

А. П. Деньгін, канд. техн. наук, М. В. Назаренко, д-р техн. наук
(ДУ «ННДІПБОП»)

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РОЗРАХУНКУ ВЕНТИЛЯЦІЇ ПІДЗЕМНИХ РУДНИКІВ

Розглянуто питання використання автоматизованої системи «Розрахунок вентиляції» на базі інформаційно-аналітичної платформи K-MINE для автоматизованих розрахунків параметрів систем вентиляції шахт і рудників з метою підвищення рівня безпеки повітряного середовища у виробках.

Ключові слова: руднична вентиляція, автоматизована система, шахтна атмосфера, витрати повітря, оптимізація вентиляційної мережі.

Рассмотрены вопросы использования автоматизированной системы «Расчет вентиляции» на базе информационно-аналитической платформы K-MINE для автоматизированных расчетов параметров систем вентиляции шахт и рудников с целью повышения уровня безопасности воздушной среды в выработках.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, автоматизированная система, шахтная атмосфера, расход воздуха, оптимизация вентиляционной сети.

The questions of “Ventilation calculation” automated system use on the basis of information-analytic platform K-Mine for automated parameters calculations of mine and open-pit ventilation systems to increase air safety level in excavations are considered in the article.

Keywords: Mine ventilation, automated system, mine atmosphere, air consumption, ventilation system optimization.

Рудничну вентиляцію, або провітрювання шахт, застосовують для створення у підземних виробках нормальних атмосферних умов. Вона має виключити шкідливу дію на людину отруйних газів, що містяться у рудничному повітрі, високих та низьких температур, а також попередити значні скупчення шкідливих газів.

При проходженні підземними гірничими виробками склад атмосферного повітря змінюється, оскільки вміст кисню зменшується, а вуглекислого газу та азоту – збільшується. Крім того, до нього домішуються різні гази (шкідливі домішки), що виділяються у виробці з

гірничих порід (метан, водень, радон тощо) або з'являються внаслідок проведення вибухів, роботи дизельних машин, гниття дерев'яного кріплення тощо [1].

Температура та вологість повітря також змінюються, збільшується запиленість. Усі ці домішки можуть зробити повітря непридатним для дихання. Деякі гази (метан, водень) утворюють із повітрям суміші, в яких найменша іскра може стати причиною пожежі або навіть вибуху. Тому Правила безпеки висувають жорсткі вимоги до складу рудничного повітря та контролю за ним.

Дуже жорсткими є вимоги Правил безпеки до гранично допустимих концентрацій (далі – ГДК) у рудничному повітрі шкідливих для здоров'я газів: метану, радону тощо [2, 3]. Так, наприклад, концентрації газів метану та водню обмежуються кількістю вибухонебезпечної їх суміші із повітрям. Із цих міркувань максимально припустимий вміст метану у повітрі складає 0,5...2 %, водню – 0,5 %. Велику шкоду здоров'ю також завдає мінеральний пил, що міститься в рудничному повітрі у місцях ведення гірничих робіт (буріння, підривання, завантаження, розвантаження, транспортування, подрібнення тощо).

Для отримання інформації про склад і стан рудничної атмосфери на шахтах та рудниках здійснюють систематичний аналіз газового складу повітря, його запиленості та температури.

Основний захід боротьби з домішками шкідливих газів у рудничному повітрі – розрідження їх свіжим повітрям до гранично допустимих концентрацій, тобто подача до забоїв додаткової кількості свіжого повітря. Саме цю функцію виконують системи рудничної (шахтної) вентиляції.

Сучасний стан розвитку гірничодобувної промисловості характеризується широким упровадженням інформаційних систем і технологій. Одним із напрямів застосування інформаційних систем для підземних рудників і шахт є автоматизація визначення режимів функціонування вентиляційних систем. Моделювання вентиляційних систем проводиться шляхом побудови складної гетерономної мережі з внутрішніми та зовнішніми джерелами додавання та розподілу повітряних потоків з урахуванням факторів, що постійно змінюються у часі. Завдання, що вирішуються подібними системами належать до класу вентиляційних і можуть бути використані як, наприклад, для вугільних шахт із природним виділенням горючих і вибухонебезпечних газів, так і для рудників, де у більшості випадків, природне виділення газів відсутнє, або присутнє у невеликих об'ємах.

