

УДК 622.876

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-22>

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОВІТРЮВАННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ У ВИБОЯХ ГЛИБОКИХ ШАХТ

Костенко Віктор Климентович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри природоохоронної діяльності
Державного вищого навчального закладу
«Донецький національний технічний університет»
ORCID ID: 0000-0001-8439-6564

Богомаз Ольга Петрівна,

PhD, доцент,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0002-8521-0394

Каменець В'ячеслав Ігорович,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гірничої справи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
ORCID ID: 0000-0001-8169-2544

Акулич Андрій Миколайович,

директор департаменту з ремонтів Операційної дирекції
ТОВ "МЕТІНВЕСТ ХОЛДИНГ"
ORCID ID: 0009-0006-7222-3432

У статті розглянуто способи забезпечення комфортних і безпечних умов праці шахтарів у глибоких вибоях вугільних підприємств, де ця проблема набуває дедалі більшої актуальності. Наявні, ґрунтовані на температурних показниках, нормативи мікроклімату для підземних робочих місць унаслідок технічних та економічних причин відрізняються в негативну сторону від прийнятих для поверхні.

Покращувати мікрокліматичні умови на підземних робочих місцях можна шляхом охолодження шахтного повітря з одночасним частковим вилученням вологи. Розрахунки показали, що з осушенням та охолодженням повітря температурою 24 °С нижче точки роси мікрокліматичний показник Humidex зменшується з небезпечного рівня 37,7 до комфортного – 12,5. Сенс удосконалення полягає в доповненні установки місцевого провітрювання теплообмінником відкритого типу, який використовує скраплений азот, – відхід від підготовки металургійного кисневого дуття. Вилучення вологи із шахтного повітря зменшує його густину і, відповідно, витрати на провітрювання мережі гірничих виробок вентиляторами головного провітрювання.

Додатковою перевагою способу покращення стану на робочих місцях є отримання із шахти водного ресурсу доволі високої якості. Вилучення частини такого ресурсу дасть змогу зменшити витрати на придбання води для технологічних потреб та на пожежогасіння.

Узагальнення отриманих результатів дослідження дало змогу оцінити запропонований спосіб нормалізації умов праці гірників у глибоких шахтах, при комплексному підході, який передбачає кондиціювання повітря з одночасним вилученням води, а також полегшення режиму вентиляції гірничих виробок, забезпечує значні переваги з боку екології, промислової санітарії, технології та економіки. Для попереднього розрахунку параметрів та оцінки розробки використані фактичні дані по ПРАТ «Шахтоуправління "Покровське"».

Ключові слова: рудникова атмосфера, мікрокліматичні умови, мікрокліматичний показник осушення повітря, кондиціювання, теплообмінник, водний ресурс

Kostenko Viktor, Bohomaz Olha, Kamenets Viacheslav, Akulych Andrii. Improving ventilation and microclimatic conditions in deep mine walls

The article discusses ways to ensure comfortable and safe working conditions for miners in deep coal mines, where this problem is becoming increasingly relevant. Existing microclimate standards for underground workplaces, based on temperature indicators, differ negatively from those adopted for surface workplaces due to technical and economic reasons.

It is possible to improve microclimate conditions in underground workplaces by cooling the mine air while simultaneously removing some of the moisture. Calculations have shown that with dehumidification and cooling of the air to a temperature 24°C below the dew point, the Humidex microclimate index decreases from a dangerous level of 37.7 to a comfortable level of 12.5. The improvement consists in supplementing the local ventilation system with an open-type heat exchanger that uses liquefied nitrogen, a waste product from the preparation of metallurgical oxygen blast. Removing moisture from the mine air reduces its density and, accordingly, the cost of ventilating the network of mine workings with main ventilation fans.

An additional advantage of this method of improving working conditions is the extraction of fairly high-quality water resources from the mine. The extraction of part of these resources will reduce the cost of purchasing water for technological needs and firefighting.

A summary of the research results made it possible to evaluate the proposed method of normalizing the working conditions of miners in deep mines, using a comprehensive approach that includes air conditioning with simultaneous water extraction, as well as facilitating the ventilation of mine workings, provides significant advantages in terms of ecology, industrial sanitation, technology, and economics. Actual data from PJSC "Pokrovske Colliery Administration" was used for preliminary calculation of parameters and evaluation of the development.

Key words: mine atmosphere, microclimatic conditions, microclimatic indicator of air dehumidification, air conditioning, heat exchanger, water resources.

Вступ. В умовах швидкого розвитку суспільства, інтенсивної індустріалізації попит на енергетичну сировину у світі щороку зростає [1]. Водночас збільшення видобутку вугілля призвело до появи різного роду проблем з погляду на навколишнє середовище та безпеку [2]. До таких проблем належать ендегенні пожежі [3; 4], викиди метану, забруднення водних ресурсів стічними шахтними водами, просідання поверхні, знищення біологічної різноманітності [5] та деградація ґрунтів.

Поступове виснаження неглибоких мінеральних ресурсів вимагає збільшення глибини гірничих робіт, що, своєю чергою, призводить до погіршення мікрокліматичних умов гірничодобувного середовища [6–8] та інтенсивного забруднення, пов'язаного з накопиченням великої кількості гірничодобувних відходів на поверхні [9].

На сьогоднішній день виїмка вугілля на шахтах українського Донбасу відбувається на доволі глибоких горизонтах, що перевищують відмітки 600...800 м, а на деяких шахтах сягають 1200...1500 м. На таких глибинах температура породного масиву становить 25...40 °C і більше, а відносна вологість повітря дорівнює 70...100 %.

Сучасні українські норми мікроклімату на робочих місцях [10] передбачають підтримання, при виконанні важких робіт та робіт середньої важкості, температури не вище 28...29 °C, відносної вологості повітря не більш ніж 70...75 % (за температури 24...25 °C) та швидкості його руху 0,2...0,6 м/с. Перевищення вищевказаних меж температури повітря та відносної вологості призводить до скорочення виносу тепла з поверхні шкіри та загрози нагріву тіла вище критичного рівня, який має назву «кліматична катастрофа» [11].

Для підземних гірничих виробок за українськими нормативними документами

встановлено такі обмеження: максимально допустима температура +26 °C; швидкість руху повітря 0,25–0,6 м/с [12]. Відсутність обмежень щодо вологості повітря в гірничих виробках суперечить загальнодержавному підходу. Високі температури повітря в шахтних виробках у поєднанні з настільки ж високим рівнем вологості викликають серйозне погіршення мікрокліматичних умов, що призводить до ускладнення умов роботи гірників [13]. Проведені дослідження свідчать, що за вологості шахтного повітря 80 % та температури +35 °C бажано зупиняти всі важкі роботи [14], через зниження комфорту шахтарів, критичною за такої вологості є температура +37 °C [15].

Відомо, що у відносно «сухих» вибоях показники гомеостазу значно кращі порівняно з «вологими» за рівних температур. Продуктивність та безпека праці прохідників і робітників очисних вибоїв в умовах нагрівального мікроклімату різко зменшується. Збільшення швидкості теплого вологого повітря, що омине організм, пришвидшує накопичення тепла в тілі. Це, наприклад, чітко відчувають машиністи електровозів, що працюють на струмені повітря, що виходить із забоїв. З огляду на реальні теплові й вологі показники, у вибоях можна стверджувати, що проблема забезпечення комфортних і безпечних умов праці шахтарів зі збільшенням глибини розробки родовищ стає більш актуальною.

Зважаючи на вказане авторами, визначено **мету роботи:** обґрунтувати можливі способи покращення мікрокліматичних умов на робочих місцях у глибоких вугільних шахтах завдяки управлінню вологовмістом повітря.

Методи та методики дослідження. У роботі використано комплекс теоретично-розрахункових, що базуються на фундаментальних положеннях термодинаміки газів, та інженерно-геологічних і виробничих методів, спрямованих на

забезпечення комфортних та безпечних умов праці шахтарів у глибоких вибоях вугледобувних підприємств.

