

## **МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ У ВЕНТИЛЯЦІЙНІЙ МЕРЕЖІ, ОБУМОВЛЕНИХ ПРОТІКАННЯМ РАПТОВОГО ВИКИДУ**

**<sup>1</sup>Булат А.ф., <sup>1</sup>Бунько Т.В., <sup>1</sup>Кокоулін І.Є., <sup>2</sup>Яценко І.О., <sup>1</sup>Пономаренко В.В.**

<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, <sup>2</sup>Міністерство енергетики України

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ПРОТЕКАНИЕМ ВНЕЗАПНОГО ВЫБРОСА**

**<sup>1</sup>Булат А.Ф., <sup>1</sup>Бунько Т.В., <sup>1</sup>Кокоулин И.Е., <sup>2</sup>Яценко И.А., <sup>1</sup>Пономаренко В.В.**

<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, <sup>2</sup>Министерство энергетики Украины

## **SIMULATION OF DYNAMIC PHENOMENA IN THE VENTILATION NETWORK DUE TO SUDDEN GAS OUTBURST**

**<sup>1</sup>Bulat A.F., <sup>1</sup>Bunko T.V., <sup>1</sup>Kokoulin I.Ie., <sup>2</sup>Yashchenko I.O., <sup>1</sup>Ponomarenko V.V.**

<sup>1</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine, <sup>2</sup>Ministry of Power Engineering of Ukraine

**Анотація.** Збільшення темпів ведення очисних і підготовчих робіт, перехід на глибші горизонти, висока концентрація машин і механізмів у місцях виймання і транспортування корисної копалини збільшують ймовірність виникнення одного з найскладніших і небезпечних видів підземних аварій – раптових викидів вугілля, породи і газу. При виникненні раптового викиду існуючий у вентиляційній мережі повітродіаграма зазнає різкого динамічного впливу, що приводить до порушення стійкості провітрювання наближених до осередку викиду виробок і перекиданню повітряного потоку у них. Метан, що виділяється при цьому, утворює у прилягаючих виробках небезпечну для людини атмосферу. Величина зони загазування залежить від багатьох чинників: інтенсивності викиду, схеми вентиляції шахти, наявності вентиляційних споруд, їх кількості та інших, і може стати об'єктом спеціальних досліджень, що включають вивчення самого процесу викиду і його взаємодії з вентиляційною мережею. Специфіка виникнення викиду, як виду аварій, не дозволяє отримати статистичні і експериментальні результати безпосередньо протягом його протікання, що значно утруднює вивчення цього процесу. У зв'язку з цим найбільш прийнятним методом досліджень, що дозволяє оцінити результати взаємодії викиду з вентиляційною мережею і, керуючись ними, розробити ефективні міри щодо ліквідації його наслідків і відновлення нормального функціонування шахти, є метод імітаційного моделювання з використанням ПЕОМ. У статті проаналізовано етапи зміни гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов, які передують виникненню викиду, стадії протікання викиду, наведено розрахункові формули, згідно яких можна оцінити конфігурацію і динаміку розвитку зони, загазованої метаном внаслідок викиду. Результати моделювання газодинамічних проявів викиду і його впливу на стан провітрювання шахти мають важливе значення під час вентиляційних розрахунків у аварійних режимах з метою використання можливостей вентиляційного впливу на аварійну ситуацію, обмеження аварійних зон і підвищення ефективності ліквідації наслідків аварії.

**Ключові слова:** аварія, раптовий викид, зона загазування, етапи протікання викиду, гірничо-геологічні і гірничотехнічні умови

Збільшення темпів ведення очисних і підготовчих робіт, перехід на глибші горизонти, висока концентрація машин і механізмів у місцях виймання і транспортування корисної копалини збільшують ймовірність виникнення одного з найскладніших і небезпечних видів підземних аварій – раптових викидів вугілля, породи і газу.

