

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЗАХИСТ ДОВКІЛЛЯ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2021, 4(67): 30–39
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2021.04.030>

УДК 622.85 + 622.012.2
+ 351.823.3 (571.17)

М.О. ПЕРОВ, ORCID: 0000-0002-0654-5648

І.Ю. НОВИЦЬКИЙ, ORCID: 0000-0002-3304-7492

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича 172, м. Київ, 03150, Україна

СВІТОВИЙ ДОСВІД УТИЛІЗАЦІЇ МЕТАНУ НА ЗАКРИТИХ ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ

Проаналізовано світовий досвід з оцінки стану виділення метану із закритих шахт та можливостей його використання для економіки країни при розробленні газових ресурсів. Державні регулюючі органи, підприємства нафтогазового сектору, інші установи мають враховувати потенційні небезпеки, пов'язані з триваючим виділенням метану після закриття шахт і виведення їх з експлуатації та підвищення керованості процесами скорочення викидів. Важливими супутніми перевагами видобутку і утилізації метану із закритих шахт є значне зниження ризику неконтрольованих викидів на поверхні землі, експлуатація газових ресурсів, які в іншому випадку стають відходами, і скорочення викидів парникових газів.

Ключові слова: викиди метану, проекти утилізації, закриті шахти, дебіт метану, потенційна небезпека.

Кількість метану, який викидається в атмосферу під час видобутку вугілля, за даними Американського геофізичного союзу, істотно вище, ніж вважалося раніше. Про це йдеться в новому дослідженні Тихоокеанської північно-західної національної лабораторії Міністерства енергетики США.

За оцінками дослідників, викиди метану від вугільних шахт приблизно на 50% вищі, ніж передбачалося попередніми розрахунками. Більш високі показники обумовлені, головним чином, двома факторами: викидами метану з тисяч закритих шахт і більш високим вмістом метану у вугільних пластах при поступовому їх заглибленні.

Результати досліджень мають важливе значення для оцінки впливу парникових газів на клімат Землі, тому що метан приблизно в 25 разів шкідливіший з точки зору глобального потепління. Крім видобутку вугілля, до інших джерел викидів метану належать: сільське господарство, нафтогазові підприємства, сміттєзвалища тощо.

Вперше, виходячи з світового досвіду, використання метану закритих шахт, обґрунтована доцільність детального вивчення схем закриття (консервації) шахт, можливостей вилучення метану для потреб економіки країни та оцінки додаткових обсягів викидів метану, в умовах поступового скорочення існуючого шахтного фонду в

середньостроковій перспективі й дії жорстких екологічних обмежень на викиди парникових газів. При затопленні закритої шахти вода майже повністю зупиняє витік метану протягом приблизно п'яти років. Але коли шахта закривається без затоплення, метан просочується в повітря протягом до десяти років.

У той час як метан, вироблений в деяких галузях промисловості, уловлюється і використовується для отримання енергії. Його складніше вловлювати на вугільних шахтах, де газ зазвичай становить не більше 1% від загального потоку повітря.

У глобальному масштабі видобуток вугілля скорочується в США і Європі, але швидко зростає в інших частинах світу: в Південно-Східній Азії і Індії.

За даними [1] у 2010 р. 103 млрд м³, метану було викинуто з діючих підземних і відкритих родовищ і ще 22 млрд м³ із закритих шахт. Загальний фактичний обсяг в 125 млрд м³ за 2010 р. на 50% перевищує попередню оцінку в 83 млрд м³ проведену AGU.