Результати. Проведено експерименти з охолодження повітря в підземних виробках шляхом розбризкування охолодженої води за допомогою форсунок або ежекторів [16], які дали змогу знизити температуру повітря в камері охолодження від 26...32 °С до 17...24 °С (ефективність охолодження становить 21...34 %), однак вологість при цьому збільшилася з 55...78 % до 75...80 %. Збільшення вмісту вологи в повітрі могло призвести до погіршення мікрокліматичних умов після підігріву повітря на шляху до робочих місць або перемішування з потоками теплого повітря.

Відомі оцінки умов стану людей на основі врахування сукупності факторів, як-от температура і вологість повітря, наприклад, Humidex – безрозмірна величина, у якій враховано точку роси [17]. Значення цього критерію розраховують за такою формулою:

$$\text{Humidex} = T + 0,5555 \cdot \left(6,11 \cdot e^{\frac{5417,7530}{273,15} \left(\frac{1}{273,15} - \frac{1}{T_d} \right)} - 10 \right) \quad (1)$$

де T – температура повітря, °С;

T_d – точка роси, К.

Установлено, що значення Humidex вище 30 заподіюють деякий дискомфорт, вище 40 – великий дискомфорт, а значення вище 45 є небезпечним, якщо Humidex сягає 54 – тепловий удар неминучий.

З результатів розрахункових значень Humidex видно, що вологість повітря суттєво впливає на розмір безпечного індексу (Humidex ≤ 30), за температури повітря 20 °С він досяжний за будь-якої вологості, а за 25 °С він можливий лише за вологості не більш як 50 % (табл. 1, рис. 2).

Фактичні мікрокліматичні умови у вибоях Шахтоуправління «Покровське» станом на липень 2024 року наведено в Табл. 2.

Деякі показники вентиляційної системи шахти мають такі величини:

1. Загальний об'єм підземних гірничих виробок – 2 548 524 м³.

2. Об'ємна витрата повітря на провітрювання гірничих виробок – 61 290 м³/хв = 1 021,5 м³/с.

3. За густини вологого повітря $\rho = 1205 + 25 = 1\,230$ г/м³ (геостатичний складник не враховано), масова витрата становить 75 386,7 г/с.

4. Водимість – 75386,7 * 0,02 = 1507,734 г/с, або 90 464,04 г/хв., або 5 427 842,4 г/год, або 130,268 2176 т/добу.

Керівною компанією стосовно Метінвест Покровськвугілля 30.09.2024 на IV квартал 2024 року ухвалено такі рішення:

1. Затвердити рівень страхового запасу коксівного вугілля в обсязі 200 тис. тонн марки К + Ж. Термін постійно.

2. Метінвест Покровськвугілля розглянути можливість реалізації резерву приросту обсягу по 2-й північній лаві блоку 11 Шахтоуправління «Покровське» в обсязі 40 тис. тонн. Термін 07.10.2024 р. (рис. 1).

3. Рішення щодо поставок Шахтоуправління Покровське на далекі ринки ухвалити в момент початку відвантаження в канал постачання залежно від поточної ситуації.

Але наприкінці того кварталу видобуток вугілля на всіх блоках шахтоуправління припинено через наближення лінії фронту та посилення обстрілів.

Унаслідок цього результати досліджень та експериментів можуть бути насамперед упроваджені на інших вугледобувних підприємствах України.

У сучасних виробничих умовах, на робочих місцях у гірничих виробках, через технологічні вимоги або економічну недоцільність використання засобів обдування, здушування, водоповітряного охолодження неможливо, а отже, у більшості виробках неможливо забезпечити й регламентовані інтенсивності теплового опромінення робітників. Аналіз отриманих даних свідчать про наявність значного потенціалу управління станом мікрокліматичних умов на робочих місцях сумісною зміною температури і вмісту водяної пари в повітрі. Теоретично обґрунтовано можливість забезпечення відносної комфортності праці гірників (Humidex ≤ 30...40) за підвищення температури повітря паралельним зниженням його вологості.

Таблиця 1

Розрахункові значення Humidex у характерних для підземних умов діапазонах вологості (φ, %) і температури (T, °С)

φ, % \ T, °С	Humidex				
	20	25	30	35	40
40	20,84539063	28,12785	36,10571	44,9450789	54,87397
60	24,06852164	32,52041	42,03788	52,8827681	65,37673
80	27,32001846	36,96135	48,03878	60,9237806	76,04124
100	30,59288443	41,43909	54,09809	69,0384027	86,8251

Таблиця 2

Мікрокліматичні умови у вибоях Шахтоуправління «Покровське»

Виробка	Витрата повітря, м ³ хв ⁻¹	Температура повітря, °С	Відносна вологість повітря, %	Точка роси Td, °С	Humidex
Очисні ділянки					
11 північна лава блоку 10	1640	32	90	30,15	56,36
1 південна лава блоку 9	1330	31	90	29,16	53,67
1 лава південної панелі блоку 10	1800	29	90	27,19	48,55
6 лава південної панелі блоку 10	1960	30	90	28,17	51,06
Підготовчі вибої					
Монтажний хідник 2 південної панелі блоку 9	323	29	90	27,19	48,55
3 південний конвеєрний штрек блоку 10	334	28	87	25,63	45,30
Конвеєрний штрек 3 лави південної панелі блоку 10	351	28	87	25,63	45,30
Конвеєрний хідник розвантажувальної лави центральної панелі блоку 11	337	28	90	26,20	46,30
Південний повітряподавальний штрек гор. 930 м.	349	28	95	27,12	47,44
Вентиляційний хідник розвантажувальної лави центральної панелі блоку 11	318	29	95	28,11	49,96
1 південний конвеєрний штрек блоку 9	284	30	90	28,17	51,06
Південний польовий конвеєрний штрек гор. 593 м	316	28	85	25,23	44,75

Зміна планів запуску 2-ї північної лави блоку 11 ШУ Покровське
восени 2024 року

Графік монтажу лави



- Відсутність можливості проведення робіт протягом 8 днів (у період з 21.09 по 04.10) у зв'язку з перебоєм електропостачання
- Уповільнення темпів монтажу з 6 до 5 секцій на добу, переведення ГРОЗ з МДО у видобуток, заміщення робітників МДО – прохідниками
- Погіршення гірничо-геологічних умов у монтажному хіднику – інтенсивне здимання підшви, деформація арок кріплення

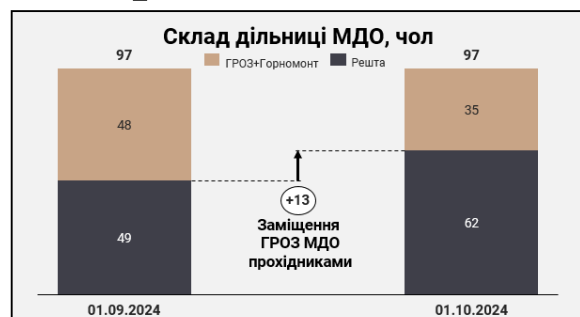


Рис. 1. Схема заходів з реалізації резерву приросту обсягу вуглевидобутку по 2-й північній лаві блоку 11

Більшість сучасних технічних рішень щодо кондиціювання підземної атмосфери спрямовані на зниження температури повітря в гірничих виробках [18; 19] шляхом теплообміну між повітрям і холодоносієм як останнього може

бути вода, крига, аміак, різного роду вуглеводневі легко киплячі сполуки тощо.

Це складні матеріаломісткі конструкції, що споживають значну кількість електроенергії [20; 21]. Підземні та поверхневі охолоджувальні

установки містять, як правило, компресори трубопроводів, теплообмінників, регулювальних та автоматичних приладів. У процесі роботи вони повинні зніжувати температуру значних потоків повітря, що прямують до вибою, орієнтовно це 10...25 м³/с, що потребує значних витрат енергії, причому вміст вологи в повітрі не лімітується.

Перспективним, на наш погляд, може стати процес зниження вологовмісту в повітрі разом з його охолодженням. Це допомогло б наблизити оцінку умов роботи під землею до вимог, що є на поверхні [10]. Розглянемо сучасні способи зниження вмісту вологи в повітряному середовищі.