Слід зазначити, що до нинішнього часу немає єдиного визначення цього поняття. Засновник енергетичної теорії раптових викидів вугілля і газу В.В. Ходот ще у 1961 році [1] сформулював його як «раптове зрушення або викид

вугілля або породи і замкнених у них рідин і газів, що протікає зі значним силовим (динамічним) ефектом». Таке формулювання відрізняється універсальністю і граничною точністю, і може стати основою подальшої конкретизації – адже газодинамічні явища різноманітні і містять багато різновидів виділення газу у гірничі виробки, від статичних до вельми динамічних. Одним з визначаючих їх показників саме і є динамічність.

Згідно сучасних уявлень, до класу «Викиди вугілля (породи) і газу» відносяться п'ять наступних явищ:

а) **раптовий викид вугілля і газу** – швидкоплинний лавиноподібний процес руйнування вугільного масиву гірничим і газовим тиском ш відкидання тонкоподрібненого вугілля газом у виробку;

б) **раптовий викид породи і газу** – лавиноподібний процес руйнування породного масиву з винесенням і переміщенням породи виробкою потоком газу, що виділяється;

в) **раптове витискання вугілля з підвищенням газовиділенням** – швидкоплинний процес віджимання вугілля гірничим і газовим тиском з при вибійної частини пласта у виробку;

г) **раптовий викид вугілля з руйнуванням вміщуючих порід** – прорив газу у прилеглий до вибою вироблений простір з над- або підробленого пласта крізь вміщуючи породи;

д) **раптовий викид вугілля з вугільної пачки за контуром виробки** – прорив газу до при вибійного простору виробки з тектонічно порушеної вугільної пачки з руйнуванням шару міцного вугілля між виробкою і цією пачкою.

Аналіз цих явищ свідчить про різну динамічність їх протікання і наслідків. Найбільш впливовими на стан вентиляційної системи шахти є, безперечно, явища а) та б); з точки зору вентиляційного впливу, залишаючи осторонь геомеханічні особливості, їх можна навіть об'єднати і аналізувати спільно.

При виникненні раптового викиду (типів а) та б)) існуючий у вентиляційній мережі повітророзподіл зазнає різкого динамічного впливу, що приводить до порушення стійкості провітрювання наближених до осередку викиду виробок і перекиданню повітряного потоку у них. Метан, що виділяється при цьому, утворює у прилягаючих виробках небезпечну для людини атмосферу. Величина зони загазування  $\theta$  залежить від багатьох чинників: інтенсивності викиду, схеми вентиляції шахти, наявності вентиляційних споруд, їх кількості та інших, і може стати об'єктом спеціальних досліджень, що включають вивчення самого процесу викиду і його взаємодії з вентиляційною мережею.

Специфіка виникнення викиду як виду аварій не дозволяє отримати експериментальні результати безпосередньо протягом його протікання, що значно утруднює вивчення викиду. У зв'язку з цим найбільш прийнятним методом досліджень, що дозволяє оцінити результати взаємодії викиду з вентиляційною мережею і, керуючись ними, розробити ефективні міри щодо ліквідації його наслідків і відновлення нормального функціонування шахти, є метод імітаційного моделювання з використанням ПЕОМ [2].

Процес виникнення і протікання раптового викиду можна умовно поділити на наступні етапи:

а) згідно [1] головною умовою раптового викиду є виконання нерівності

$$W+E > F+U$$

де  $W$  – потенційна енергія вугілля,  $E$  – кінетична енергія гірничих порід,  $F$  – робота, необхідна для зміщення вугілля у бік вибою,  $U$  – робота, необхідна для руйнування вугілля при раптовому викиді.

При цьому потенційна енергія вугілля містить і енергію замкненого у вугіллі газу, що у процесі явища переходить у кінетичну (підготовча, *перша*, стадія);

б) на *другій* стадії більшого розвитку досягають системи квазіпаралельних площин вибою тріщини, і активних сил раптового викиду буває достатньо для руйнування шару вугілля між найбільш активною системою тріщин і площиною оголення навіть без попереднього крихкого руйнування його під впливом високих напружень.