Закриття вугільних шахт і, відповідно, викиди метану на закритих шахтах (МЗШ) будуть, як і раніше, актуальною і важливою проблемою в майбутньому, оскільки країни продовжують експлуатувати і скорочувати свої вугільні запаси все більш швидкими темпами. Це стосується багатьох розвинених країн, де видобуток вугілля знижується, а шахти закриваються. Однак це також відноситься до розвинених країн і тих, що розвиваються, де

© М.О. ПЕРОВ, І.Ю. НОВИЦЬКИЙ, 2021

видобуток вугілля буде і далі відігравати значну роль у структурі енергетичного балансу, а закриті шахти будуть замінюватися новими. Таким чином, сумарний обсяг викидів на закритих шахтах і тих, що закриваються, може бути істотним і, ймовірно, буде все більш значущим. У 2010 р. на МЗШ припадало 17% загальносвітового обсягу викидів шахтного метану і, згідно з прогнозами, в 2050 р. ця частка може збільшитися до 24% [2].

Припинення видобутку вугілля у зв'язку з виснаженням комерційно рентабельних запасів вугілля не зупиняє викиди газів. Важливо оцінити масштаб існуючої проблеми МЗШ і потенційні рівні викидів у зв'язку з наявністю ризиків неконтрольованих поверхневих викидів парникових газів і можливостей їх використання.

Ризики поверхневих газових викидів становлять особливу небезпеку в густонаселених районах з розвинутою вугледобувною промисловістю. У багатьох випадках ризик може бути зменшений шляхом пасивної вентиляції. У районах, де виявлені великі обсяги МЗШ, можуть існувати можливості для активного видобутку і використання газу в якості екологічно чистого енергетичного ресурсу. Активний видобуток газу також допоможе звести до мінімуму ризики поверхневих викидів.

З припиненням видобутку зазвичай припиняється відкачування підземних вод, що застосовується для запобігання затоплення діючої шахти, що призводить до затоплення виробок. Це здатне також привести до поступового скорочення доступного ресурсу МЗШ і в потенціалі може послабити зв'язок між місцем видобутку газу і колекторами газу. Ступінь затоплення може варіюватися в залежності від гідрогеологічних умов, протяжності і глибини виробок, а відкачування ґрунтових вод може бути продовжене в цілях захисту глибших гірничих виробок від ризиків затоплення.

Тому при закритті шахти слід вивчити потенційний вплив на навколишнє середовище, а також розробити і прийняти відповідні інженерно-технічні заходи з метою зведення до мінімуму ризиків для навколишнього середовища. Ці заходи, поряд зі стратегією моніторингу, дозволяють ефективно управляти викидами і ризиками в період після закриття шахти.

Оцінка потенціалу видобутку і експлуатації МЗШ може проводитися одночасно з оцінкою ризиків в області безпеки і стану навколишнього середовища поряд з оцінкою відповідних заходів контролю. Наявність метану у виведеній з експлуатації шахті не є достатньою підставою для розробки програми видобутку і утилізації МЗШ.

Аналіз літературних джерел за даною тематикою свідчить про різні, іноді суперечливі підходи до вирішення даної задачі, що говорить про необ-

хідність розширення досліджень у даному напрямі [3–5]. Вилученню метану закритих шахт присвячено порівняно невелику кількість публікацій, а роботи, в основному, присвячені визначенню ресурсів метану і методичним підходам до їх оцінювання [6–8].

Застосовувані методики повинні бути засновані на надійних фізичних принципах, передбачати використання надійних джерел даних, визнавати фактори невизначеності й потенційні ризики. Невизначеність в оцінках неминуха через труднощі отримання точних даних про проникнення води в покинуті виробки та потенційні проблеми, пов'язані з припливом повітря при збільшенні тиску всмоктування. Запаси метану повинні бути скореговані з урахуванням такої невизначеності.

Не всі виведені з експлуатації шахти підходять для проектів з МЗШ. Повинні існувати сприятливі гірничо-геологічні умови, але найбільш важливою умовою є наявність належного кінцевого споживача для формування попиту на газ. Однак в деяких країнах у рамках проектів по вуглецевим залікам може бути доцільним утилізувати газ шляхом факельного спалювання. Досвід показує, що зусилля, прикладені на етапах попередньої оцінки економічної доцільності та техніко-економічного обґрунтування проекту, можуть значно скоротити як експлуатаційні проблеми, так і майбутні витрати.