Останнім часом у світі інтенсивно проводять дослідження з вилучення вологи з атмосфери для отримання питної води. В основу роботи всіх дослідних та експериментальних установок покладено фундаментальну закономірність водяної пари, що міститься в повітрі, переходити до стану рідини та конденсуватись при досягненні так званої точки роси.

Індійські вчені випробували атмосферний вододобувний пристрій, що працює за парокомпресійним холодильним циклом [22]. У цьому циклі температура на вході у випарник підтримується на рівні нижче температури точки роси атмосферного повітря, що входить до пристрою. Так, волога, що міститься в повітрі, конденсується на змійовику й збирається. Кількість конденсату залежить від психрометричних умов повітря, що надходить. Температура повітря була близько 32 °С, і коли воно надходило до змійовика випарника, його температура знижувалася до 10 °С (температура

точки роси апарату). Оскільки температура точки роси апарату (10 °С) була значно нижчою за температуру точки роси ненасиченого вхідного повітря (18 °С), водяна пара, наявна в повітрі, конденсувалася й збиралася для подальшої обробки. Пристрої для отримання атмосферної води найбільш ефективні в жарких і вологих регіонах. Коли рівень вологості в атмосфері становить 56 %, екстрагується 8,3 мл/хв води, а коли рівень вологості в атмосфері становить 36 % – екстрагується 1,7 мл/хв.

В установці прямого повітряного охолодження компресор циркулює холодоагент через конденсатор, а розташований послідовно змійовик випарника охолоджує повітря навколо нього [23]. Це призводить до конденсації пари завдяки зниженню температури повітря до точки роси. Вентилятор із регульованою швидкістю продуває відфільтроване повітря через змійовик у теплоізований канал. Після того як температура повітря, що надходить у випарник, впадає до точки роси, краплі конденсуються на стінках водяного каналу та стікають у лоток.

У дослідній системі із замкнутим контуром вологе повітря рухає вентилятор, яким можна одночасно контролювати швидкість потоку [24]. Крапельна конденсація відбувається при проходженні гарячого вологого повітря вздовж холодної підкладки, на якій закріплено поліетиленову плівку, що сприяє краплинній конденсації. Поліетиленова фольга має статичний контактний кут приблизно 90°, кути контакту при насуванні краплі та відступі становлять близько 111° та 74° відповідно.

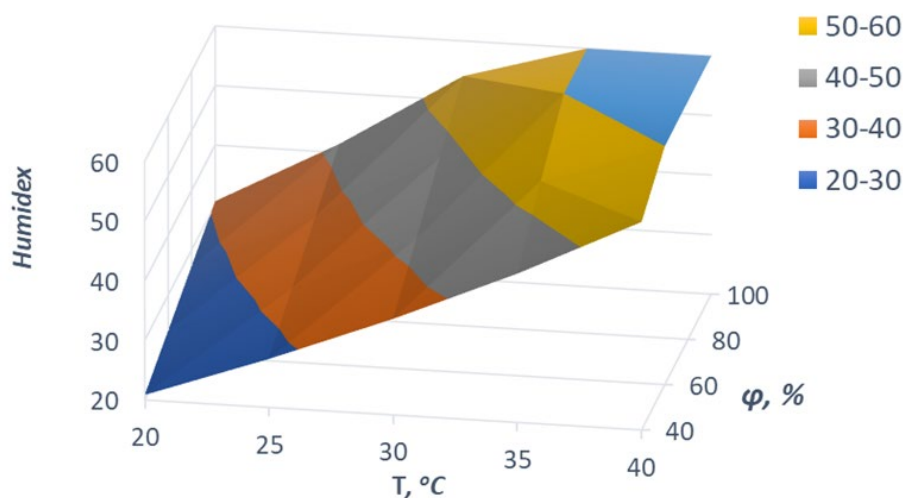


Рис. 2. Вплив температури T , °С та вологості ϕ , % повітря на робочому місці на величину мікрокліматичного індексу Humidex

Цікавою є прозора експериментальна установка, у якій використано композитний матеріал, що сорбує вологу, який поміщено на лоток із дрітної сітки [25]. У процесі адсорбції бічні вікна відкриваються у вечорі, і процес починається через різницю тиску пари між поверхнею композитного вологопоглинача та атмосферного повітря (меншою для композитного вологопоглинача). Цей процес продовжують до пізньої ночі для досягнення рівноважних умов, тобто коли тиск пари на поверхні адсорбенту стане таким самим, як в атмосферного повітря. Уранці бічні вікна закривають й установка піддається впливу сонячних променів для процесу регенерації. Залежно від підвищення температури композитного сорбувального наповнювача різниця тиску пари між поверхнею композитного матеріалу, що поглинув вологу, і повітрям внутрішнього простору коробки збільшується. Завдяки нахилу піддона для збирання води вода надходить у водомірний резервуар через сполучну трубку. Максимальна температура відновлення залежить від кількості доступного сонячного тепла.

Автономний комплекс для виділення води з атмосферного повітря [26] містить корпус у вигляді прозорого купола, оснащений вертикальною витяжною трубою, теплонакопичувач усередині купола, теплообмінник, що контактує з джерелом холоду, повітровід до теплообмінника, резервуар для осажденої води. Як джерело холоду використовують підземний охолоджувальний басейн. У денний час повітря, нагріте до 40...45 °C з вологовмістом 38...45 % додатково нагрівається під куполом до 50...55 °C і надходить у теплообмінник, де охолоджується до температури нижче точки роси. Вода по системі трубопроводів надходить у резервуар, а осушене атмосферне повітря – у витяжну трубу.

Досліджено роботу експериментальної установки для видобутку питної води шляхом використання атмосферної пари [27]. Установка містить компресор, конденсатор, розширювальний клапан та випарник, через який збирається вода. Як холодоагент у цьому дослідженні використовують R-22, для охолодження конденсатора встановлено витяжний вентилятор примусового типу. Воду збирали щодня протягом семи місяців, а її чистоту перевіряли експериментально. Результати цієї роботи показали, що виробництво води в середньому становить 20 л на день, а середня вартість її виробництва за літр становила 14...12 індійських рупій, що менше за долар.

Пристрій для одержання води з парів атмосфери [28] містить попарно встановлені

елементи, що конденсують, виконані у вигляді гофрованих аркушів з металу, на зовнішню поверхню яких нанесений шар гідрофільної речовини. Як джерело руху повітря використовують природні вітрові потоки. Тепло, що виділяється при конденсації, майже вільно проходить через тонкий шар гідрофільної речовини і шляхом теплопровідності металевго елемента приділяється в поза. Етажерне розташування елементів конденсації робить систему ефективною незалежно від напрямку швидкості вітру та конденсації парів на всіх площинах елементів, що конденсують. Накопичена рідина поступає у водовідвідний жолоб для збору води.

Проаналізовано результати вироблення води з мінімальною температурою 10 °C при охолодженні повітря на 8 °C нижче точки роси, середньої витрати повітря 400 м³/год, потужності компресора 1000 W [29]. Утворену в результаті конденсації водяної пари воду проаналізували на наявність важких металів, неорганічних іонів, NH₄⁺ та низки інших речовин. Результати порівнювали з рекомендаціями щодо стандартів питної води. Відібрано 64 проби води в різних кліматичних умовах, у різний час доби та протягом кількох сезонів. Жодна з виміряних хімічних речовин (за винятком нікелю та бензопірену в рідких пробах) не перевищувала стандарти для питної води. Хімічні елементи, що становили основну частину пристрою, як-от залізо, хром, молібден та алюміній у скрапленій воді не виявлені взагалі або в дуже маленьких кількостях (менш ніж 5 мкг/л).