Якщо раптовий викид вугілля і газу зупиняється на цій стадії, то він вже не є викидом у нашому розумінні, а переходить до стадії раптового віджимання вугілля з підвищеним газовиділенням. Інакше - здійснюється перехід до *третьої* стадії;

в) у тріщинах виникають високі активні сили за рахунок тиску газу на стінки тріщин. Цими силами руйнуються и викидаються у простір виробки перемички між площиною оголення масиву і тріщинами;

г) на *четвертій* стадії здійснюється подальше руйнування блоків і шматків вугілля, що містять газ під високим тиском;

д) на *п'ятій* стадії раптового викиду, яка передуює стадії гальмування явища, за рахунок енергії його переміщення з порожнини викиду до гірничої виробки газувугільна суміш розноситься виробкою.

Таким чином, на стадіях 1-5 формуються передумови для власне викиду, який формує небезпечну зону і порушує аеродинамічний стан шахти. Далі ситуація розгортається наступним чином:

е) протягом короткочасного початкового періоду, що характеризується виникненням у вентиляційній мережі необоротних змін (завали виробок вугіллям і породою, заштибовка їх вугільним дріб'язком, руйнування кріплення і вентиляційних споруд ударною хвилею тощо), змінюється аеродинамічний опір виробок і, як наслідок, перерозподіляються повітряні потоки;

ж) у період інтенсивного метановиділення утворюється зона загазування виробок продуктами викиду. У цей період можливе перекидання вентиляційних струменів у прилеглих до осередку викиду виробках з боку свіжого струменю;

и) у період припинення інтенсивного метановиділення відновлюється нормальний режим провітрювання і здійснюється розгазування аварійної зони.

Особливо цікавим і найменш вивченим є етап ж). Дійсно, протягом його тиск додатково викинутого до аварійної виробки метану здатний перевищити її природну депресію, повітряний потік у ній буде тимчасово перекинуто і

провітрювання відрізнятиметься від нормального. З одного боку, воно не буде подібним реверсуванню струменю у ній (виникає додатковий аеродинамічний опір за рахунок завалу виробки твердими фракціями викиду), а з другого – викинутий короткочасно метан буде розповсюджуватись назустріч хоча і зниженому, але ж нормальному вентиляційному струменю.

Питання розповсюдження газового потоку викиду назустріч нормальному потоку у виробці розглядалися у роботах [3,4]. У них відмічено, що величину збурюючого впливу хвилі тиску можна визначити використанням коефіцієнтів послаблення (підсилення). У [5] показано, що розповсюдження газового потоку викиду назустріч свіжому струменю повітря здійснюється лише протягом періоду ж); з переходом до періоду и) газ не має енергії, достатньої для підтримання межі перевертання свіжого струменю, і вона починає переміщуватись у напрямку руху свіжого струменю, тобто починається розгазування аварійної зони. Межа припинення розповсюдження газів назустріч свіжому потоку залежить від аеродинамічного опору виробки з осередком викиду, і за наявності його значного збільшення розміри її незначні. Загальний час перекидання вентиляційного струменя у більшості випадків має один порядок з тривалістю періоду ж).

Задача моделювання розповсюдження газоподібних продуктів викиду вентиляційною мережею вирішується за наступних припущень:

а) аеродинамічний опір виробки, у якій стався викид, збільшується до 10 кр. Це приблизно відповідає перекриттю перетину виробки на 70%; за наявності статистичної інформації щодо такого змінення значення може варіюватись;

б) протікання другого етапу викиду приймається стаціонарним, протягом часу  $\tau$  у осередку викиду виділяється  $q$  м<sup>3</sup>/с метану. Правомірність такого припущення визначається достатньою для задачі, що розглядається, адекватністю реального процесу його моделі і в той же час простотою моделювання (що для реального процесу, який є нестационарним [6,7,8], становить певні труднощі). Моделювання повинне виконуватись шляхом послідовного зняття обмежень після отримання додаткових даних відносно стану об'єкту, що моделюється;

в) утворення зони загазування і подальше її розгазування відбувається за рахунок витіснення газоповітряної суміші з виробки струменем, що надходить, без урахування процесів дифузії;

г) система вентиляції є безінерційною, і за припинення дії другого етапу викиду миттєво відновлюється нормальне провітрювання. Тобто час утворення зони тимчасового загазування виробки аварійної зони, розташованих відносно осередку аварії назустріч свіжому струменю, приймається рівним часу етапу ж) (реально трохи довший саме внаслідок інерційності процесу і значною мірою відповідає збільшенню аеродинамічного опору виробки внаслідок захаращення її перетину твердими фракціями викиду). Хоча дослідження реального стану таких змін і, тим самим, динаміки тимчасового загазування вентиляційної мережі потребує подальших досліджень шляхом імітаційного моделювання (натурне, за відомих причин, малоімовірне).