Стаття спрямована на конкретизацію світового досвіду з оцінки стану виділення метану із закритих шахт та можливостей його використання для економіки країни разом з газом розроблюваних родовищ. Державні регулюючі органи, органи нафтогазового сектору та інші установи повинні враховувати ресурси метану шляхом виявлення потенційних небезпек, пов'язаних з триваючим виділенням метану після закриття шахт і виведення їх з експлуатації та підвищення керованості процесами скорочення викидів. Важливими супутніми перевагами видобутку і утилізації МЗШ є значне зниження ризику неконтрольованих викидів на поверхню, експлуатація газових ресурсів, які в іншому випадку стають відходами. Проекти з вилучення та утилізації МЗШ також сприяють досягненню цілей в галузі сталого розвитку, що стосуються недорогих та екологічно чистих джерел енергії та діяльності по боротьбі зі зміною клімату.

Пов'язані зі зміною клімату вимоги і конкуренція з боку поновлюваних джерел енергії і природного газу знижують залежність від вугілля як джерела енергії. Багато промислово розвинених країн переживають значний спад у видобутку вугілля і закривають шахти. Однак навіть у розвинених країнах і в країнах, що розвиваються, з активно функціонуючою вугільною промисло-

вістю закриття шахт є частиною циклу освоєння природних ресурсів. У той час, як реалізація програм закриття вугільних шахт може скоротити пропозицію вугілля, можливість викидів метану може зберігатися протягом десятиліть (причому найвищі, найбільш комерційно рентабельні обсяги викидів можливі в першому десятилітті після закриття шахти).

Країни докладають значних зусиль, спрямованих на стимулювання каптування і утилізації газу на діючих вугільних шахтах, проте приділяють менше уваги скороченню викидів і використанню метану на закритих шахтах. Крім пом'якшення наслідків зміни клімату, вилучення та утилізація МЗШ можуть також принести важливі соціальні вигоди. Вилучення і утилізація МЗШ можуть забезпечити створення нових робочих місць, що є хоча і порівняно невеликим, але, тим не менш, позитивним внеском. Там, де ресурси МЗШ значні, можуть з'явитися можливості для створення промислових парків, розробки потенційно дешевого чистого палива, що забезпечують привабливі вигоди комерційним підприємствам.

Технології та методи управління дозволяють налагодити видобуток метану на виведених з експлуатації шахтах, що забезпечує значні вигоди в області охорони навколишнього середовища, соціально-економічній сфері та в забезпеченні громадської безпеки.

Методи видобутку газу на виведених з експлуатації шахтах відрізняються від методів, застосовуваних для каптажу і вилучення газу на діючих шахтах. Після ізолювання шахти від атмосфери газ з усіх підземних джерел стає потенційно доступним для видобутку на одній виробничій ділянці. У складі газу, що вилучається на надійно ізолюваній виведеній з експлуатації багатогазовій шахті, концентрація метану зазвичай становить 15–90% і кисень відсутній. Іншими основними газоподібними компонентами можуть бути азот, в тому числі деоксигеноване повітря, і діоксид вуглецю. Іноді можуть бути присутніми оксид вуглецю в низькій концентрації і сліди вуглеводнів, зокрема етану.

