

11. Вайсберг Л. А., Баранов В.Ф. Состояние и перспективы развития циклично-поточных технологий. // Горный журнал. – 2002, –№ 4. – С. 11-14, 66-72.
 12. Снитка Н.П., Шеметов П.А. Развитие ЦПТ с крутонаклонным конвейером в глубоком карьере Мурунтау. // Горнопромышленные ведомости. <http://www.miningexpo.ru/news/21589> – 2012.
 13. Афанасьев С.В., Жуков С.О.. Теоретичні засади менеджменту конверсії гірничорудних підприємств. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2008. – 246 с.
 14. Жуков С.А., Федоренко С.А., Пузанов Е.В. Координация грузопотоков при переводе рудных карьеров на комплексное освоение недр // Разраб. рудн. месторождений. – Кривой Рог: КТУ, 2002. - Вып. 78. – С. 32-36.
 15. Федоренко С.А., Жуков С.А. Определение параметров формируемого участка карьера при многоканально-интегрированной транспортной схеме // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог: КТУ, -2007. - Вып. 91. – С. 31-36.
 16. Бахтурин Ю.А. Обоснование рациональных технологических параметров автомобильно-конвейерно-железнодорожного транспорта на карьерах: Автореф. дис. ...канд. техн. наук / ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: 1999. - 20 с.
- Рукопись поступила в редакцию 26.03.16

УДК 622.418: 622.8

А.О. ГУРІН, О.О. ЛАПШИН, доктори техн. наук, проф., Д.О. ЛАПШИНА, аспірантка
Криворізький національний університет

УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ МІКРОКЛІМАТУ В ПІДЗЕМНИХ КАМЕРАХ ШАХТ З ДЖЕРЕЛАМИ ТЕПЛА

Відсутність ефективного провітрювання і надлишки тепла, утворені від роботи обладнання формують у підземних камерах шахт несприятливий мікроклімат, що негативно позначається на продуктивності праці та здоров'ї шахтарів. Найбільш несприятливі мікрокліматичні умови утворюються у камерах водовідливу, де за одночасної роботи двох-трьох насосних установок потужністю 800 кВт кожна, температура повітря сягає 36-38°C, а швидкість його руху внаслідок відсутності ефективної вентиляції знаходиться в межах 0,2-0,3 м/с, що не відповідає нормативним вимогам. З метою поліпшення умов праці в підземних камерах з джерелами тепла запропоновано спосіб нормалізації мікроклімату та регулювання його параметрів. Розроблення даного способу базується на науковому обґрунтуванні отримання ефекту охолодження від адиабатичного розширення стисненого повітря. Для реалізації запропонованого способу розроблено конструкцію охолоджувальної установки «Клімат», робочі параметри якої встановлювалися на підставах експериментальних досліджень в промислових умовах камер водовідливу шахт Кривбасу. Результати промислових випробувань засвідчили ефективність охолодження повітря в камерах на рівні 35-54%. Застосування установки «Клімат» у підземних камерах шахт дає можливість підтримувати температуру повітря на рівні 22-24°C, швидкість його руху в межах 0,5-2,5 м/с і відносну вологість не більше 60-70%. Результати досліджень представлені у статті впроваджені у промислових умовах камер водовідливу шахти «ім. Леніна» ПАТ «Кривбасзалізрудком» і шахти «ім. Артема» ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Ключові слова: ефективне провітрювання, підземні камери, температура повітря, камери водовідливу

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. За сучасними проектами, відпрацювання покладів шахтами Кривбасу ведеться на глибинах 1300-1500 м в умовах ускладнення вентиляції гірничих виробок, зокрема підземних камер з джерелами надходжень тепла. Найбільш несприятливі мікрокліматичні умови спостерігаються в камерах водовідливу, де за одночасної роботи двох-трьох насосних установок температура повітря сягає 36–38 °С, а швидкість його руху через неефективне провітрювання знаходиться в межах 0,2-0,3 м/с, що не відповідає нормативним вимогам [1].