Комплекси виробок на рудниках і шахтах, особливо з великою продуктивністю, мають сильно розгалужену мережу гірничих виробок, загальна довжина яких може сягати сотень кілометрів. До вентиляційної мережі входять також зони обрушення руди і гірських порід, які можуть створювати аеродинамічні контакти атмосфери підземних виробок з денною поверхнею. У мережі виробок працює велика кількість вентиляторів, гирла низки виробок розташовані на різних висотах і по-різному орієнтовані у просторі. При цьому, часто райони розташування рудників і шахт мають складну орографію.

Таким чином використання стандартних способів розрахунку таких мереж для забезпечення безперервної подачі свіжого повітря у виробки та вибору оптимального функціонування вентиляційного обладнання є досить складним і трудомістким інженерно-технічним завданням.

Одним із низки сучасних універсальних програмних засобів, що використовується для автоматизованого розрахунку систем вентиляції шахт і рудників, є автоматизована система (АС) «Розрахунок вентиляції» на базі інформаційно-аналітичної платформи K-MINE.

АС «Розрахунок вентиляції» має модульну структуру та дозволяє вирішувати широкий спектр завдань вентиляційних мереж, що робить її універсальним програмним засобом для вугільних шахт і рудників. При виконанні розрахунків враховується фізичний стан атмосфери денної поверхні та рудничної атмосфери, орографія району розташування шахти або рудника, просторова орієнтація гирл гірничих виробок, процеси їх взаємодії з роботою вентиляційного устаткування в мережі, а також неоднорідність аеродинамічного опору в зонах очисного простору. Всі ці властивості дозволяють моделювати (розраховувати варіанти) вентиляційних систем (далі – ВС) для різних режимів роботи, проводити їх оцінювання та вибір оптимальних параметрів при вирішенні основних вентиляційних завдань, а саме:

- розраховувати складові природної тяги;
- вибирати типи вентиляторів і визначати режими їх роботи;
- розраховувати розподіл повітря для гетерономних мереж великої розмірності;
- виконувати оцінювання безпечності повітряного середовища у виробках при функціонуванні ВС;
- оптимізувати систему регуляторів розподілу повітря у мережі;
- виконувати оцінювання і розподіл повітря у штатних та аварійних режимах тощо.

Одним із найголовніших завдань при провітрюванні шахт і рудників є підтримання необхідних і достатніх витрат повітря на кожний момент часу в усіх або деяких виробках. Вирішувати такі завдання можна тільки шляхом управління розподілом повітря за допомогою активних або пасивних регулюючих пристроїв, а також регулювання режимів роботи вентиляторних пристроїв.

Існують безліч способів регулювання витрати повітря у вентиляційній мережі: *додатний*, коли регулювання виконується за допомогою вентиляторів (активні регулятори); *від'ємний*, коли регулювання виконується за рахунок вентиляційних перемичок (пасивні регулятори); *комбінований*, коли регулювання виконується за допомогою активних і пасивних регуляторів. У розгалужених комплексах шахт і рудників визначення місць розташування регуляторів, їх кількості та виду є складним завданням. Актуальність його визначається значними капітальними витратами на закупівлю та монтаж регуляторів, а також високими експлуатаційними витратами.

Оптимальний вибір варіанта регулювання вентиляційної системи дозволяє не тільки підвищити рівень безпеки повітряного середовища у виробках, але й максимально точно визначити вартість системи. Тому, для врахування всіх наведених факторів у складі АС «Розрахунок вентиляції» передбачено можливість аналізу та оптимізації вентиляційної мережі.

Цільовим призначенням АС є забезпечення єдиного зручного інтерфейсу системи підтримки прийняття рішень гірничих інженерів, які виконують проектування та експлуатацію вентиляційних систем, а також управління її режимами в режимі реального часу.

Розрахунок вентиляційних режимів шахт і рудників виконується із застосуванням комп'ютерних моделей вентиляційних мереж. Для створення моделей вентиляційної мережі використовується графічний редактор із бібліотекою графічних елементів (рис. 1).