Вхідною інформацією для моделювання є:

- а) схема вентиляційних з'єднань мережі. Визначення виробки  $(i,j)$  означає, що напрям повітряного потоку у ній – від вузла  $i$  до вузла  $j$ ;
- б) довжина виробок  $L(i,j)$ ;
- в) площі їх поперечного перетину  $S(i,j)$ ;
- г) аеродинамічні опори виробок  $R(i,j)$ ;
- д) депресія головних вентиляційних установок  $H(i,j)$ ;
- е) депресія осередку викиду з урахуванням надходження додаткового обсягу газу.

Вихідною інформацією є  $C(i,j)$  – концентрація метану у  $(i,j$  і час існування загазованих зон різних типів.

Нехай викид виникає у виробці  $(i_k,j_k)$ . Це можна представити, як виникнення джерела тяги у вузлі  $j_2$  (вузол  $j_2$  при цьому ділить виробку  $(i_k,j_k)$  на частини  $(i_k,j_2)$  і  $(j_2,j_k)$ ).

Послідовність вирішення задач оцінки впливу викиду на стан вентиляційної системи представлено на рис. 1.



Рисунок 1 – Комплекс задач оцінки впливу викиду на стан вентиляційної системи

Вирішення топологічних задач полягає у визначенні усіх виробок за ходом вентиляційного струменю від вузла  $j_l$ , яких можуть досягти газоподібні продукти викиду протягом  $\tau$ .

На першому кроці знаходимо усі виробки  $(j_2, j_i)$  і включаємо їх до загазованої зони. Далі на кожному кроці визначаємо

$$\tau(j_k, j_l) = \max \tau(j_m, j_k) - \frac{l(i_k, j_l)}{\bar{V}(i_k, j_l)},$$

де  $\bar{V}(i_k, j_l) = \frac{Q(i_k, j_l)}{S(i_k, j_l)}$ ,  $k$  – коефіцієнт поля швидкостей, що визначається як відно-

шення максимальної швидкості газоповітряного потоку у виробці до його середнього значення. У ході протікання викиду останній, звісно, змінюється, оскільки на деякій відстані від джерела викиду змінюється площа перетину виробок за рахунок дії двофазного потоку викиду. Корикування  $k$ , звичайно, можливе лише за наявності відомостей щодо кількості викинутої твердої фази потоку викиду, і являє значною мірою лише теоретичний інтерес.

Якщо хоча б одне  $\tau(j_k, j_l) > 0$ , продовжується розгляд відносно вузла  $j_l$  аналогічно приведеному вище для  $j_k$ . Розрахунок закінчується, коли  $\forall \tau(j_l, j_m) \leq 0$ .

Останні міркування відносяться до випадку, коли вентиляційне збурення, спровоковане викидом, розповсюджується лише в напрямку вентиляційного потоку у нормальному режимі провітрювання. Реальний процес значно складніший: депресія потоків у осередку викиду змінює знак на протилежний, окремі вентиляційні потоки перекидаються і газовий потік спрямовується назустріч свіжому (до аварії) вентиляційному струменю. Створюється зона тимчасового загазування, межі якою окреслюються, виходячи із співвідношення депресій протидіючого (газового) і основного (вентиляційного) потоків. Потім вентиляційна система повертається поступово до первинного стану, і починається розгазування тимчасово загазованої зони (протягом переходу від етапу ж) до етапу и). Моделювання цього процесу може, за певних спрощуючих припущень, здійснюватись за методикою, викладеною у [9] для умов утворення і розгазування зони тимчасового загазування вентиляційної мережі продуктами екзогенної пожежі за умови зміни нормального режиму провітрювання на аварійний (реверсивний).