Доступ до закритих гірничих виробок для видобутку газу здійснюється через колишні стовбури або штольні. Якщо вони не придатні для цього (наприклад, якщо вони заповнені і в них не прокладений вентиляційний трубопровід), то для проходки підземних виробок може бути пробурена газовідвідна свердловина з поверхні. Спочатку пластовий тиск може бути достатнім для виробництва МЗШ на поверхні. Однак, у кінцевому рахунку, для відбору газу з пустот шахти, в тому числі з раніше виробленого (обваленого) простору, із законсервованих ділянок або з розвантаженого

на місці вугільного масиву, потрібна відкачка або розрідження. За концентрацією метану склад газу може бути різним не тільки в кожній шахті, а й на різних ділянках однієї шахти. Основним фактором, що впливає на якість газу, є розбавлення повітрям, яке поступає в шахту з недостатньо герметизованих виходів на поверхню. Неконтрольоване надходження повітря знижує концентрацію метану в газоповітряній суміші, а також обмежує досяжні показники тиску всмоктування і дебіту. Для забезпечення якості і об'єму газу необхідно звести до мінімуму надходження повітря. Повітря, що поступає в покинуту шахту, може в деяких випадках привести до самозаймання і викиду оксидів вуглецю.

Кількість доступного для вилучення МЗШ залежить від різних чинників, включаючи обсяг пласта вугільного масиву, порушеного видобуванням, залишковий вміст газу у вугіллі, що залишився на місці, і швидкість затоплення виробок.

Окремі невеликі проекти з видобутку МЗШ на шахтах навряд чи будуть комерційно життєздатні, якщо їх не об'єднати. Об'єднання малих і середніх проектів з видобутку МЗШ з програмами утилізації шахтного метану (ШМ) на діючих шахтах сприяло б підвищенню гнучкості й рентабельності вилучення метану за рахунок використання джерела газу для задоволення пікових потреб, або закачування його до колектору для зберігання на майбутні потреби.

За інформацією, на деяких шахтах в європейських країнах дебіт МЗШ дорівнює або навіть перевищує дебіт ШМ, одержуваного на діючих шахтах [9]. У цих випадках може бути присутнім значний обсяг відносно недавно утвореного біогенного метану.

Факельне спалювання МЗШ з метою скорочення викидів в даний час не є широко поширеною практикою, за винятком випадків, коли це необхідно з міркувань безпеки і/або охорони навколишнього середовища. Це може суперечити умовам ліцензій, які видаються суб'єктам газового сектора в деяких країнах, а стимулів для факельного спалювання МЗШ мало. Винятком є США, де проекти по МЗШ можуть бути учасниками ряду вуглецевих ринків.

Запаси МЗШ. Обсяг вилученого з вугільного пласта МЗШ залежить від потужності покладу і залишкової газоносності вугільних пластів після видобутку в межах зони впливу проведення колишніх гірничих робіт.

Запаси МЗШ – це обсяг газу, який може бути вилучений з урахуванням показників затоплення. Затоплення поступово ізолює джерела МЗШ по мірі підйому води в старих виробках. Внаслідок цього не тільки скорочується обсяг доступно-

го газового колектору, а й може бути ізольована частина виробок шляхом затоплення сполучених штреків. Локалізоване затоплення може обмежити здатність встановлених на поверхні відкачувальних насосів, створюючи негативний тиск всмоктування в усіх виробках закритих шахт. Дані про відкачування води до закриття шахти, дають уявлення про ймовірне надходження води, проте герметизація входів у шахту і ліквідація зв'язку з поверхневими водами може знизити це значення.

Скидання ґрунтових вод на поверхню підпадає під дію обмежувальних екологічних норм, що здатне ускладнити це завдання і збільшити витрати. Тому рівень води у виведеній з експлуатації шахті є важливим обмеженням для реалізації проєктів по МЗШ. Найчастіше існує лише обмежена можливість для використання МЗШ з шахт до їх затоплення. Підземні штреки забезпечують шляхи передачі тиску всмоктування від встановлених на поверхні насосів в основні газові колектори. Всмоктування необхідно для створення градієнта тиску і підтримки десорбції газу з вугілля. Чим менше тиск всмоктування, тим менше обсяг витягнутого газу. Тому процес видобутку газу в значній мірі залежить від десорбції газу з основних вугільних пластів, що надходить у вироблений простір, і від насосів, що відкачують газ, який просочується через численні перемички; підтримка дебіту можлива лише при невеликих витоках через велику кількість перемичок. При низьких показниках дебіту втрати тиску через перемички незначні. Іноді ефективність видобутку газу може бути поставлена під загрозу в разі витоків свіжого повітря в гірничі виробки через погано герметизовані виходи на поверхню.