Для обґрунтування комерційного використання методу вилучення води з повітря проведено комплексне дослідження якості води, що виробляється апаратом типу AWG [30]. Експерименти проведено в дуже забрудненому промисловому середовищі. 83 проби води AWG проаналізовані щодо 99 різних параметрів якості, включно з органічними, неорганічними та мікробними забрудненнями. Два параметри – нікель (15 проб) та дихлорметан (2 проби) – спорадично перевищували стандарти питної води. Аміак був єдиним параметром, який постійно перевищував стандартні межі 0,5 мг/л (61 % проб, що належать до 47 країн) і навіть перевищував 1,5 мг/л. Результати показують, що навіть у районах, які вважаються надмірно забрудненими порівняно з природним середовищем, вода, що отримується з повітря за допомогою AWG, може вважатися придатною для пиття, за умови пильної уваги до дуже специфічних забруднювачів.

Узагальнення наведених даних показує, що в експериментальних і комерційних установках

реалізовано кілька різних конструктивних рішень з отримання води з повітря, у всіх використовують фазовий перехід вологи з газоподібного стану до рідкого – конденсація чи сорбція з використанням фізичного ефекту «точки роси». Отриманий конденсат має хімічні властивості, близькі до питної води, та відносно невелику собівартість. З погляду забезпечення комфортних мікрокліматичних умов праці осушенням повітря дослідження не проводили. Огляд відомих конструкцій указує на те, що застосовані технічні рішення не пристосовані до використання в гірничих виробках.

Розглянуто, як приклад, можливість комплексного забезпечення теплових та вологісних умов роботи прохідників поблизу вибоїв тупикових виробок. Для провітрювання такого типу гірничих виробок обладнують вентиляційні установки місцевого провітрювання. Вони містять установлений в основній виробці вентилятор, який подає повітря до циліндричної форми гнучкого, виготовленого зі штучної шкіри повітропроводу. Повітропровід прокладено до вибою тупикової виробки. Регулювання витрати повітря в установці здійснюють за допомогою направляючого апарата вентилятора, також зміненням числа обертів двигуна або встановленням додаткових регуляторів потоку в повітропроводі. Після провітрювання робочих місць, що розташовані поблизу вибою, вихідний струмінь повітря спрямовано у зворотному напрямку по тупиковій виробці до основної.

Для виконання поставленого завдання з осушення та охолодження повітря запропоновано використати процеси такої термодинамічної системи. Установка місцевого провітрювання, яка містить вентилятор і повітропровід, для видалення води з повітря, додатково оснащують умонтованим у повітропровід теплоізолюваним корпусом, у якому встановлено трубчастий теплообмінник, на вході до труб якого приєднано дросель, а на виході – компресор, який, своєю чергою, з'єднаний з радіатором, а той – з дроселем. Крім того, у нижній частині корпусу зроблено жолоб, поєднаний трубою з краном до резервуара конденсованої води.

Елементи ланцюга «трубчастий теплообмінник – компресор – радіатор – дросель» утворюють герметичну систему, заповнену холодоагентом, який має температуру кипіння, значно нижчу від температури повітря у виробці. Холодоагент циркулює під дією компресора до встановленого в повітряному струмені гірничої виробки радіатора, а потім до встановленого на вході до труб теплообмінника дроселя.

Охолодження теплообмінника відбувається завдяки циркуляції в його трубках рідкого холодоагенту, який має низьку відносно температури повітря в повітропроводі температуру кипіння, тому відбувається його кипіння в трубках, яке супроводжується поглинанням тепла з повітря. Газоподібний холодильний агент із випарника відсмоктується компресором. У компресорі відбувається стиск холодоагенту до високого тиску та нагнітання його в радіатор. Відбувається конденсація стиснених парів, у процесі конденсації тепло з радіатора передається повітрю гірничої виробки, що обтікає його, і воно розсіюється в навколишньому середовищі. Під дією високого тиску рідкий холодоагент надходить через дросель у випарник, з метою зменшення тиску та регулювання потоку. У випарнику рідкий холодоагент під низьким тиском поглинає теплоту з внутрішнього об'єму теплообмінника та перетворюється на газ низького тиску. Компресор знову всмоктує холодоагент, цикл повторюється.

Осушення повітря забезпечують, пропускаючи повітря через теплообмінник, який встановлено в теплоізолюваному корпусі. Теплова ізоляція корпусу обмежує доступ тепла зовні до теплообмінника та покращує вилучення тепла з повітря, що рухається повітропроводом. В охолоджену нижче точки роси повітрі відбувається конденсація водяних крапель, які осідають на стінках корпусу та трубах теплообмінника, великі краплі під дією гравітації стікають до жолоба. Накопичена вода стікає при відкритому крані до резервуару, а з нього відбирається споживачами.

Регулювання інтенсивності охолодження повітря в теплообміннику забезпечується завдяки зміні тиску або витраті холодоагенту компресором. У результаті змінюється температура трубок теплообмінника і, відповідно, швидкість конденсації води з повітря.

Конструктивно установка для осушення повітря у вибої тупикової виробки та основні процеси в ній мають такий вигляд (рис. 3).

Для регулювання темпів осушення повітря та вилучення з нього води використовували такі прийоми, як зміна витрати вентилятора 1 у бік збільшення або зменшення. Також керували тиском у ланцюгу: «теплообмінник 4 – компресор 7 – радіатор 6 – дросель 5» що визначало температуру труб у теплообміннику 4 і, відповідно, ступінь осушення повітря. Сконденсована волога з нижньої частини корпусу 3 відводилася через трубку з краном 9 до резервуару 10.

Результати розрахунків показали, що коли до вентилятора 1 з витратою $500 \text{ м}^3/\text{хв}$, надходило

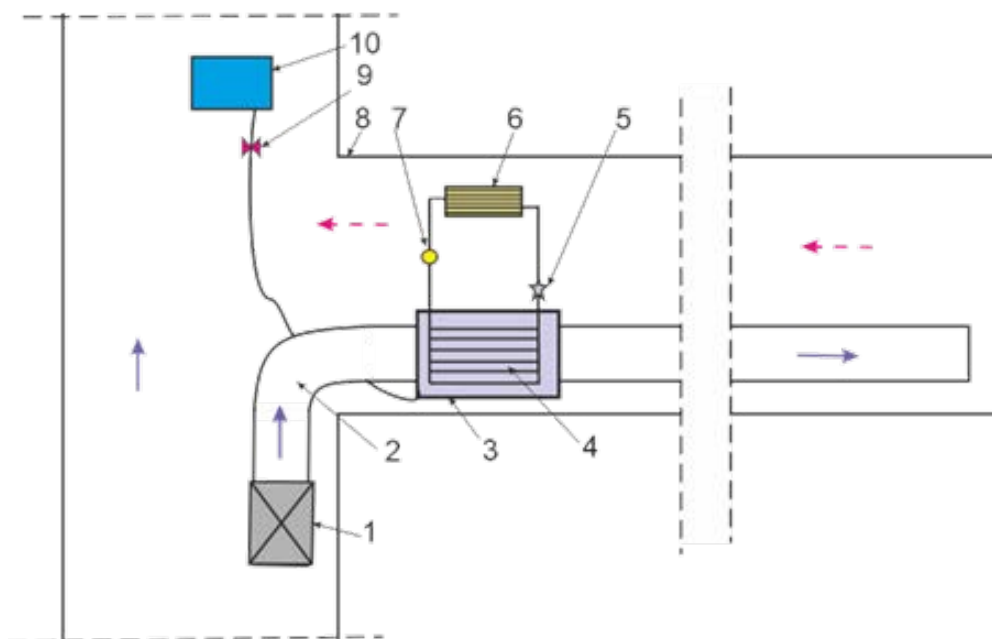


Рис. 3. Схема установки для осушення повітря в тупиковій гірничій виробці:
1 вентилятор; 2 – повітропровід; 3 – теплоізолюваний корпус; 4 – трубчастий
теплообмінник; 5 – дросель; 6 – радіатор; 7 – компресор; 8 – гірнича виробка;
9 – трубка з краном; 10 – резервуар

повітря з температурою 24 °С і відносною вологістю 93 %, значення *Humidex* дорівнювало 37,66, що є небезпечним. Повітропроводом 2 це повітря поступало до теплоізолюваного корпусу 3, де під дією такого, що мав температуру +2 °С теплообмінника 4 повітря охолоджувалося до 12 °С. Відповідно вологість повітря, що залишалось у повітропроводі 2, зменшилася до 55 %. Так, абсолютний уміст пароподібної вологі знизився з 20 г/м³ до 11 г/м³. Решта вологі була сконденсована й стікала до жолоба в нижній частині корпусу 3. Масове надходження конденсату становило 4 500 г/хв, або 330 кг/год. Охолоджене повітря нагрівалося на шляху до вибою внаслідок теплообміну з повітрям, що оточує повітропровід, однак вологовміст в ньому не збільшувався. У привибійному просторі температура повітря становила 20 °С, а *Humidex* = 12,5. У такий спосіб забезпечено комфортні мікрокліматичні умови роботи прохідників.