Таким чином, загазована зона являє собою

$$\theta : \left\{ (i, j) \in M; \sum_{\mu(j_2, i)} \frac{L(i_k, j_k)}{\bar{V}(i_k, j_k)} \leq \tau \right\},$$

де  $\mu(j_2, i)$  – маршрут від вузла  $j_2$  до вузла  $i$ , а по  $k$  підсумовуються виробки цього маршруту.

Масив  $Q$  для усіх виробок мережі і поле напрямків розповсюдження газоподібних продуктів визначаються із розрахунку природного повітророзподілу

[9,10] для мережі  $M$  з приєднаною виробкою  $(i_2, j_2)$ , що моделюється, як додатковий, діючий протягом етапів е)-ж), вентилятор.

Максимального розміру зона загазування досягає у момент  $\tau_{max}=\tau$  (виключення – випадок, коли час досягнення газами будь-якого стовбура менше за  $\tau$ ; тоді час утворення максимальної загазованої зони

$$\tau_{max} = \max \left\{ \sum_{\mu(j_2, j_m)} \frac{L(i_k, j_k)}{\bar{V}(i_k, j_k)}; j_m \in M' \right\},$$

де  $M'$  – множина кінцевих вузлів вентиляційних стовбурів).

Процес розгазування вентиляційної мережі аналогічний процесу утворення зони загазування, під час моделювання його не виникає труднощів. Масив  $Q$  і поле напрямків розповсюдження газоподібних продуктів визначаються із розрахунку природного повітроділення. Початком розгазування вважається момент припинення розповсюдження газу назустріч нормальному вентиляційному потоку.

Якщо визначити  $M'' : \{j \in M; \forall(i, j) \notin \theta; \exists(j, j_k \in \theta)\}$ , то час розгазування

$$\tau_{розг} = \max \left\{ \sum_{\mu(i, j)} \frac{L(i_k, j_k)S(i_k, j_k)}{Q(i_k, j_k)}, i \in M'', j \in M' \right\}.$$

Слід відзначити, що множину  $M'$  слід формувати окремо на першому і другому етапах моделювання, оскільки за рахунок перевертання вентиляційного струменя повітропостачальні і вентиляційні стовбури можуть помінятися місцями; у такому випадку кінцевий вузол вентиляційного стовбура слід включити до множини  $M''$ .

Алгоритм вирішення другої задачі може бути представлено наступним чином: для кожного вузла  $j \in \theta$  розраховується  $\tau_j = \max_k \tau_{i_k} + \tau(i, j)$ , де  $i_k$  – початкові вузли гілок, які входять до  $j$  – го вузла.  $\tau_i = 0, i \in M''$ . Тоді  $\tau_{розг} = \max_i \tau_i, i \in M'$ .

Виходячи з наведених вище міркувань, час, протягом якого виробка  $(i, j)$  входить до загазованої зони, складає

$$\tau'(i, j) = \tau - \min \left\{ \sum_{\mu(j_2, i)} \frac{l(i_k, j_k)}{\bar{V}(i_k, j_k)} \right\} + \max \left\{ \sum_{\mu(i', i'')} \frac{L(i_k, j_k)S(i_k, j_k)}{Q(i_k, j_k)} \right\} + \frac{L(i, j)S(i, j)}{Q(i, j)},$$

де  $i' \in M'', i''=i$ , якщо провітрювання залишалось незмінним,  $i''=j$ , якщо струмінь у виробці  $(i, j)$  змінював напрям.

Крім розмірів і конфігурації, зона розповсюдження газового потоку викиду характеризується і концентрацією  $C(i, j)$  метану у виробках осередку, що створюється. Вона безпосередньо залежить від початкового значення  $C(i^*, j^*)$ , де  $(i^*, j^*)$  – виробка, у якій виникає викид. З метою спрощеного моделювання поля  $C(i, j)$  у вентиляційній мережі можна користуватись методикою, викладеною у [9], виходячи з того, що  $C(i^*, j^*)$  заздалегідь відома. Методики її