Модель вентиляційної мережі в АС – це оргграф виробок, що доповнюється умовними позначеннями регулюючих пристроїв (вентилятори головного провітрювання – ВГП, допоміжні вентилятори, вентиляційні споруди тощо). Всі гілки графу являють собою лінійні об'єкти «виробка», що містять детальну інформацію про її характеристики (тип, цільове призначення, аеродинамічний опір, депресію, площу поперечного перетину та довжину, витрати повітря тощо).

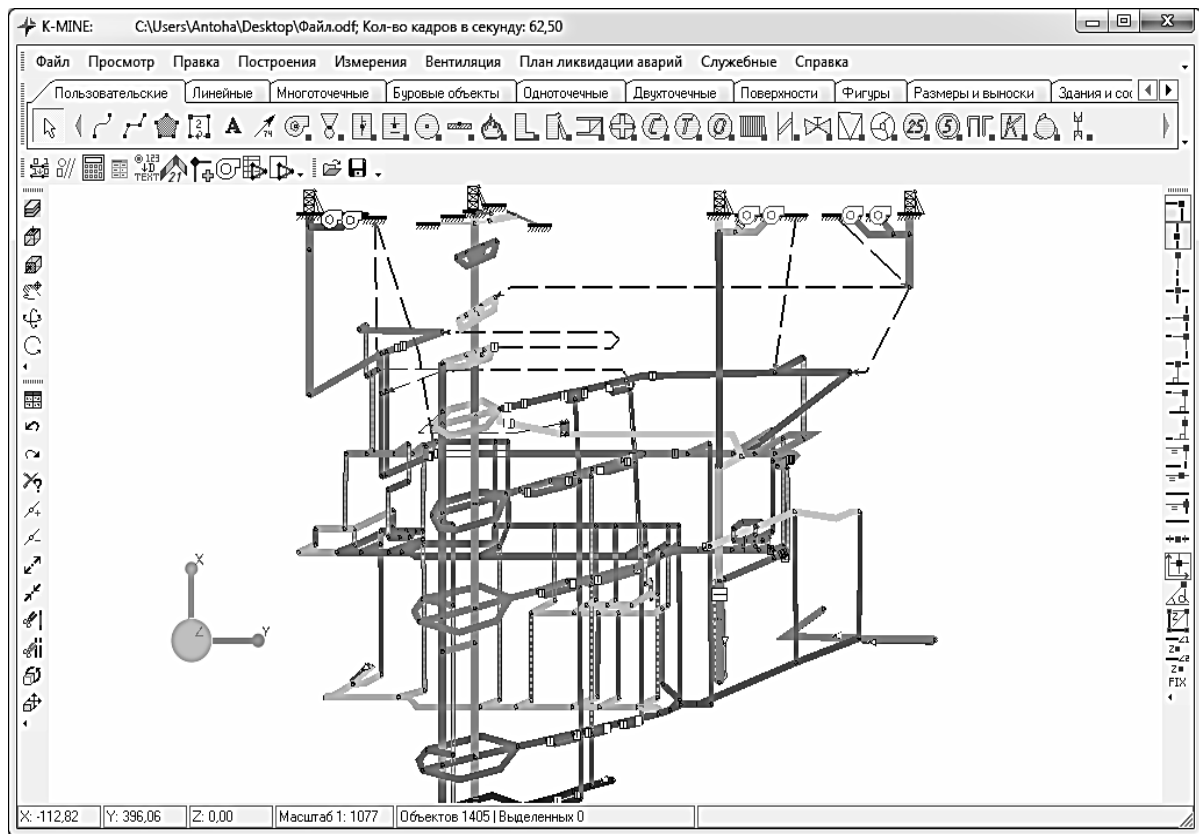


Рис. 1. Розрахункова модель вентиляційної мережі рудника

Для об'єднання виробок у мережу використовуються вузли об'єднання виробок, вузли виходу виробок на денну поверхню тощо. В АС передбачено можливість автоматичного створення вузлових точок, перевірку на топологічність і топоніміку, операції з геометричного редагування та внесення властивостей у графічні об'єкти. Всі вищенаведені показники можна вивести на розрахункову модель згідно з умовними позначеннями. Для прискорення обробки всі виробки автоматично нумеруються та індексуються.