Зазвичай у камерах водовідливу розташовується 5-6 насосних установок, які є джерелами надходжень тепла - у кількості 160кВт від роботи однієї одиниці обладнання. Видалення теплого повітря з камери водовідливу ускладнюється через відсутність спеціальних вентиляційних виробок і перепаду тисків на вході і виході з камери. Несприятливі мікрокліматичні умови в камерах водовідливу негативно позначаються на продуктивності праці та здоров'ї шахтарів [2,3]. Розв'язання проблеми нормалізації мікроклімату в підземних камерах шахт з джерелами тепла лежить у площині реалізації державної цільової програми поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014-2018 рр., затвердженої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 4 квітня 2013 р. № 178-VII [4].

Аналіз досліджень і публікацій. У дослідженні світової практики з нормалізації мікроклімату в шахтах окремої уваги заслуговує спосіб охолодження повітря льодом, який реалізується на шахтах ЮАР шляхом застосування паро-компресорних холодильних машин сумісно з льодогенераторами, або двохступеневими вакуумними заморожувальними системами потужністю

2,5-5 МВт. [5-7]. Обладнання, що застосовується для утворення льоду має високу вартість і його придбання суттєво підвищує собівартість видобутої продукції, внаслідок чого рекомендувати його для умов залізрудних, або вугільних шахт економічно недоцільно. Разом із цим практичний досвід Канади доводить, що спосіб охолодження повітря льодом можливо реалізувати шляхом його заморожування в спеціальних камерах, крізь які надходить повітря в шахту. Такий спосіб є економічним і простим та разом із цим його застосування є доцільним у тих кліматичних районах, де низька температура спостерігається протягом тривалого часу, що дає можливість заготівлі великої кількості льоду.

Досвід поліпшення теплових умов у вугільних шахтах шляхом застосування пересувних шахтних кондиціонерів типу КПШ та холодильних установок виробництва ВАТ «Холодмаш» свідчить про те, що їх застосування не розв'язує повною мірою дану проблему. Застосування холодильної техніки у шахтах стримується їх великими габаритами, високою вартістю, складною конструкцією та необхідністю спеціального обслуговування. Деякі з відомих способів і засобів поліпшення теплових умов в гірничих виробках, незважаючи на їх економічність, простоту і доступність виготовлення не можуть реалізовуватися в камерах з працюючим обладнанням. Так, робота електродвигунів унеможлиблює застосування в таких камерах способу охолодження повітря з використанням води, а використання вентиляторів місцевого провітрювання є ефективним лише за умови, що температура повітря не перевищує 30°C [8, 9]. Таким чином, питання нормалізації мікроклімату підземних камер шахт із працюючим обладнанням залишається невирішеним і потребує пошуку нових ефективних підходів до його розв'язання.

Постановка завдання. Поліпшення умов праці в підземних камерах шахт з джерелами тепла за рахунок розроблення технології нормалізації мікроклімату та управління його параметрами.

Викладення матеріалу та результати. Сучасні глибокі шахти мають на робочих горизонтах камери різного призначення, серед яких камери водовідливу, електропідстанцій та подрібнення руди, які розташовуються у приствольному дворі шахт. Крім того, камери електровозного і вагонного депо, розташовуються переважно у центральній частині головного квершлягу. Камери підйомних і ліфтових машин, ремонтних майстерень, схову вибухових речовин, аварійних протипожежних складів облаштовуються близько зони ведення гірничих робіт. Камери аварійного повітропостачання (КАПП) розташовуються у приствольному дворі шахт і в зоні ведення гірничих робіт. Дослідження мікрокліматичних умов в підземних камерах шахт Кривбасу і «ЗЗРК» показали, що найбільш гостро постає питання нормалізації мікроклімату в камерах шахтного водовідливу табл. 1.