Установка містить вентилятор 1, підключений до повітропроводу 2, що налічував 20-метрові секції гнучкої вентиляційної труби. Між двома секціями встановлено металевий корпус 3, покритий пінопластовою теплоізоляцією. У корпусі 3 вмонтовано трубчастий теплообмінник 4, який містив пучок мідних, об'єднаних у паралельну систему трубок, для руху та википання холодоагенту. Рідкий холодоагент до теплообмінника 4 надходив з дроселя

5, у якому редукувався тиск рідини, що конденсувалася у радіаторі 6 під дією компресора 7. У компресорі 7 стискали газоподібний холодоагент, що надходив з теплообмінника 4, до необхідного для конденсування стану. Приховану теплоту конденсування з радіатора 6 поглинало повітря гірничої виробки 8 і вона розсіювалась у зовнішньому просторі. У нижній частині корпусу 3 створено жолоб до якого стікає конденсована вода, із жолоба конденсат надходив до трубки 9 з краном. Після відкриття крана вода надходила з трубки 9 до резервуара 10, звідки її відбирали користувачі.

Підтримання низької температури в теплообміннику забезпечували циркуляцією зі змінною фазового стану холодоагенту в ланцюгу: «теплообмінник 4 – компресор 7 – радіатор 6 – дросель 5». Як холодоагент використовували пожежовибухобезпечну, нетоксичну, екологічну низькотемпературну рідину типу R-507a. Вона послідовно переводилася від рідкого, з низьким тиском, у теплообміннику 4 до рідинного стану з високим тиском у радіаторі 6. Надлишкова теплота конденсування розсіювалась у повітряному просторі гірничої виробки 8.

Наданий приклад продемонстрував технічну можливість управління станом середовища на робочих місцях прохідників гірничих виробок, змінюючи вміст вологі в потоці повітря, що подають до вибоїв. Завдяки регулюванню не

тільки температури повітря, а і його вологості, суттєво, майже втричі покращено показники комфортності праці (Humidex з 37,66 до 12,5) у просторі поблизу вибою. Цей підхід до кондиціювання робочого середовища дає змогу наблизити умови праці гірників до таких, що є на поверхні.

Технологічну схему покращення мікроклімату в очисній виробці наведено на рис. 4.

Удосконалення схеми осушення й охолодження повітря полягає в заміні або доповненні

чилерного типу установки на відкритий теплообмінник, що використовує скраплений азот – відхід від підготовки металургійного кисневого дуття (рис. 5); схему відкритого теплообмінника наведено на рис. 6.

Реалізація таких технічних рішень потребує використання додаткового обладнання та споживання енергії, що призводить до здорожчання продукції гірництва. Однак вилучення води із шахтного повітря може забезпечити певні економічні переваги.

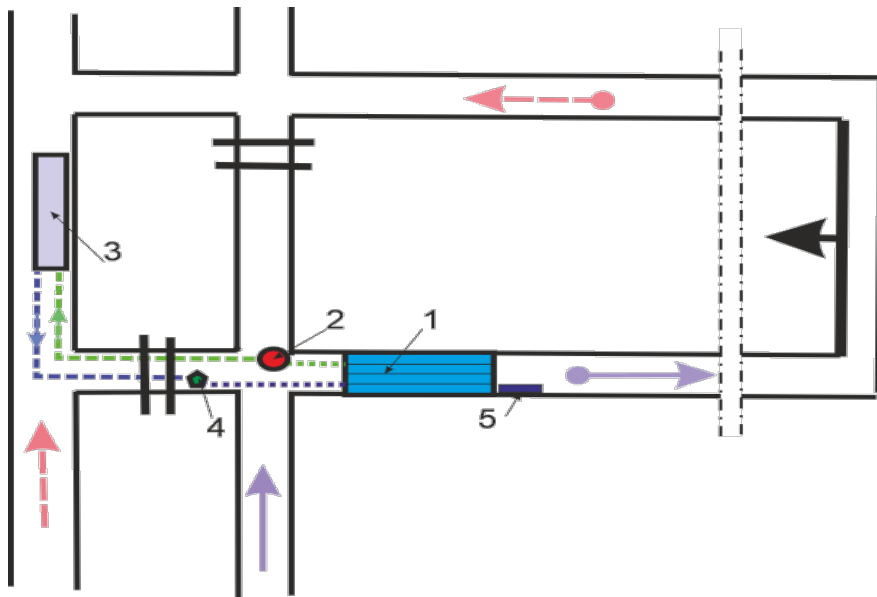


Рис. 4. Охолодження і осушення повітря на виїмковій ділянці
1 – теплообмінник; 2 – компресор; 3 – радіатор; 4 – дросель; 5 – резервуар

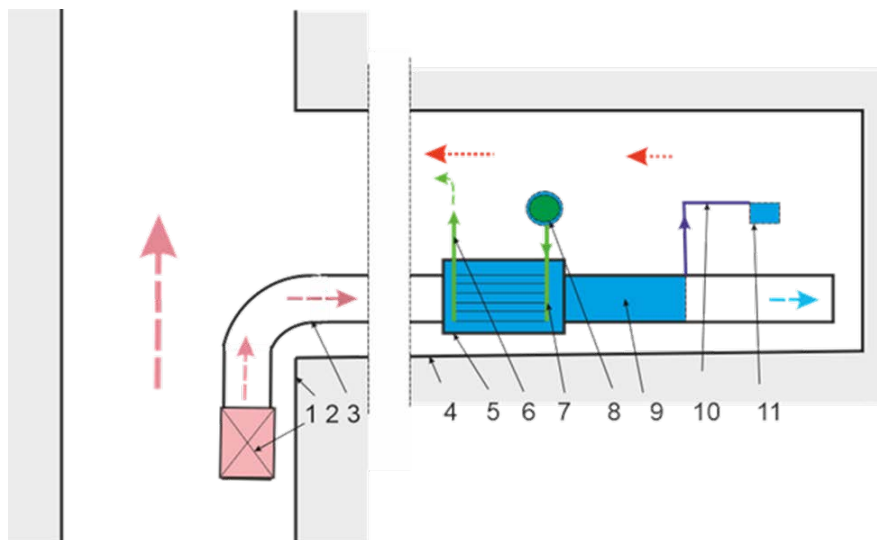


Рис. 5. Покращення мікроклімату у вибої з використанням скрапленого азоту
1 – ВМП; 2, 4 – підготовчі виробки; 3 – вентиляційна труба;
5 – теплообмінник; 6 – дренаж газоподібного азоту; 7 – подання рідкого азоту; 8 – криогенна ємність; 9 – зона «дощу»; 10 – водопровід; 11 – ємність