При русі повітря в шахтних вентиляційних мережах діють такі закони:

1. Закон опору в гілках:

$$h_j = R_j s_j, \quad (1)$$

2. Закон збереження маси повітряних потоків у вузлах:

$$\sum_{j \in i} \rho_j Q_j \frac{1}{2} = 0, \quad (2)$$

3. Закон збереження механічної енергії повітряних потоків у контурах:

$$\sum_{j \in f} \varepsilon_j h_j = \sum_{j \in f} \varepsilon_j h_{ej} + h_{ef}, \quad (3)$$

де i – номер вузла;

j – номер гілок;

h – депресія гілок, мм вод. ст.;

R – аеродинамічний опір гілок, кц;

Q – об'ємний дебіт повітряного потоку, м³/с;

h_e – депресія вентилятора, мм вод. ст.;

h_e – депресія природної тяги в контурі, мм вод. ст.;

ρ – середня щільність повітря в гілці, кг/м³;

ε – коефіцієнт напрямку повітряного потоку (для початкового прийнятого напрямку $\varepsilon = +1$; для протилежного напрямку $\varepsilon = -1$).

Для уведення вихідних даних до розрахункової моделі діючих шахт і рудників використовують параметри натурних депресійних зйомок (рис. 2)



Рис. 2. Депресійна зйомка виробок і введення інформації в розрахункову модель

Перед виконанням розрахунку для активних регуляторів (ВГП) визначають тип вентилятора та його базові характеристики з урахуванням зведеної депресії вихідної гілки, в якій знаходиться цей регулюючий пристрій.

Для вибору вентилятора головного провітрювання визначається його депресія за формулою:

$$h_B = h_{\text{ш}} + h_{\text{вн}}, \quad (4)$$

де $h_{\text{ш}}$ – депресія шахти;

$h_{\text{вн}}$ – внутрішні втрати тиску у вентиляторі;

$$h_{\text{вн}} = R_e Q^2, \quad (5)$$

де R_B – аеродинамічний опір вентилятора, кц;
 Q_B – дебіт вентилятора, м³/с.

$$Q_v = k_{\text{вн.ут}} Q_{\text{ш}}, \quad (6)$$

$$R_v = \alpha(\pi/D^4), \quad (7)$$

де $\alpha = 0,4 \dots 1$ – коефіцієнт, що враховує тип вентилятора;

D – діаметр робочого колеса вентилятора, м.

Значення Q_B , h_v обчислюються для кожного характерного періоду відпрацювання шахтного поля (наприклад, для відпрацювання горизонту) у межах терміну служби вентилятора та наносяться на графік (рис. 3).

Для провітрювання шахти використовується вентилятор, у зону промислового використання якого (область економічних режимів роботи) вписуються всі розрахункові режими роботи. Обраний вентилятор буде економічно працювати протягом усього терміну його служби. Він повинен мати резерв для збільшення, якщо буде потреба, значень Q_B і h_v .

База даних АС вміщує велику кількість вентиляторів, що найчастіше використовуються у якості ВГП на шахтах та рудниках.