Таблиця 1

Результати дослідження параметрів мікроклімату в камерах водовідливу шахт Кривбасу і ЗИРК

Шахта	Горизонт, м	Геометричні параметри камери, $l \times b \times h$, м	Кількість насосів в роботі, шт	Температура повітря, °С			Швидкість руху повітря в камері, м/с	Відносна вологість повітря, %
				I*	II**	III***		
ім. Леніна	527	33,5×4,2×5,5	1	24	36	34,5	0,16	42
Гвардійська	1190	35×4,5×6	2	26	36	35	0,30	60
Жовтнева	1265	33×5,5×6	2	25	36	35	0,20	65
Родіна	500	48×4,5×5,5	3	23	34	32	0,32	44
	940	36×5,0×6,0	2	24	30	28	0,35	79
	1240	36×6,5×7,0	3	25	34	32,5	0,28	79
ім. Артема	475	38,7×4,6×4,2	2	24	34	32	0,25	75
Ювілейна	480	33×4,5×6,0	2	24	35	33	0,20	52
Експлуатаційна	940	32×4,5×6,0	2	26	37	34	0,35	52

* – на вході в камеру; ** – у камері; *** – на виході з камери

Так, температура повітря в часи найбільш інтенсивної роботи сягає за 36 °С, що значно перевищує нормативно допустимі величини. Швидкість руху повітря, яка не суттєво залежить від роботи обладнання не перевищує 0,15 м/с. Відносна вологість повітря коливається в межах 50-80. Камери електропідстанцій мають сполучення з камерами водовідливу та характеризуються

приблизно однаковими мікрокліматичними умовами. Працююче електрообладнання в таких камерах є джерелом значних надходжень тепла.

З метою поліпшення умов праці в підземних камерах з джерелами тепла розроблено комплексну технологію управління параметрами мікроклімату. Розроблення технології полягало у реалізації трьох етапів: розроблення конструкції охолоджувальної установки «Клімат» для поліпшення теплових умов у підземних камерах; здійснення математичного моделювання процесу охолодження повітря з використанням установки «Клімат»; розроблення програми управління параметрами мікроклімату в підземних камерах шахт «Клімат-ПК».

В основу розроблення конструкції установки «Клімат» покладено використання ефекту охолодження, що має місце під час розширення стисненого повітря. Енергія стисненого повітря широко застосовується в процесі гірничого виробництва в глибоких шахтах, це обумовлюється високим рівнем надійності, безпеки в роботі та економічної доцільності [10]. Більшість технологічних процесів: буріння шпурів та свердловин, їх заряджання; навантаження гірської маси у вагони; допоміжні роботи з кріплення, ремонту обладнання та ін. здійснюються з використанням пневматичної енергії. Разом із цим, спостерігається тенденція до застосування гірничого обладнання з гідравлічним приводом, що зумовить в майбутньому вивільнення частини пневматичної енергії з технологічного циклу процесів підземної розробки.

Доцільність застосування пневматичної енергії в умовах глибоких шахт підтверджується ще й тим, що окрім вищезазначених переваг з'являється можливість її комплексного використання. Це стосується теплової енергії підвищеного (при виробництві) і пониженого (при споживанні) температурного потенціалу. Так, робота машин з пневматичним приводом супроводжується виділенням відпрацьованого стисненого повітря помітно нижчої температури у порівнянні з оточуючим повітрям. Таким чином доводиться доцільність застосування пневматичної енергії не лише для приводу машин і механізмів, але й для кондиціонування повітря в гірничих виробках, у тому числі і в підземних камерах різного призначення.

Використання вихрових труб дозволяє підсилити ефект охолодження від розширення стисненого повітря, що було виявлено вперше французьким інженером Ж. Ж. Ранком у 1931 р., і широко використовується в сучасній інженерній практиці різних галузей промисловості. Основними її частинами є: вентилятор для створення необхідної швидкості та кількості повітря, що подається у камеру та пневматично-вихровий пристрій, розроблений на базі конструкції вихрової труби Меркулова.