розрахунку, за умови використання наявної інформації. Найбільш загальною, на наш погляд, є формула [11]

$$C(x, y) = C_0 + \frac{I_{ПЛ} + kI_{ВП} + \int_0^x j_{ВП}(\xi) d\xi}{kQ_0} + \frac{I_{СЛ}}{ub\sqrt{\pi D_y x / u}} \exp\left(-\frac{uy^2}{4D_y x}\right), \%$$

де  $C_0$  – початкова концентрація у  $(i^*, j^*)$  до викиду;  $Q_0, u$  – його кількість і швидкість;  $D_y$  – коефіцієнт турбулентної дифузії;  $I_{ПЛ}, I_{ВП}, I_{СЛ}$  – газовиділення (дебіт метану) відповідно з пласта, виробленого пласта у лаву і те, що створює шарове скупчення метану біля покрівлі,  $m^3/c$ ;  $x, y$  – координати виробки за довжиною і висотою, м;  $j_{ВП}$  – інтенсивність джерел газовиділення з виробленого простору,  $m^3$ ;  $b$  – аеродинамічний опір вентилятора головного провітрювання, віднесений до ділянки виробки, що розглядається,  $Pa \cdot c/m^3$ ;  $k$  – коефіцієнт зменшення витрати повітря, викликаного викидом.

Очевидно, що формула є досить точною, але отримати деякі з параметрів, що до неї входять, важко. Слід користуватись простішими формулами, а за неможливості – задавати значення  $C(i^*, j^*)$  з практичних міркувань.

**Висновок.** Результати моделювання газодинамічних проявів викиду і його впливу на стан провітрювання шахти мають важливе значення під час вентиляційних розрахунків у аварійних режимах з метою використання можливостей вентиляційного впливу [12] на аварійну ситуацію, обмеження аварійних зон і підвищення ефективності ліквідації наслідків аварії. Використання наведених методик спрощує, без суттєвого зниження точності, розрахунковий процес і сприятиме ефективному прийняттю протиаварійних мір.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ходот В.В. Внезапные выбросы угля и газа. М.: Госгортехиздат, 1961. 363с.
2. Болбат И.Е., Зинченко И.Н., Кравченко Н.М., Кравченко М.В. Компьютерная оценка газовой обстановки и выбор аварийных вентиляционных режимов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. Донецк. 1997. С. 23-24.
3. Кухарев Е.В., Андреев С.Ю., Лысенко В.Н. К оценке устойчивости краевой части пласта // Внезапные выбросы на больших глубинах: сб. науч. тр. К.: Наук. думка, 1979. С. 20-24.
4. Лайгна К.Ю. Об общих принципах постановки диффузионных задач рудничной аэрологии // Вентиляция шахт и рудников. Ленинград. 1978. Вып. 5. С. 57-92.
5. Кухарев Е.В. Оценка и совершенствование систем подготовки крутых пластов Донбасса с учетом газодинамических проявлений: дис...канд. техн. наук / 05.15.02. Днепропетровск: ИГТМ АН УССР, 1983. 212с.
6. Абрамов Ф.А., Шевелев Г.А., Потемкин В.Я. Оценка устойчивости вентиляционных сетей при выбросах // Безопасность труда в промышленности. 1974. № 5. С. 40-43.
7. Шевелев Г.А. Динамика выбросов угля, породы и газа. Киев: Наукова думка, 1989. 159с.
8. Шевелев Г.А., Перепелица В.Г. Фильтрация газа в шахтах. Киев: Наукова думка, 2010. 295с.
9. Потемкин В.Я., Козлов Е.А., Кокоулин И.Е. Автоматизация составления оперативной части планов ликвидации аварий на шахтах и рудниках. Киев: Техника, 1991. 124с.
10. Абрамов Ф.А., Тянь Р.Б., Потемкин В.Я. Расчет вентиляционных сетей шахт и рудников. М.: Недра, 1978. 231с.
11. Брюханов А.М. Газодинамические явления в горном массиве и формирование взрывчатой метано-воздушной среды в угольных пластах: сб. науч. Тр. 2008. Вып. 11. С. 31-39.
12. Смоланов С.Н., Голинько В.И., Мартыненко М.С. Изоляционные, вентиляционные и взрывоустойчивые перемычки. Днепропетровск: Наука и образование, 2002. 261с.