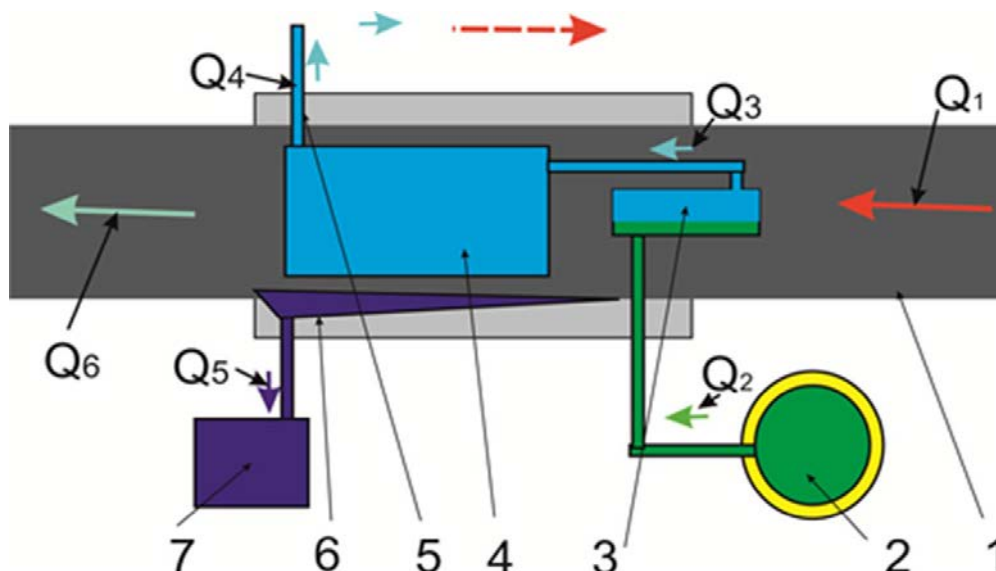


Рис. 6. Схема відкритого теплообмінника

1 – вентиляційна труба; 2 – криогенна ємність; 3 – випарювач; 4 – теплообмінник; 5 – дренаж азоту; 6 – водозбірник; 7 – ємність для води; Q1–Q6 – напрями теплових потоків

За даними статистики, середньої потужності глибока вугільна шахта витрачає на провітрювання виробок понад $350 \text{ м}^3/\text{с}$ повітря. Енергія вентиляторів головного провітрювання витрачається на переміщення виробками не тільки сухого повітря, а й водяної пари.

Схему відкритого теплообмінника наведено на рис. 6.

Атмосфера протяжних гірничих виробок протягом року має майже стабільну температуру та значну відносну вологість, яка становить близько 80 %, а на вентиляційних горизонтах наближається до 100 %. Уміст води у вигляді пари в такому повітрі становить близько $17 \text{ г}/\text{м}^3$ за температури повітря 20°C ; за збільшення температури повітря до 30°C такий показник зростає до $30 \text{ г}/\text{м}^3$.

Ураховуючи середню площину поперечного перерізу виробок шахти приблизно 12 м^2 , а їх сумарну протяжність близько 150 000 м на загальну масу води, що міститься в об'ємі шахтно-вентиляційної мережі, за вологовмісту $20 \text{ г}/\text{м}^3$, можна оцінити в 36 000 кг. Використовуючи технології вилучення води з повітря, можна скоротити баластну масу в повітрі не менш ніж удвічі та позбутися необхідності переміщення виробками цієї додаткової маси. Це забезпечить зменшення витрат енергії на вентиляцію шахти завдяки переведенню режиму роботи вентиляторів на більш раціональні характеристики. Крім того, зниження вмісту води та пов'язане із цим скорочення густини осушеного повітря на струмені, що виходить із шахти, покращує

умови вентиляції шахти завдяки покращенню природної тяги, яка сприяє роботі вентиляторів.

Вода, що використовується при бурінні порід, нагнітанні у пласт, пилопридушенні при виїмці та транспортуванні гірничої маси, пожежогасінні та інших технологічних процесах, повинна відповідати питним нормам. Ціна води, яку підприємства вимушені закуповувати в зовнішніх постачальників, останніми роками стрімко зростає. Вона стає вагомим складником у структурі собівартості продукції шахт. Світовий досвід робіт з вилучення вологи з повітря [28–31] свідчить про високі якісні показники отриманих сконденсованих розчинів, які наближені до питної води. Тому надійне вилучення з повітря власної води доброго ґатунку обійдеться набагато дешевше покупної. Як показують наведені вище розрахунки, видобуток води може бути достатнім для забезпечення технологічних потреб шахти, а також з'являється перспектива використання її як комерційного продукту. Параметри заходів визначали на основі реальних даних активних і запроєктованих вугільних блоків Шахтоуправління «Покровське» [32; 33]

Висновки. Зі збільшенням глибини розробки родовищ корисних копалин зростає температура гірничого масиву й суттєво погіршується тепловий та вологісний стан повітря у виробках. Проблема забезпечення комфортних і безпечних умов праці шахтарів набуває дедалі більшої актуальності. Наявні, основані на температурних показниках нормативі мікроклімату для підземних робочих місць унаслідок

технічних та економічних причин негативно відрізняються від прийнятих для поверхні.

Авторами запропоновано покращувати мікрокліматичні умови на підземних робочих місцях шляхом вилучення вологи, що міститься в шахтному повітрі у вигляді пари. Розглянуто варіант осушення повітря при проведенні тупикової виробки. Результати розрахунків показали, що завдяки осушенню повітря, яке подають за допомогою вентилятора місцевого провітрювання з температурою 24 °С, а потім охолоджують нижче точки роси і доставляють до вибою з температурою 20 °С, мікрокліматичний показник *Humidex* зменшується з дискомфортного рівня 37,7 до комфортного – 12,5.

Додатковими перевагами запропонованого способу нормалізації стану рудникової атмосфери на робочих місцях є отримання із шахти водного ресурсу досить високої якості. У повітрі

глибокої шахти середньої потужності може міститись у вигляді пари кілька десятків тонн води. Вилучення частини такого ресурсу дасть змогу зменшити витрати на придбання води для технологічних потреб та на пожежогасіння.

Вилучення вологи із шахтного повітря дає змогу зменшити його густину і, відповідно, витрати на провітрювання мережі гірничих виробок вентиляторами головного провітрювання та отримати певний екологічний ефект.

Узагальнення отриманих результатів дослідження дало змогу зробити висновок, що запропонований спосіб нормалізації умов праці гірників у глибоких шахтах за комплексного підходу, який містить кондиціювання температури з одночасним вилученням води, а також покращенням режиму вентиляції гірничих виробках забезпечує значні переваги з погляду промислової санітарії, технології та економіки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Abramowicz A., Rahmonov O., Chybiorz R. Environmental Management and Landscape Transformation on Self-Heating Coal-Waste Dumps in the Upper Silesian Coal Basin. *Land*. 2021. № 10(1). P. 23. <https://doi.org/10.3390/land10010023>.
2. Ahamed P. U., Mohamed Ibraheem M. P., Syed Basith K. M., Mohammed Azharudeen J., Kiyasudeen P. A. Performance Analysis of Atmospheric Water Extraction by Refrigerator Cum Air Conditioner. *International Journal of Advanced Research*. 2023. № 3(3). P. 2581–9429. <https://doi.org/10.48175/IJAR SCT-14341>.
3. Almrid A. A., Alanabi F. M. Experimental study of atmospheric water generator under Libyan climate. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2021. № 12(5). P. 38–44. <https://doi.org/10.34218/IJMET.12.5.2021.005>.
4. Bhukya P., Naick B., Enhancing ventilation fan performance in underground coal mines: a hybrid approach. *Electrical Engineering*. 2024. Vol. 106. P. 4969–4992. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02268-0>.
5. Bohomaz O., Kostenko V., Hlushko I., Liashok N., Kostenko T. Use of solid mining waste to improve water retention capacity of loamy soils. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. Vol. 17(4). P. 29–34. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.029>.
6. Чернов В. О., Макаров А. А. Автономний комплекс для виділення води з атмосферного повітря. Патент на корисну модель 49865. Україна. 2010.
7. Dao V. C., Le T. D., Vu T. T., Nguyen H. C. Research, Calculation and Proposal of Ventilation Solution for Duong Huy Coal Mine when Mining Down to -250 m Depth. *Inżynieria Mineralna*. 2021. Vol. 1(2). <https://doi.org/10.29227/IM-2021-02-49>
8. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Україна. 1999.
9. Inbar O., Gozlan I., Ratner S., Aviv Y., Sirota R., Avisar D. Producing Safe Drinking Water Using an Atmospheric Water Generator (AWG) in an Urban Environment. *Water*. 2020. Vol. 12(10). P. 2940. <https://doi.org/10.3390/w12102940>
10. Kaplan A., Ronen-Eliraz G., Ratner S., Aviv Y., Wolanov Y., Avisar D. Impact of industrial air pollution on the quality of atmospheric water production. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 325. 121447. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121447>
11. Kocsis K.C., Sunkpal M. Identifying and controlling heat-induced health and safety problems in underground mines. *Mining Engineering*. 2017. Vol. 69 (9). P. 53–60. <https://doi.org/10.19150/me.7745>
12. Коняхін Г. Ф., Верещагін В. Л. Пристрій для отримання води з атмосферних парів. Патент на корисну модель 48999. Україна. 2010
13. Kostenko V., Zavialova O., Chepak O., Pokalyuk V. Mitigating the adverse environmental impact resulting from closing down of mining enterprises. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. Vol. 12(3). P. 105–112. <https://doi.org/10.15407/mining12.03.105>
14. Kostenko V., Zavialova O., Novikova Y., Bohomaz O., Krupka Y., Kostenk, T. Substantiating the parameters of quickly erected explosion-proof stopping. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022. Vol. 37(4). P. 143–153. <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.2.10>