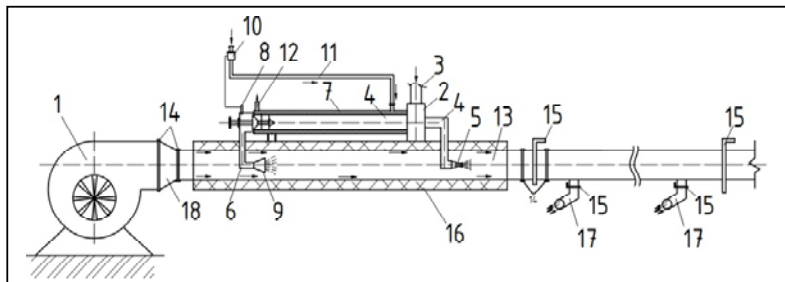


Рис. 1. Загальний вид охолоджувальної установки «Клімат»: 1 - від-центровий вентилятор; 2 - пневматичний вихровий пристрій; 3 - патрубок для підведення стисненого повітря; 4 - патрубок холодного повітря; 5 - сопло Лавалля; 6 - патрубок гарячого повітря; 7 - водяна охолоджувальна рубашка; 8 - датчик температури повітря; 9 - дифузор; 10 - електроклапан; 11 - гідравлічна система; 12 - зливний патрубок; 13 - вентиляційний трубопровід; 14 - фланцеве з'єднання; 15 - шибери кількісної регуляції повітря; 16 - абсорбційний глушник трубчастого типу; 17 - поворотні душіруючі патрубки ПДП-100

ний патрубок; 13 - вентиляційний трубопровід; 14 - фланцеве з'єднання; 15 - шибери кількісної регуляції повітря; 16 - абсорбційний глушник трубчастого типу; 17 - поворотні душіруючі патрубки ПДП-100

До цих основних частин додаються такі: вентиляційний трубопровід, глушник шуму та шибер для змінення кількості вентиляційного повітря. Установка «Клімат» функціонує у двох режимах: провітрювання - за умови, що температура повітря в камері не перевищує 30°C і охолодження - якщо вона є вищою за 30°C.

В роботі [11], присвяченій дослідженню теплофізичних властивостей струменів, доводиться, що структура математичної моделі, яка описує надлишкову температуру повітря, по відношенню до оточуючого середовища, в довільній точці охолодженого компактного струменя, що витікає з круглого отвору, може бути представлена у вигляді

$$\Delta T(r, x) = \Delta T_n \cdot a \cdot \left(\frac{r_0}{x} \right)^b \cdot e^{-c \left(\frac{r}{x} \right)^2}, \quad (1)$$

де $\Delta T(r, x) = T(r, x) - T_0$, $\Delta T_n = T_n - T_0$, $T(r, x)$ – абсолютна температура у точці струменя з координатами (r, x) , $^{\circ}K$; T_0 – абсолютна температура оточуючого середовища; T_n – середня абсолютна температура струменя на виході з установки, $^{\circ}K$; r_0 – радіус вихідного отвору установки, м; a, b, c – числові параметри.

Для знаходження значень числових параметрів, що входять у формулу (1), скористаємося результатами досліджень параметрів охолодного струменя в умовах підземної камери водовідливу шахти ім. Артема ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», які наведено у табл. 2.

На підставі вимірювань здійснених під час експериментальних досліджень, у подальших розрахунках було прийнято $T_0 = 305^{\circ}K$, $T_n = 285,4^{\circ}K$, $r_0 = 0,15$ м.

Таблиця 2

Значення надлишкової температури під час витoku струменя з пневматично-вихрового пристрою					
x ,	5	10	15	20	25
r , м	1,5	2,0	2,5	2,0	1,5
ΔT , К	-13	-12,2	-11,6	-11	-8,8
ΔT , К	-13,007	-12,82	-10,86	-10,51	-9,56

Для зручності знаходження числових параметрів і спрощення форми запису відповідно до даних, наведених у табл. 1, доцільно перетворити формулу (1) шляхом логарифмування і опустити функціональну залежність ΔT від координат r та x

$$\eta = \alpha + b \cdot \xi_1 + c \cdot \xi_2, \quad (2)$$

$$\text{де } \eta = \ln \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_n} \right); \alpha = \ln a, \xi_1 = \ln \left(\frac{r_0}{x} \right); \xi_2 = \left(\frac{r}{x} \right)^2.$$

Для знаходження числових параметрів, які входять лінійно у формулу (2), було застосовано метод найменших квадратів, реалізований функцією, що входить до складу «Майстер функцій» Microsoft Excel.