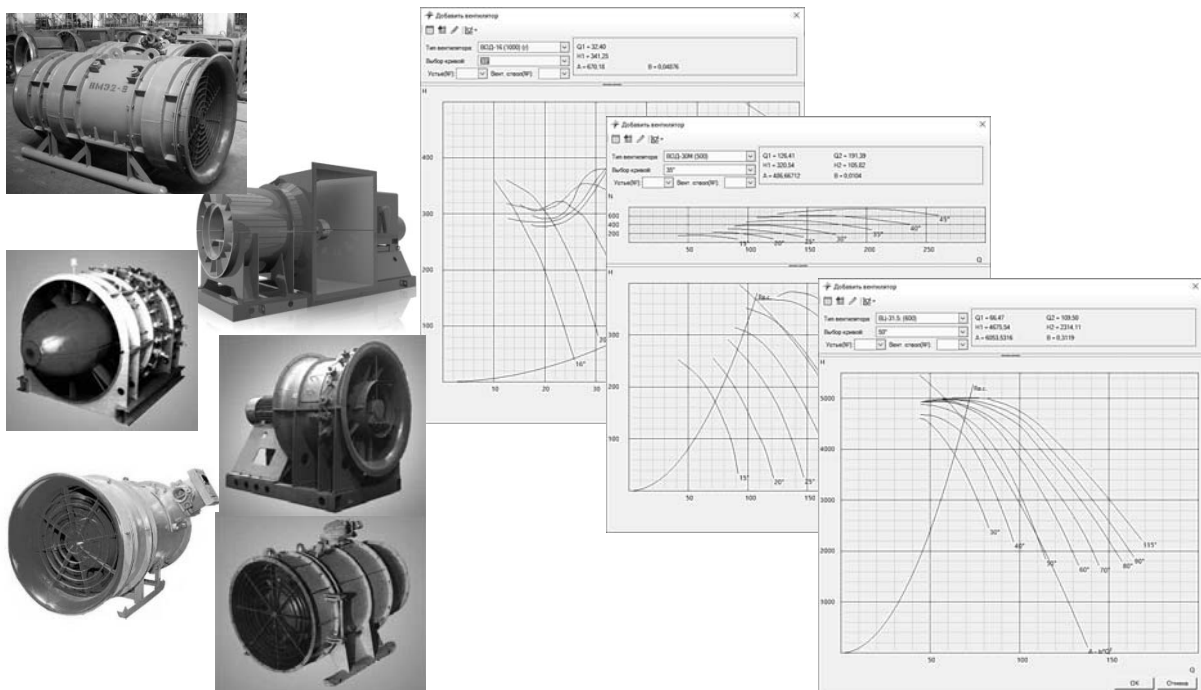


Рис. 3. Визначення оптимальних параметрів роботи вентиляторів головного провітрювання

Задачі розрахунку оптимальних варіантів регулювання розподілу повітря у шахтній мережі безпосередньо зв'язані з вирішенням низки складних теоретичних та прикладних проблем. При виконання аналізу різних варіантів регулювання вентиляції необхідно виконувати

багаторазовий розрахунок розподілу повітря у системі з урахуванням встановлених регуляторів (активних і пасивних).

Витрати повітря для шахти в цілому визначаються за формулою:

$$Q_{ш} = 1,1 (\Sigma Q_{в.д} + \Sigma Q_{т.в} + \Sigma Q_{ног. в} + \Sigma Q_{під.в} + \Sigma Q_{к} + \Sigma Q_{в.с}), \text{ м}^3/\text{хв.}, \quad (8)$$

де 1,1 – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу повітря в мережі гірничих виробок;

$\Sigma Q_{в.д}$ – витрати повітря для провітрювання виймальних ділянок, $\text{м}^3/\text{хв.}$;

$\Sigma Q_{т.в}$ – витрати повітря, що подавалося до ВМП для відособленого провітрювання тупикових виробок, $\text{м}^3/\text{хв.}$;

$\Sigma Q_{ног. в}$ – витрати повітря для відособленого провітрювання виробок, що погашаються, $\text{м}^3/\text{хв.}$;

$\Sigma Q_{під.в}$ – витрати повітря для відособленого провітрювання підтримуваних виробок, $\text{м}^3/\text{хв.}$;

$\Sigma Q_{к}$ – витрати повітря для відособленого провітрюванні камер, $\text{м}^3/\text{хв.}$;

$\Sigma Q_{в.с}$ – втрати повітря через вентиляційні спорудження, розташовані за межами виймальних ділянок, $\text{м}^3/\text{хв.}$

При декількох вентиляційних установках за формулою (8) визначаються, відповідно зі схемою провітрювання, витрати повітря за групами виробок (крилу, шахтному шару), провітрюваних окремими вентиляторами. Загальні витрати повітря для шахти розраховуються як сума отриманих результатів. Витрати повітря для провітрювання шахти, що визначаються за формулою (8), мають задовольняти при проектуванні умові (9), для діючих шахт – (10).

$$Q_{ш} \geq 133,3 (\Sigma \check{I}_{в.д} + \Sigma \check{I}_{т.в} + \Sigma \check{I}_{ст} + \Sigma \check{I}_{н.в}), \quad (9)$$

де $\Sigma \check{I}_{в.д}$ – абсолютне середнє газовиділення на виймальних ділянках, $\text{м}^3/\text{хв.}$;

$\Sigma \check{I}_{т.в}$ – абсолютне середнє газовиділення у відокремлених провітрюваних тупикових виробках, $\text{м}^3/\text{хв.}$;

$\Sigma \check{I}_{ст}$ – абсолютне середнє газовиділення зі старих вироблених просторів раніше відпрацьованих поверхів і горизонтів, $\text{м}^3/\text{хв.}$;