15. Kostenko V., Bohomaz O., Kostenko T., Berezovskyi A. Mechanism of coal aerosol explosion development in an experimental mine working. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 2023. Vol. 38(2). P. 135–142. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.4.12>
16. Kumar M., Yadav A., Mehla N. Water generation from atmospheric air by using different composite desiccant materials. *International Journal of Ambient Energy*. 2017. Vol. 40(4). P. 343–349. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1392350>
17. Лапшин О. Є., Лапшин О. О., Лапшина Д. О. Використання шахтних вод для нормалізації мікроклімату в гірничих виробках глибоких шахт. *Вісник Криворізького національного університету*. 2015. Вип. 40. С. 27–33.
18. Milosevic D., Dunjić J., Stojanović V. Investigating Micrometeorological Differences between Saline Steppe, Forest-steppe and Forest Environments in Northern Serbia during a Clear and Sunny Autumn Day. *Geographica Pannonica*. 2020. Vol. 24. P. 176–186. <https://doi.org/10.5937/gp24-25885>.
19. Nguyen Q. V., Do T. N., Nguyen T. V., Nguyen M. V. Le H. N. Solutions to improve microclimate conditions for longwall in Mong Duong coal mine (in Vietnamese). *Journal of Mining and Earth Sciences*. 2021. Vol. 62(5a). P. 28–35. [https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62\(5a\).04](https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62(5a).04).
20. НПАОП 10.0-1.08-25. Правила безпеки ведення гірничих робіт у вугільних шахтах. [На заміну НПАОП 10.0-1.01-10; чинний від 2025-09-05]. Вид. офіц. Київ : 144 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1145-25#>.
21. OECD Global Material Resources Outlook to 2060. Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, Paris. 2019. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
22. Quan T.T., Łuczak R., Życzkowski P. Climatic hazard assessment in selected underground hard coal mines in Vietnam. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*. 2019. Vol. 2(2). P. 155–163. <https://doi.org/10.29227/IM-2019-02-69>.
23. Szlązak N., Borowski M., Obracaj D., Swolkień J., Korzec M., Piergies K. Current Ventilation Problems in Hard Coal Mines. *“Wydawnictwa AGH”*, 2017. 156 p.
24. Szlązak N., Obracaj D., Swolkień J. An Evaluation of the Functioning of Cooling Systems in the Polish Coal Mine Industry. *Energies*. 2018. Vol. 11. 2267. <https://doi.org/10.3390/en11092267>.
25. Teku K., Yadav J.S., Rao V.S., Raghu M., Kumar G.U. Experimental Analysis of Potable Water Generation using Humidified Air. *Research and Applications of Thermal Engineering*. 2021. Vol. 4(1). P. 1–9. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4638529>.
26. Wang K., Li Q., Wang J., Yang S. Thermodynamic characteristics of deep space: hot hazard control case study in 1010-m-deep mine. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 28. 101656. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101656>.
27. Xue Y., Wang J., Xiao J. Bibliometric analysis and review of mine ventilation literature published between 2010 and 2023. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. e26133. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26133>.
28. Zhang C., Tang S. C., Li D. M., Xing J. J., Xu A. M., Li J. Experimental study of the heavy-duty working condition and intensified fatigue grade for the workmen under high temperature and great humidity environment. *Journal of safety and environment*. 2015. Vol. 15. P. 176–180.
29. Zhang J. G., Yang S. H., Suo C. Y. Research on effects of high temperature and high humidity environment on miners physiology and psychology. *China Safety Science Journal*. 2015. Vol. 25. P. 23–28.
30. Zheng S.-F., Eimann F., Philipp C., Fieback T., Gross U. Experimental and modeling investigations of dropwise condensation out of convective humid air flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 151. 119349. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119349>.
31. НПАОП 10.0-7.08-93. Настанова з проектування вентиляції вугільних шахт. Затверджено наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці № 131 від 20.12.1993. ДНАОП 1.1.30-6.09.93.
32. Безпека та гігієна праці у гірничодобувній галузі та вугільній промисловості в Україні. Міжнародна організація праці. Група технічної підтримки з питань гідної праці та Бюро МОП для країн Центральної та Східної Європи. Київ : МОП. 2018. 46 с.
33. Проєкт «Розкриття та підготовка запасів блоку №11 ПрАТ «ШУ «Покровське». Нове будівництво. с. Піщане, Донецької області. Управління проєктно-вишукувальних робіт ТОВ «ШСП № 3». Зі змінами 2021 р.
34. Проєкт «Розкриття та підготовка запасів блоків № 12 ПрАТ «ШУ «Покровське». Нове будівництво. с. Зелене, Донецької області. Управління проєктно-вишукувальних робіт ТОВ «ШСП № 3». Зі змінами 2022 р.

REFERENCES:

1. Abramowicz, A., Rahmonov, O., & Chybiorz, R. (2021). Environmental Management and Landscape Transformation on Self-Heating Coal-Waste Dumps in the Upper Silesian Coal Basin. *Land*, 10(1), 23. <https://doi.org/10.3390/land10010023>
2. Ahamed, P. U., Mohamed Ibraheem, M. P., Syed Basith, K. M., Mohammed Azharudeen, J., Kiyasudeen, P. A. (2023). Performance Analysis of Atmospheric Water Extraction by Refrigerator Cum Air Conditioner. *International Journal of Advanced Research*, 3(3), 2581–9429. <https://doi.org/10.48175/IJARSCT-14341>
3. Almrud, A. A., & Alanabi, F. M. (2021). Experimental study of atmospheric water generator under Libyan climate. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 12(5), 38–44. <https://doi.org/10.34218/IJMET.12.5.2021.005>
4. Bhukya, P., & Naick, B. (2024). Enhancing ventilation fan performance in underground coal mines: a hybrid approach. *Electrical Engineering*, 106, 4969–4992. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02268-0>
5. Bohomaz, O., Kostenko, V., Hlushko, I., Liashok, N., & Kostenko, T. (2023). Use of solid mining waste to improve water retention capacity of loamy soils. *Mining of Mineral Deposits*, 17(4), 29–34. <https://doi.org/10.33271/mining17.04.029>
6. Chernov, V. O., & Makarov, A. A. (2010). Avtonomnyy kompleks dlya vydilennya vody z atmosfernoho povitrya. [Autonomous complex for release of water from atmospheric air]. Patent for a utility model 49865, Ukraine [in Ukrainian].
7. Dao, V. C., Le, T. D., Vu, T. T., & Nguyen, H. C. (2021). Research, Calculation and Proposal of Ventilation Solution for Duong Huy Coal Mine when Mining Down to -250 m Depth. *Inżynieria Mineralna*, 1(2). <https://doi.org/10.29227/IM-2021-02-49>
8. DSN 3.3.6.042-99: Sanitarni normy mikroklimatu vyrobnychkh prymishchen [Sanitary norms of the microclimate of industrial premises]. (1999) Ukraine [in Ukrainian].
9. Inbar, O., Gozlan, I., Ratner, S., Aviv, Y., Sirota, R., Avisar, D. (2020). Producing Safe Drinking Water Using an Atmospheric Water Generator (AWG) in an Urban Environment. *Water*, 12(10), 2940. <https://doi.org/10.3390/w12102940>
10. Kaplan, A., Ronen-Eliraz, G., Ratner, S., Aviv, Y., Wolanov, Y., Avisar, D. (2023). Impact of industrial air pollution on the quality of atmospheric water production. *Environmental Pollution*, 325, 121447. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121447>
11. Kocsis, K. C., & Sunkpal, M. (2017): Identifying and controlling heat-induced health and safety problems in underground mines. *Mining Engineering*, 69(9), 53–60. <https://doi.org/10.19150/me.7745>
12. Konyakhin, H. F., Vereshchahin, V. L. Prystriy dlya oderzhannya vody z pariv atmosfery [A device for obtaining water from atmospheric vapors]. (2010). Patent for a utility model 48999. Ukraine [in Ukrainian].
13. Kostenko, V., Zavalova, O., Chepak, O., & Pokalyuk, V. (2018). Mitigating the adverse environmental impact resulting from closing down of mining enterprises. *Mining of Mineral Deposits*, 12(3), 105–112. <https://doi.org/10.15407/mining12.03.105>
14. Kostenko, V., Zavalova, O., Novikova, Y., Bohomaz, O., Krupka, Y., & Kostenko, T. (2022). Substantiating the parameters of quickly erected explosion-proof stopping. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 37(4), 143–153. <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.2.10>
15. Kostenko, V., Bohomaz, O., Kostenko, T., & Berezovskyi, A. (2023). Mechanism of coal aerosol explosion development in an experimental mine working. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 38(2), 135–142. <https://doi.org/10.17794/rgn.2022.4.12>
16. Kumar, M., Yadav, A., & Mehla, N. (2017). Water generation from atmospheric air by using different composite desiccant materials. *International Journal of Ambient Energy*, 40(4), 343–349. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1392350>
17. Lapshyn, O. Ye., Lapshyn, O. O., & Lapshyna, D. O. (2015). Vykorystannya shakhtnykh vod dlya normalizatsiyi mikroklimatu v hirnychyykh vyrobkakh hlybokyykh shakht [The use of mine waters to normalize the microclimate in mining workings of deep mines]. *Visnyk Kryvoriz'koho natsional'noho universytetu*, 40, 27–33 [in Ukrainian].
18. Milosevic, D., Dunjić, J., & Stojanović, V. (2020). Investigating Micrometeorological Differences between Saline Steppe, Forest-steppe and Forest Environments in Northern Serbia during a Clear and Sunny Autumn Day. *Geographica Pannonica*, 24, 176–186. <https://doi.org/10.5937/gp24-25885>
19. Nguyen, Q. V., Do, T. N., Nguyen, T. V., Nguyen, M. V. Le, H. N. (2021). Solutions to improve microclimate conditions for longwall in Mong Duong coal mine (in Vietnamese). *Journal of Mining and Earth Sciences*, 62(5a), 28–35. [https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62\(5a\).04](https://doi.org/10.46326/JMES.2021.62(5a).04)

20. NPAOP 10.0-1.08-25. Pravyla bezpeky vedennia hirnychkykh robit u vuhilnykh shakhtakh. [Safety rules for mining operations in coal mines]. (2025). Na zaminu NPAOP 10.0-1.01-10; chynnyi vid 2025-09-05]. Vyd. ofits. Kyiv : 144 p. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1145-25#> [in Ukrainian]
21. OECD (2019). Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
22. Quan, T. T., Łuczak, R., & Życzkowski, P. (2019). Climatic hazard assessment in selected underground hard coal mines in Vietnam. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 2(2), 155–163. <https://doi.org/10.29227/JM-2019-02-69>
23. Szlązak, N., Borowski, M., Obracaj, D., Swolkień, J., Korzec, M., & Piergies, K. (2017). Current Ventilation Problems in Hard Coal Mines, "Wydawnictwa AGH", 156 p.
24. Szlązak, N., Obracaj, D., & Swolkień, J. (2018). An Evaluation of the Functioning of Cooling Systems in the Polish Coal Mine Industry. *Energies*, 11, 2267. <https://doi.org/10.3390/en11092267>
25. Teku, K., Yadav, J.S., Rao, V.S., Raghu, M., & Kumar, G.U. (2021). Experimental Analysis of Potable Water Generation using Humidified Air. *Research and Applications of Thermal Engineering*, 4(1), 1–9. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4638529>
26. Wang, K., Li, Q., Wang, J., & Yang, S. (2021). Thermodynamic characteristics of deep space: hot hazard control case study in 1010-m-deep mine. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101656, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101656>
27. Xue, Y., Wang, J., & Xiao, J. (2024). Bibliometric analysis and review of mine ventilation literature published between 2010 and 2023. *Heliyon*, 10, e26133. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26133>
28. Zhang, C., Tang, S. C., Li, D. M., Xing, J. J., Xu, A. M., & Li, J. (2015). Experimental study of the heavy-duty working condition and intensified fatigue grade for the workmen under high temperature and great humidity environment. *Journal of safety and environment*, 15, 176–180.
29. Zhang, J. G., Yang, S. H., & Suo, C. Y. (2015). Research on effects of high temperature and high humidity environment on miners physiology and psychology. *China Safety Science Journal*, 25, 23–28.
30. Zheng, S.-F., Eimann, F., Philipp, C., Fieback, T., Gross, U. (2020). Experimental and modeling investigations of dropwise condensation out of convective humid air flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 151, 119349. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119349>.
31. NPAOP 10.0-7.08-93. Nastanova z proektuvannia ventyliatsii vuhilnykh shakht. [NPAOP 10.0 7.08-93. Guidelines for the design of ventilation systems in coal mines] (1993). Zatverdzheno nakazom Derzhavnoho komitetu Ukrainy z nahliadu za okhoroноu pratsi № 131 vid 20.12.1993. DNAOP 1.1.30-6.09.93 [in Ukrainian].
32. Bezpeka ta hihiena pratsi u hirnychodobuvnii haluzi ta vuhilnii promyslovosti v Ukraini [Occupational safety and health in the mining and coal industries in Ukraine] (2018). *Mizhnarodna orhanizatsiia pratsi. Hrupa tekhnichnoi pidtrymky z pytan hidnoi pratsi ta Biuro MOP dlia krain Tsentralnoi ta Skhidnoi Yevropy*. Kyiv : MOP. 46 p. [in Ukrainian].
33. Proiekt "Rozkryttia ta pidhotovka zapasiv bloku № 11. PrAT "ShU "Pokrovske". Nove budivnytstvo. s. Pishchane, Donetskoi oblasti. Upravlinnia proiektно-vyshukuvalnykh robit TOV "ShSP № 3". Zi zminamy 2022 r. [Project "Opening and preparation of reserves of blocks No. 12 of PJSC "ShU "Pokrovske"] (2021). New construction. Zelene village, Donetsk region. Department of design and survey works by LLC "ShSP No. 3." With changes in 2022 [in Ukrainian].
34. Proiekt "Rozkryttia ta pidhotovka zapasiv bloku № 12. PrAT "ShU "Pokrovske". Nove budivnytstvo. s. Zelene, Donetskoi oblasti. Upravlinnia proiektно-vyshukuvalnykh robit TOV "ShSP № 3". Zi zminamy 2022 r. [Project "Opening and preparation of reserves of blocks No. 12 of PJSC "ShU "Pokrovske"] (2021). New construction. Zelene village, Donetsk region. Department of design and survey works by LLC "ShSP No. 3." With changes in 2022 [in Ukrainian].



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.11.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 01.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026