За результатами проведених розрахунків було отримано такі значення $a = 2,779$, $b = 0,6771$, $c = -9,053$. При цьому коефіцієнт множинної кореляції дорівнював $R = 0,9926$, що вказує на тісну кореляційну залежність. З урахуванням отриманих значень формула (1) набуде виду

$$\Delta T(r, x) = 16,103 \cdot \Delta T_n \cdot \left(\frac{r_0}{x} \right)^{0,6771} \cdot e^{-9,053 \cdot \left(\frac{r}{x} \right)^2} \quad (2 \leq x \leq 12). \quad (3)$$

Розрахунок за формулою (3), що наведений в останньому рядку табл. 1, демонструє практичний збіг даних експериментів і результатів розрахунків.

Формула (3) дозволяє дослідити температурне поле струменя. Якщо прийняти, що є певні значення надлишкової температури ΔT_{\min} , $\Delta T_{\text{сер}}$, ΔT_{\max} , які доцільно розглядати у якості граничних, то теплова далекобійність струменя – відстань, на якій закінчується відчутний струмінь, визначається за формулами

$$x_{\max} = 29,75 \cdot r_0 \cdot \left(\frac{\Delta T_n}{\Delta T_{\min}} \right)^2, \quad (4)$$

$$x_{\text{сер}} = 29,75 \cdot r_0 \cdot \left(\frac{\Delta T_n}{\Delta T_{\text{сер}}} \right)^2, \quad (5)$$

$$x_{\text{кр}} = 29,75 \cdot r_0 \cdot \left(\frac{\Delta T_n}{\Delta T_{\max}} \right)^2. \quad (6)$$

Мінімальна величина надлишкової температури визначає лінію ізотерми, що відповідає зовнішньому контурові струменя. Цю ізотерму можна визначити як граничну шляхом підстановки ΔT_{\min} у формулу (4). Критична відстань за віссю струменя, на якому він матиме найбільшу товщину, визначиться для граничної ізотерми умовою з урахуванням ΔT_{\max}

$$(dr/dx)=0 \quad (7)$$

При цьому максимальна середня та мінімальна товщини струменя визначаються за такими формулами

$$r_{\max} = 5,35 \cdot r_0 \cdot \left(\frac{\Delta T_n}{\Delta T_{\min}} \right)^2, \quad (8)$$

$$r_{\text{сеп}} = 5,35 \cdot r_0 \cdot \left(\frac{\Delta T_n}{\Delta T_{\text{сеп}}} \right)^2, \quad (9)$$

$$r_{\text{кр}} = 5,35 \cdot r_0 \cdot \left(\frac{\Delta T_n}{\Delta T_{\max}} \right)^2. \quad (10)$$

На рис. 2 наведено ізотерми струменя, розраховані за формулами (8) – (10) для величин ΔT_{\min} , $\Delta T_{\text{сеп}}$, ΔT_{\max} .

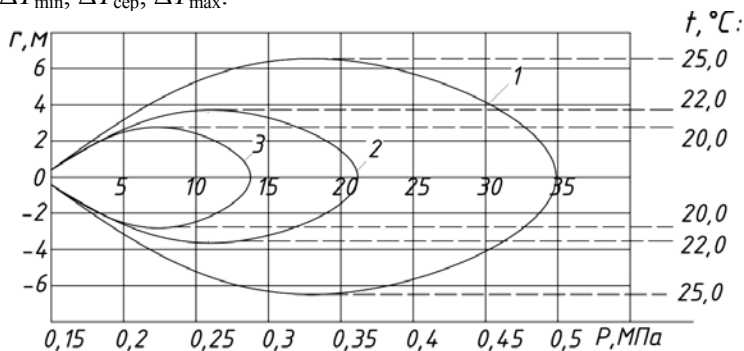


Рис. 2. Ізотерми охолоджувального струменя: 1- $\Delta T_{\min}=7$ К, $\Delta T_{\text{сеп}}=9$ К, $\Delta T_{\max}=11$ К

Аналіз ізотерм, наведених на рис. 3, свідчить про те, що охолоджувальна далекобійність струменя зменшується зі збільшенням надлишкової температури. Так, за мінімальної надлишкової температури, яка дорівнює $\Delta T_{\min}=7$ К,