$\Sigma \check{I}_{н.в}$ – абсолютне середнє газовиділення виробок, що погашаються та підтримуються, $\text{м}^3/\text{хв.}$

$$Q_{ш} \geq \frac{100 k_{н.ш}}{C - C_0} \sum \bar{I}_{вих}, \quad (10)$$

де $k_{н.ш}$ – коефіцієнт нерівномірності газо(пило)виділення в шахті, як правило, для шахт, приймається – 1,1;

C – припустима концентрація газу (пилу) у вихідних вентиляційних струменях з шахти, %; ухвалюється згідно ПБ;

C_0 – концентрація газу (пилу) в атмосферному повітрі на поверхні, %; при розрахунках за виділенням метану приймається 0, а за вуглекислим газом визначається за даними аналізів;

$\Sigma \dot{I}_{вих.}$ – абсолютне середнє газо(пило)виділення у вихідних вентиляційних струменях з шахти, $\text{м}^3/\text{хв.}$

Одним із головних методів, що використовується у АС «Розрахунок вентиляції» є модифікований метод поконтурної ув'язки втрат тиску Андріяшева-Кроса [4] з визначенням поправочних коефіцієнтів для кожної ітерації методом Ньютона [5].

Застосування подібної методики розрахунків дозволяє отримати високу збіжність чисельного рішення і зменшити час розрахунку.

Критеріями оптимізації для вентиляційної мережі можуть виступати: мінімізація енерговитрат або мінімальна кількість регуляторів. Кожному варіанту регулювання притаманні свої характерні властивості і він має позитивні та негативні риси з позиції застосування інших факторів. До таких факторів відносяться: проблеми технологічного монтажу та експлуатації регуляторів для вибраних гілок мережі, стабільність повітряних потоків при зміні топології мережі під час ведення гірничих робіт або виникненні аварійних ситуацій та інші [6]. Для оцінювання ефективності конкретного варіанту розташування регуляторів та вибору їх режимів використовують наближені методи.

Якщо розглядати АС «Розрахунок вентиляції» з позиції безперервного забезпечення свіжим повітрям гірничих виробок, то можна відзначити можливість автоматичного розрахунку базових параметрів мережі (витрати повітря, аеродинамічний опір, депресію, швидкість повітряного потоку, об'єми виробок, сумарний опір) для різних варіантів її експлуатації (зміна режимів провітрювання – прямий або реверсивний, перехід вентилятора на іншу продуктивність, зміна теплових депресій гілок мережі при настанні аварійних ситуацій у шахті тощо). Для знаходження оптимального режиму провітрювання система дозволяє порівнювати між собою декілька варіантів розрахунку з кольоровою індикацією відмінних показників.

Не менш важливим фактором використання АС є розрахунки забруднення шахтної атмосфери. Інформація щодо газовиділення враховується для кожної виробки як функціональний (змінний) або статичний параметр [1].

Середня величина газовиділення у виробках визначається за формулою:

$$I_c = I_{c.k.} - I_{c.n.}, \quad (11)$$

де $I_{c.n.}$ $I_{c.k.}$ – дебіт газу у вентиляційному потоці відповідно на початку на наприкінці виробки.

Для визначення Q_n та Q_k визначають дебіти повітря на початку та в кінці виробки, а також середню концентрацію газів $C_{c,n}$ та $C_{c,k}$, а після цього визначають газовиділення згідно формули:

$$\left. \begin{aligned} I_{c,k} &= Q_k \cdot C_{c,k} / 100 \\ I_{c,n} &= Q_n \cdot C_{c,n} / 100 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Процес розповсюдження газів у виробках під впливом конвективного перенесення, молекулярної та турбулентної дифузії носить назву конвективної дифузії.

Загальне рівняння турбулентної дифузії, що використовується в АС, має такий вид:

$$\frac{\partial c_m}{\partial t} + \frac{\partial c_m u}{\partial x} + \frac{\partial c_m v}{\partial y} + \frac{\partial c_m w}{\partial z} = 0; \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} c_m &= c_c + c_n \\ u &= u_c + u_n \\ v &= v_c + v_n \\ w &= w_c + w_n \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

де c_m – миттєве значення концентрації газу;

u, v, w – миттєві значення компонент швидкості руху повітря;

c_c – середня концентрація газу;

u_c, v_c, w_c – середнє значення компонент швидкості руху повітря;

u_n, v_n, w_n – пульсаційні складові швидкості руху повітря;

c_n – пульсаційна концентрація газу;

t – час.