#### REFERENCES

1. Khodot V.V. (1961), *Vnezapnyye vybrosy uglja i gaza* [Sudden outbursts of coal and gas], Gosgortekhzdat, Moscow, SU.



2. Bolbat I.Ye., Zinchenko I.N., Kravchenko N.M. and Kravchenko M.V. (1997), "Computer assessment of the gas situation and the choice of emergency ventilation modes", *Mine rescue business*, pp. 23-24.
3. Kukharev Ye.V., Andreev S.Yu. and Lysenko V.N. (1979), "To assess the stability of the edge of the bed", *Sudden outbursts at great depths*, Naukova dumka, Kyiv, pp. 20-24.
4. Laigna K.Yu. (1978), "General principles of setting diffusion problems in mine aerology", *Ventilation of mines and mines*, Leningrad, Vyp. 5, pp. 57-92.
5. Kukharev Ye.V. (1983), "Evaluation and improvement of preparation systems for steep Donbass strata taking into account gas-dynamic manifestations", D.Sc. Thesis, 05.15.02, IGTM NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, USSR.
6. Abramov F.A., Shevelev G.A. and Potemkin V.Ya. (1974), "Evaluation of the stability of ventilation networks in case of emissions", *Industrial safety*, no. 5, pp. 40-43.
7. Shevelev G.A. (1989), *Dinamika vybrosov uglya, porody i gaza* [Dynamics of emissions of coal, rock and gas], Naukova dumka, Kyiv, SU.
8. Shevelev G.A. and Perepelitsa V.G. (2010), *Fil'tratsiya gaza v shakhtakh* [Gas filtration in mines], Naukova dumka, Kyiv, UA.
9. Potemkin V.Ya., Kozlov Ye.A. and Kokoulin I.Ye. (1991), *Avtomatizatsiya sostavleniya operativnoy chasti planov likvidatsii avari na shakhtakh i rudnikakh* [Automation of the preparation of the operational part of plans for the elimination of accidents at rocks and mines], Technica, Kyiv, SU.
10. Abramov F.A., Tyan R.B. and Potemkin V.Ya. (1978), *Raschet ventilyatsionnykh setey shakht i rudnikov* [Calculation of ventilation networks in mines and mines], Nedra, Moscow, SU.
11. Bryukhanov A.M. (2008), "Gas-dynamic phenomena in the rock mass and the formation of an explosive methane-air environment in coal seams: collection of articles. scientific", Vyp. 11, pp. 31-39.
12. Smolanov S.N., Golinko V.I. and Martynenko M.S. (2002), *Izolyatsionnyye, ventilyatsi-onnyye i vzryvoustoychivyye peremychki* [Insulation, ventilation and explosion-proof bulkheads], Nauka i obrazovanie, Dnepropetrovsk, UA.

---

#### Про авторів

**Булат Анатолій Федорович**, академік Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, директор інституту, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), Дніпро, Україна, [gtm.bulat@gmail.com](mailto:gtm.bulat@gmail.com)

**Бунько Тетяна Вікторівна**, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник у відділі проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, [bunko2017@ukr.net](mailto:bunko2017@ukr.net)

**Коккулін Іван Євгенович**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник у відділі проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна

**Ященко Ігор Олексійович**, кандидат технічних наук, начальник управління охорони праці, промислової безпеки та цивільного захисту Міністерства енергетики України, Київ, Україна

**Пономаренко Вікторія Василівна**, бакалавр, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна

#### About the authors

**Bulat Anatolii Fedorovich**, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Director of the Institute, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnipro, Ukraine, [gtm.bulat@gmail.com](mailto:gtm.bulat@gmail.com)

**Bunko Tetiana Viktorivna**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of problems of underground mines in great depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine, [bunko2017@ukr.net](mailto:bunko2017@ukr.net)

**Kokoulin Ivan Yevgenovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of problems of underground mines in great depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine

**Yashchenko Igor Oleksiyovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Chief of the Department of Labour Protection, Industrial Safety and Civil Defence, Ministry of Power Engineering of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