охолоджувальна далекобійність струменя та його ширина є максимальними: $x_{\max}=34,9$ м, $2r_{\max}=12,58$ м. Критичні їх значення $x_{\text{кр}}=14,16$ м, $2r_{\text{кр}}=5,096$ досягаються за максимальних значень $\Delta T_{\max}=11$ К. Разом із цим, опрацювання результатів експериментальних досліджень передбачало визначення масових витрат вентиляційного M_v і холодного M_x повітря. Частка вентиляційного повітря в охолодній повітряній суміші на виході з установки «Клімат» становила 15 % і збільшувалася поступово до 93% по мірі просування охолодного струменя по довжині камери.

Крім того, досліджувалося збільшення площі поперечного перерізу струменя зі збільшенням довжини його розповсюдження. Так, площа поперечного перерізу випускного отвору трубопроводу, яким охолодний струмінь подавався у камеру від установки становила $S=0,0176$ м². Площа поперечного перерізу охолодного струменя на відстані $L=5-25$ м змінювалася у межах $S=4,33-19,32$ м².

Унаслідок розширення охолодного струменя і його теплообміну з оточуючим повітрям у камері, змінювалася температура охолодної повітряної суміші: від 0°C (на виході з трубопроводу) до 12-24,8 °C (по довжині камери). Температура повітря у камері протягом випробувань змінювалася у межах $T_k=36-21,2$ °C, а відносна вологість - у межах $\varphi=62-65$ %.

За результатами досліджень розроблено програму для управління мікрокліматом в підземних камерах з застосуванням пневматично-вихрового пристрою і відцентрового вентилятора.

Вона написана мовою програмування Visual Basic for Applications в Excel та має нескладний інтерфейс.

Робота з програмою здійснюється у два кроки, першим з яких є задання параметрів для моделювання, а саме: початкової температури повітря в камері t_0 , кількості вентиляційного повітря Q_v , необхідної для ефективного провітрювання, або тиску стисненого повітря, що підводиться до ПВП для нормалізації теплових умов у підземній камері.

Користувач задає параметри для моделювання шляхом їх вибору серед можливих варіантів передбачених під час розроблення програми (рис. 3).

Так для режиму «Провітрювання», який ефективно застосовувати, якщо t_0 не перевищує 30°C, розраховано оптимальні значення Q_v , м³/с: 0,075; 0,11; 0,146; 0,162; 0,197; 0,235. Для режиму «Охолодження», який доцільно застосувати, якщо t_0 перевищує 30°C, оптимальними значеннями P , кПа є такі: 10; 20; 30; 40; 50; 60.

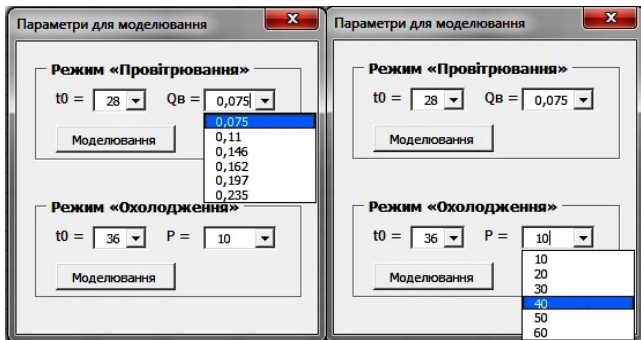


Рис. 3. Крок 1: Задання параметрів для моделювання

Другим кроком є отримання результату моделювання - кінцевої температури в камері t_k в графічному і аналітичному вигляді відповідно до рівняння $t_k = a \cdot e^{-bx}$, причому значенню «x» відповідають оптимальні значення Q_v або P відповідно до обраного режиму програми. Розрахунок здійснюється автоматично після задання вихідних параметрів і натискання користувачем кнопки «Моделювання» (рис. 4а,б).