На шахтах, які були виведені з експлуатації за кілька років до установки системи газовидобутку, шахтні води могли накопичуватися в деяких вироблених просторах і витіснити метан в штреки і неглибокі виробки. Газ, що витісняється, може бути доступний для видобутку і під тиском спочатку забезпечувати високий дебіт. Однак загальний обсяг доступного газу може бути занадто малий для обґрунтування програм комерційного видобутку МЗШ. Після затоплення виробленого простору, пов'язані з ним основні джерела газу більше не можуть виділяти газ в гірничі виробки, тому для відновлення процесів десорбції потрібно осушення.

В цілому обсяг вилученого МЗШ залежить від: залишкового вмісту газу в будь-якій газоносній породі або вугільному пласті в межах зони впливу; обсягу пустотного простору ліквідованих виробок і швидкості затоплення; взаємозв'язку ділянок, на яких в минулому видобувалося вугілля, і вироблених просторів; десорбційних характерис-

тик вугілля і тиску газу; якості ізолюючих перемичок на поверхні.

Прогнозування дебіту МЗШ. Потенційний дебіт газу, що видобувається, можна оцінити на основі даних про викиди газу на шахті, вимірних до її закриття, шляхом експонентних або степеневих кривих спаду. Фактичні значення дебіту можна визначити шляхом випробування на приплив з використанням відкачувального насосу. Очевидно, що швидке затоплення може призвести до стрімкого зниження дебіту і значного скорочення вилученого обсягу. Високий тиск газу в ліквідованих гірничих виробках може бути завищеним показником через підвищення рівня води в добре герметизованій системі.

Для оцінки викидів МЗШ на виведених з експлуатації шахтах часто використовуються екстрапольовані криві спаду на основі даних вимірювань. Однак екстраполяція об'ємів викидів МЗШ лише на основі декількох джерел даних свідомо ненадійна, оскільки не враховує обсяги різних пустотних просторів в різних розроблених пластах і, відповідно, відмінності в припливі води.

Надійний процес визначення ймовірного обсягу МЗШ, доступного для використання, включає розрахунки балансових запасів МЗШ на основі гірничо-геологічних даних і даних про залишковий вміст газу. Межі колектору визначаються розміром колишніх зон розвантаження лави, а ресурси газу – як залишковий вміст газу у вугільному масиві, зруйнованому в ході розробки лави в минулому.

Обсяг вилученого газу залежить від взаємозв'язку гірських виробок, стандартів герметизації входів і швидкості затоплення. Останній показник можна оцінювати по кожному пласту, використовуючи дані про швидкість припливу води і оцінки пустотного простору на кожному експлуатаційному горизонті. Таким чином, обсяг запасів МЗШ є функцією глибини затоплення.

Стратегії видобутку газу. При формуванні стратегії видобутку газу слід розглянути різні варіанти з метою забезпечення максимального прибутку і отримання вигоди замовниками:

- видобуток максимально можливого обсягу газу перед закриттям з використанням традиційних методів дегазації при забезпеченні доступу до основних місць видобутку газу і контролю за процесом;

- можливість максимального обсягу видобутку після закриття і проведення робіт з герметизації на ранньому етапі, поки дебіт газу найвищий, а також вилучення максимального обсягу газу до ліквідації джерел дегазації внаслідок їх затоплення;

- видобуток МЗШ з метою задоволення попиту конкретних споживачів.