Розрахунок концентрації виконується за формулами (10)–(13) для всіх гілок, що входять до складу розрахункової моделі.

Світлова індикація концентрації забруднюючих речовин дозволяє відобразити для гілок розрахункової мережі ступінь концентрації шкідливих речовин у повітрі, позначати виробки зі значенням концентрації шкідливих речовин вище загранично припустимі концентрації (рис. 4). Розрахунки можуть бути проведені для будь-якої кількості забруднюючих показників: метан, радон, водень тощо.

На основі проведеного аналізу визначаються варіанти роботи вентиляційної мережі для зменшення величини концентрації забруднюючих речовин у повітрі до рівнів нижче за ГПК.

Цільове призначення АС «Розрахунок вентиляції» не обмежується лише виконанням розрахунків режимів роботи вентиляційної мережі у штатних ситуаціях. На базі підготовлених для розрахунку моделей система дозволяє проводити моделювання її поведінки у непередбачуваних та аварійних ситуаціях. До аварійних ситуацій, що впливають на склад шахтного повітря, відносяться пожежі у виробках, пламеніння електро- та енергокомунікацій, що призводять до задимлення виробок і розповсюдження диму за мережею.

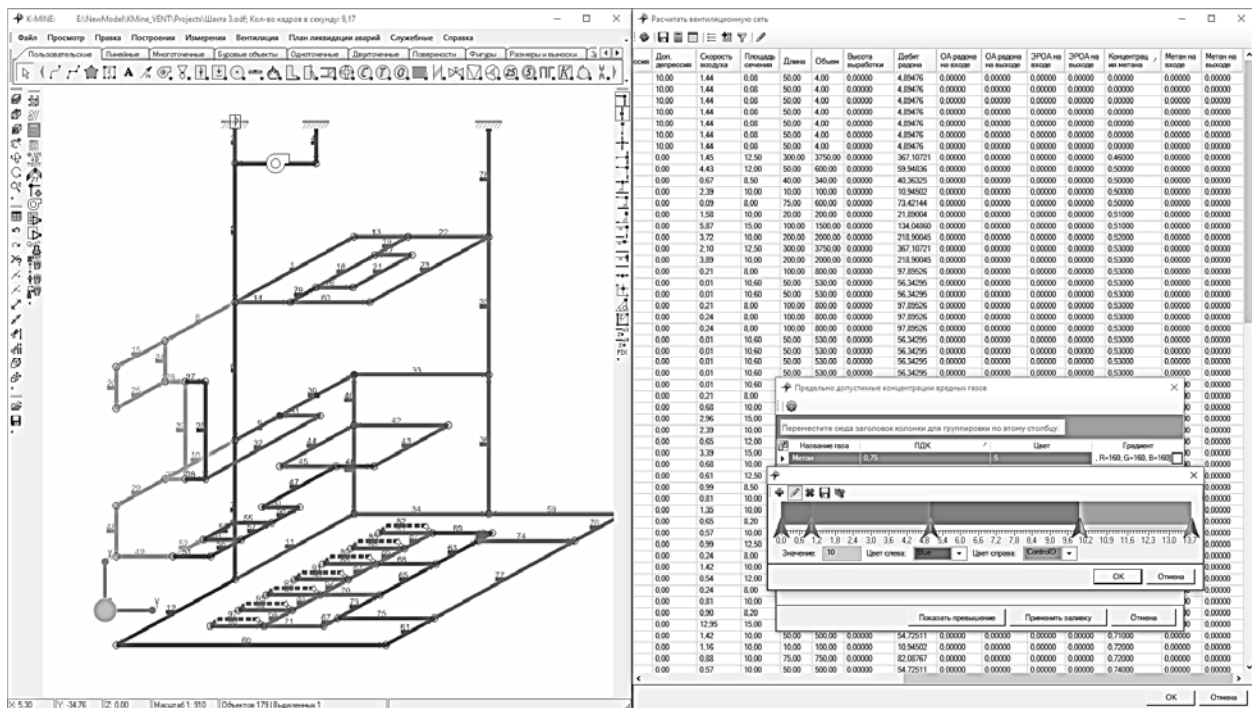


Рис. 4. Світлова індикації концентрації забруднюючих речовин у шахтному повітрі для вибраного режиму провітрювання