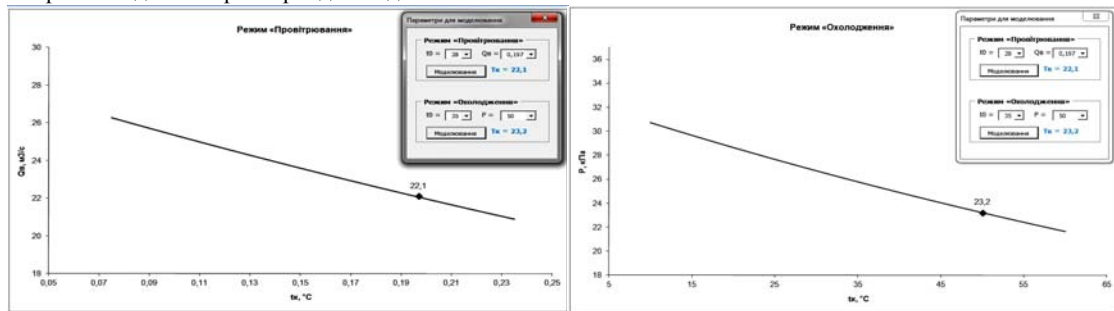


Рис. 4. Крок 2: Результат моделювання – визначення t_k : а - режим провітрювання; б - режим охолодження

Застосування цієї програми дозволяє користувачеві регулювати параметри мікроклімату в підземній камері з оптимальним використанням ресурсу стисненого та вентиляційного повітря.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Виходячи з обґрунтування можливості ефективного застосування пневматичної енергії для кондиціювання повітря в гірничих виробках, зокрема в підземних камерах різного призначення, у статті запропоновано спосіб охолодження рудникового повітря з використанням енергії адиабатичного розширення стисненого повітря, для реалізації якого розроблено конструкцію охолоджувальної установки «Клімат». Застосування установки «Клімат» ПВП і програми регулювання параметрів мікроклімату в підземних камерах дозволяє забезпечувати поліпшення умов праці персоналу і підтримувати температуру повітря відповідно до вимог санітарно-гігієнічних норм.

Список літератури

1. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и рассыпных месторождений подземным способом. – М.: Недра, 1977. – 225 с.
2. Лапшин О. Є. Дослідження повітрообміну в камеро подібних виробках з великими теплопритоками / О. Є. Лапшин, Немченко А. А., Коновалюк В. А., Лапшина Д. О. // Вісник криворізького національного університету. – 2013. - Вип. 34. - С. 235 – 238.
3. Немченко А. А. Нормализация микроклимата в подземных камерах шахт / А.А. Немченко, Д.А. Лапшина // Сталий розвиток промисловості та суспільства : Міжнар. конф. – 2012. – С. 252-253.
4. Загальнодержавна цільова програма поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2012-2016 роки. <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/178-18>.
5. Fatima Gabru /Safe, deep level mining at record-breaking levels. [Електронний ресурс] : Mining Weekly. – 2009. – Режим доступу: <http://www.miningweekly.com/article/safe-deep-level-mining-at-record-breaking-levels-2009-04-03>.
6. Bluhm S. Important basics of mine ventilation and cooling planning / Bluhm S., von Glehn // Journal Mine Ventilation Society South Africa. – 2004. – V. 57(1). – P. 15 – 24.
7. Rawlins C. Underground mine heat loads and associated reduction methodologies / C. Rawlins // Journal Mine Ventilation Society South Africa. – 2004. – V. 57(1). – P. 25 – 30.
8. Пат. на корисну модель 71139 Україна МПК В01F 5/00. Охолодний ежектор Лапшина / Лапшин О. О., Денгуб В.І., Лапшина Д. О. та ін. – заявник і патентовласник Криворізький національний університет. – № u 20111391; заявл. 07.11.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.
9. Лапшин А. А. Повышение эффективности охлаждения рудничного воздуха форсуночным орошением / А. А. Лапшин, В. И. Ляшенко // Цветная металлургия. – 2014. - № 1. – С. 8–14.
10. Герасименко Г. П. Комплексное использование пневматической энергии при отработке глубоких месторождений / Г. П. Герасименко. – М.: Недра, 1971. – С. 7 – 16.
11. Волков К. Н. Турбулентные струи – статистические модели и моделирование крупных вихрей: монография / К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, В. А. Зазимко. – М.: Физматлит, 2013. – 360 с.

Рукопис подано до редакції 12.04.16