**Ponomarenko Viktoriia Vasylivna**, Bachelor of Science (B. Sc.), Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM NASU), Dnipro, Ukraine

---

**Аннотация.** Увеличение темпов ведения очистных и подготовительных работ, переход на более глубокие горизонты, высокая концентрация машин и механизмов в местах выемки и транспортировки полезного ископаемого увеличивают вероятность возникновения одного из самых сложных и опасных видов подземных аварий - внезапных выбросов угля, породы и газа. При возникновении внезапного выброса существовавшее в вентиляционной сети воздухораспределение испытывает резкое динамическое воздействие, приводящее к нарушению устойчивости проветривания близких к очагу выброса выработок и опрокидыванию воздушного потока в них. Выделяющийся при этом метан образует в прилегающих выработках опасную для человека атмосферу. Размер зоны загазованности зависит от многих факторов: интенсивности выброса, схемы

вентиляции шахты, наличия вентиляционных сооружений, их количества и других, и может стать объектом специальных исследований, включающих изучение самого процесса выброса и его взаимодействия с вентиляционной сетью. Специфика возникновения выброса как вида аварий не позволяет получить статистические и экспериментальные результаты непосредственно во время его протекания, что значительно затрудняет изучение этого процесса. В связи с этим наиболее приемлемым методом исследований, позволяющим оценить результаты взаимодействия выброса с вентиляционной сетью и, руководствуясь ими, разработать эффективные меры по ликвидации его последствий и восстановлению нормального функционирования шахты, является метод имитационного моделирования с использованием ПЭВМ. В статье проанализированы этапы изменения горно-геологических и горнотехнических условий, предшествующих возникновению выброса, стадии протекания выброса, приведены расчетные формулы, по которым можно оценить конфигурацию и динамику развития зоны, загазованной метаном в результате выброса. Результаты моделирования газодинамических проявлений выброса и его влияния на состояние проветривания шахты имеют важное значение при вентиляционных расчетах в аварийных режимах с целью использования возможностей вентиляционного воздействия на аварийную ситуацию, ограничения аварийных зон и повышения эффективности ликвидации последствий аварии.

**Ключевые слова:** авария, внезапный выброс, зона загазованности, этапы протекания выброса, горно-геологические и горнотехнические условия

**Annotation.** An increase in the pace of cleaning and preparatory work, a transition to deeper horizons, a high concentration of machines and mechanisms in places where minerals are excavated and transported increase the likelihood of one of the most difficult and dangerous types of underground accidents - sudden outbursts of coal, rock and gas. In the event of a sudden outburst, the air distribution existing in the ventilation network experiences a sharp dynamic effect, leading to a violation of the stability of the ventilation of the workings close to the center of the outburst and the overturning of the air flow in them. The methane released in this case forms an atmosphere dangerous for humans in the adjacent workings. The size of the gas contamination zone depends on many factors: the intensity of the outburst, the ventilation scheme of the mine, the presence of ventilation facilities, their number, and others, and can become the object of special studies, including the study of the outburst process itself and its interaction with the ventilation network. The specificity of the occurrence of an outburst as a type of accidents does not allow obtaining statistical and experimental results directly during its course, which greatly complicates the study of this process. In this regard, the most acceptable research method that allows assessing the results of the interaction of the outburst with the ventilation network and, guided by them, to develop effective measures to eliminate its consequences and restore the normal functioning of the mine, is the simulation method using a PC. The article analyzes the stages of changes in the mining-geological and mining-technical conditions preceding the occurrence of the outburst, the stage of the outburst, the calculation formulas are given, by which it is possible to evaluate the configuration and dynamics of the development of the zone polluted with methane as a result of the outburst. The results of modeling the gas-dynamic manifestations of the outburst and its effect on the state of mine ventilation are of great importance in ventilation calculations in emergency modes in order to use the possibilities of ventilation effects on an emergency, limit emergency zones and increase the effectiveness of eliminating the consequences of an accident.

**Key words:** accident, sudden outburst, gas contamination zone, stages of the outburst, mining and geological and mining conditions

*Стаття надійшла до редакції 16.04. 2020*

*Рекомендовано до друку чл.-кор. НАН України О.П. Круковським*