. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten. Aerologiya*. 2008. Vyp. 5. S. 164–168.
4. Lapshyn O. Ye., Lapshyn O. O., Khudyk M. V. Pidvyshchennia bezpeky pry provedenni pidniattievkykh vyrobok v shakhtakh. *Hirnychiy visnyk*. Kryvyi Rih, 2021. Vyp. 109. S. 51–55.
5. Enerhetychni kharakterystyky protsesu hidrodinamichnogo kondytsiiuvannia rudnykovoho povitria / Hoho V. B., Kobylanskiy B. B., Chepiha D. A., Chernykh N. S., Kypko O. E., Kruzhylko O. Ye. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*. 2021. Vyp. 2 (49). S. 113–123.
6. Jundika C., Agus P., Arun S. Introduction and evaluation of a novel hybrid brattice for improved dust control in underground mining faces : a computational study. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2015. V. 25. Issue 4. P. 537–543.
7. Zegong L., Kicki J., Xinzhu H., Shujie Y. Mine Safety and Efficient Exploitation Facing Challenges of the 21st Century. *International Mining Forum*, 2010. 300 p.
8. Goodman G. R., Pollock D. E., Beck T. W. A comparison of a directional spray system and a flooded-bed scrubber for controlling respirable dust exposures and face gas concentrations. *Proceedings of the 10th U.S. North American Mine Ventilation Symposium* (Anchorage, AK, May 16–19, 2004). 2004. P. 241–248.
9. Chekan G. J., Listak J. M., Colinet J. F. Laboratory testing to quantify dust entrainment during shield advance. *Proceedings of the Seventh International Mine Ventilation Congress* (Krakow, Poland, June 17–22, 2001). 2001. P. 291–298.
10. Ryasnoy V. M., Gladyyr V. A., Morgun A. V., Sukovach A. A. Sozdanie vyisokoeffektivnykh tehnikeskikh resheniy i shem, obespechivayuschikh nadejnuyu ventilyatsiyu vosstayuschikh vyirabotok pri ih prohodke. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Moskva, 2000. № 7. S. 243–245.
11. Gladyyr V. V., Ryasnoy V. M. Povyishenie effektivnosti provetrivaniya gorizontalnykh gornnykh vyirabotok pri ih prohodke putem ispolzovaniya ejetornokaskadnykh shem. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*. Moskva, 2000. № 7. S. 241–243.
12. Ryasnoy V. M., Mitina M. A., Evstratenko L. I. Sozdanie i vnedrenie vyisokoeffektivnykh tehnikeskikh resheniy i shem, obespechivayuschikh nadejnoe provetrivanie gornnykh vyirabotok pri ih prohodke burovzryivnyim sposobom. *Forum hirnykiv – 2012 : materialy mizhnarodnoi konferentsii / Natsionalnyi hirnychiy*

universytet. Dnipropetrovsk, 2012. S. 31–36. **13.** Pravyla bezpeky pid chas rozrobky rudnykh ta nerudnykh korysnykh kopalyn pidzemnym sposobom (NPAOP 0.00-1.77-16). Kyiv, 2017. **14.** Yanov A. P., Jovtuha G. A., Shvidkiy N. I. Effektivnost inertsionnogo ulavlivaniya pyili vodyanyimi kaplyami. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyih iskopaemyih*. Novosibirsk : Nauka, 1976. № 6. S. 112–116. **15.** Raspylivanie jdkostey / Dityapin Yu. F., Klyachko L. A., Novikov B. V. i dr. M. : Mashinostroenie, 1977. 208 s. **16.** Fuks N. A. Mehanika aerorozole. M. : Izd. AN SSSR, 1955. 352 s. **17.** Khomenko O. Ye., Kononenko M. M., Savchenko M. V. Tekhnolohiia pidzemnoi rozrobky rudnykh rodovyshch : pidruchnyk / M-vo osvity i nauky Ukrainy. Dnipro : NTU «Dniprovska politekhnik», 2018. 450 s.

---

**Riasnyi V. M., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Research Fellow, Head of the Laboratory of State Research Institute for Occupational Safety and Ecology in the Mining and Metallurgical Industry (KNU, Ukraine, rjs-bpg@ukr.net), Yevstratenko I. A., Candidate of Engineering (Ph.D.), Commander of the State Paramilitary Mine/Emergency Rescue Unit of the State Service of Ukraine for Emergency Situations (Igor.yevstratenko@gmail.com), Yevstratenko L. I., Candidate of Engineering (Ph.D.) (LLC InPro, Ukraine, Liliya.evstratenko@gmail.com), Chukhariev S. M., Zaiets V. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor Department of Development of Deposits and Mining (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, s.m.chukharev@nuwm.edu.ua, v.v.zayets@nuwm.edu.ua)**

## **FROM THEORETICAL CALCULATIONS TO INTRODUCING EFFECTIVE AND RELIABLE MEANS OF VENTILATION AND NORMALISING WORKING CONDITIONS DURING MINING OPERATIONS**

**Purpose:** ensuring effective use of advanced machinery and technology to improve safety and working conditions in mining operations of various purposes (horizontal and elevated) by drilling and blasting.

**Methodology:** analysis of current mining methods focused on safety for mine workers. Mathematical assessment of atmospheric pollution of dead-end mining with dust after blasting.

**Results:** According to the calculations, when estimating realistic dust contamination of the atmosphere in a dead-end mine after blast-

**ing, it is necessary to have reliable data on the speed and amount of air passing through the cross section of the mine, mass distribution of water droplets and dust particles by their size. The dust concentration changes with distance from the dust and gas cloud, taking into account the effect of dust previously deposited on the surface of the walls, ground and roof of the workings. The data about dust fractional composition in dust-and-gas environment after blasting depending on the length of the dead-end mine should be also found. Practical application of the formulas and dependencies can be done only after carrying out additional experiments directly in underground conditions.**

**Scientific novelty is to integrate the proposed schemes and means of a pipeless (with the ejectors) method of ventilating mine workings during drilling and blasting with the granulometric composition of blast products.**

**Practical significance. Industrial (including state) tests of the developed schemes and means of ventilation in horizontal mine workings with length from 20 to 200 m and cross-section from 3 to 14 m<sup>2</sup> proved the possibility of ensuring the speed of the air jet in these mine workings at a level of at least 0,25 m/sec. The use of the universal dust-collecting device (UPA-1M) while drilling boreholes in the elevated mine workings ensures reduction of air pollution in the working zone up to the maximum permissible concentration. Thus the time necessary for complete neutralization of explosion products has not exceeded 20–25 minutes. It allows airing of workings between working shifts.**

***Keywords:* ventilation; dust-collecting; gas neutralization; working conditions of mine workers.**

---