Цільове призначення АС «Розрахунок вентиляції» не обмежується лише виконанням розрахунків режимів роботи вентиляційної мережі у штатних ситуаціях. На базі підготовлених для розрахунку моделей система дозволяє проводити моделювання її поведінки у непередбачуваних та аварійних ситуаціях. До аварійних ситуацій, що впливають на склад шахтного повітря, відносяться пожежі у виробках, пламеніння електро- та енергокомунікацій, що призводять до задимлення виробок і розповсюдження диму за мережею.

До особливостей функціонування АС при моделюванні аварійних режимів провітрювання відносяться: визначення об'ємів і швидкості розповсюдження диму та забруднюючих речовин для вибраного режиму провітрювання, проведення оцінювання очікуваної ефективності вентиляційного режиму при аваріях, розрахунок і моделювання теплової депресії від пожежі, оцінювання стійкості вентиляційних струменів, прогнозування можливих наслідків розвитку аварійної ситуації тощо.

З точки зору дотримання норм безпеки у аварійних ситуаціях система дозволяє вирішувати такі завдання: розрахунок найкоротших, або найоптимальніших маршрутів виведення працівників шахти (рудника) із зони аварії, з визначенням загального шляху руху в безпечних і загазованих виробках і урахування можливості непрохідних виробок; розрахунок найкоротших маршрутів для руху гірничих рятувальників до місця настання аварії та визначення видів та категорій їх робіт за ділянками маршруту. Для вирішення таких завдань використовуються математичні методи знаходження найкоротшого шляху в мережі графу, з рахуванням обмежень в його гілках. Зазначені

функції можуть бути використані при формуванні планів ліквідації аварій далі – ПЛА).

Ефективність застосування АС «Розрахунок вентиляції» при проектуванні та експлуатації систем шахтної (рудничної) вентиляції визначається показниками:

- зниження витрат на електроенергію за рахунок вибору оптимального режиму роботи активних регуляторів (вентиляторів головного провітрювання);

- зменшення об'ємів гірничо-капітальних робіт на вентиляційні виробки на 3...5 % за рахунок детального аналізу вентиляційної ситуації на етапі проектування;

- зниження до 25 % витрат на будівництво вентиляційних споруджень і вентиляційне устаткування за рахунок вибору оптимального місця їх розташування з урахування орографії місцевості на етапі проектування;

- підвищення швидкості реагування на зміни вентиляційної ситуації в штатних і аварійних режимах;

- автоматизація обробки та аналізу депресійних зйомок тощо.

Застосування наведених функцій АС K-MINE «Розрахунок вентиляції» дозволяє використовувати її у якості системи підтримки прийняття рішень для оптимізації регуляторів розподілу повітря шахт і рудників, що, в свою чергу, суттєво зменшує ризики шкідливого впливу забруднюючих речовин і пилу на здоров'я працівників і, таким чином, підвищує загальну безпеку ведення гірничих робіт.

Список літератури

1. Аэрология горных предприятий. / [К. З. Ушаков, А. С. Бурчаков, Л. А. Пучков, И. И. Медведев]; под редакцией проф., д-ра техн. наук К. З. Ушакова. 3-е изд., перераб. и доп. – М., Недра, 1987. – 421 с.

2. Правила безпеки у вугільних шахтах / Затв. Наказом Міністерства праці та соціальної політики України 22.08.2000 № 215. – К., 2000.

3. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны (Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі) : СанПиН 4617-88 : від 26.05.1988.

4. Андрияшев М. М. Гидравлические расчеты водопроводов и водопроводных сетей /М. М. Андрияшев. – М., 1964. – 107 с.

5. Круглов Ю. В. Моделирование систем оптимального управления воздушораспределением в вентиляционных сетях подземных рудников : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.20 / Ю. В. Круглов. – Пермь. – 2006. – 170 с.

6. Вассерман А. Д. Проектные обоснования параметров вентиляции рудников и подземных сооружений /А. Д. Вассерман. – Л. : Наука, 1988. – 152 с.

Дата подання статті до збірника – 04.11.2015