Слід також розглянути питання про оптимізацію використання джерел МЗШ, що виснажуються:

- видобуток і використання МЗШ при дебіті менше максимального при ризику скорочення розроблюваних запасів газу внаслідок триваючого припливу ґрунтових вод;

- видобуток МЗШ тільки з метою задоволення пікового попиту, з тим щоб скористатися перевагами високих пікових тарифів на виробництво енергії;

- комбіноване виробництво енергії з використанням природного газу в районах, де вартість видобутку МЗШ менше закупівельної ціни природного газу;

- використання пересувних комплексних генеруючих систем з метою перерозподілу надлишкової потужності при наявності альтернативних об'єктів і готовності до отримання зайвого устаткування.

Варіанти утилізації МЗШ. Для проектів по МЗШ є різні варіанти утилізації, аналогічні тим, які пропонуються щодо використання природного газу. При виборі найбільш відповідного варіанта кінцевого використання необхідно враховувати ціни на енергоносії, домовленості про передачу газу і електроенергії, заходи регулювання і стимулювання, інфраструктуру і доступ, планування, екологічні питання і вимоги замовників.

Залежно від якості газу та інших чинників, варіанти утилізації метану в комерційних цілях включають: виробництво електроенергії; комбіноване виробництво тепла та енергії в промислових і/або міських районах; комерційні поставки на ринок природного газу за існуючими газопроводами; споживання місцевою промисловістю тепла, що доставляється по місцевих трубопроводах; закачування природного газу з вмістом МЗШ низької якості в обсягах, що забезпечують дотримання технічних умов для трубопроводів; використання в якості сировини для хімічної промисловості; використання в мікротурбінних установках малої потужності і паливних елементах; паливо для транспортних засобів; монетизовані пільги, пов'язані зі скороченням викидів парникових газів (наприклад, факельним спалюванням). Найбільш поширеними варіантами утилізації метану в комерційних цілях є виробництво енергії і продаж з використанням трубопроводів природного газу. Кожен технологічний варіант утилізації МЗШ має свої специфічні обмеження, переваги і недоліки [6, 10] (табл. 1).

Оцінка впровадження проектів з видобутку і утилізації МЗШ. На сьогоднішній день проекти по МЗШ, в основному, здійснювалися з метою постачання газу місцевій промисловості за місцевим розподільним трубопроводом або вироб-

ництва електроенергії за допомогою розташованих на об'єкті модульних двигунів внутрішнього згорання з електричним (іскровим) запалюванням. Вибір варіанта кінцевого використання обумовлений місцевими і національними цінами на енергоносії, вимогами місцевого ринку, транспортними витратами та інвестиційною вартістю проектів. Наприклад, у Великій Британії побудовані спеціальні трубопроводи для поставок МЗШ промисловим споживачам.

Використання МЗШ для закачування в трубопроводи і генерації тепла має переваги в плані простоти видобутку та постачання, низьких капітальних витрат і гнучкості ринку. Однак там, де налагоджено постачання природного газу, може виникнути необхідність в МЗШ за нижчою виграшною ціною з метою збереження частки на ринку. До факторів, що впливають на використання МЗШ як паливного газу, відносяться: витрати на компримування газу для безпосереднього закачування в розподільну мережу трубопроводів; допустимий склад газу для закачування; близькість існуючих трубопроводів і необхідність будівництва трубопровідної мережі; дотримання мінімальних вимог до газу протягом періоду постачання; доступ до джерел альтернативних видів палива для збагачення газу або забезпечення резервного постачання; доступ до системи газопостачання, контроль і регулювання подачі газу в систему газопостачання; наявність газосховищ на місці або поблизу споживачів і необхідність в них; близькість місцевих промислових споживачів; необхідність і вартість газопідготовки; наземний доступ до трубопровідної мережі або сховища.

Якщо якість і обсяги видобутку газу високі, а проект вилучення МЗШ розташований поблизу газопровідної мережі, то продаж газу для розширення ринку може стати привабливим варіантом. Продаж МЗШ і його подача в комерційні трубопроводи можуть здійснюватися, якщо газ, що видобувається, відповідає певним критеріям. Оператори трубопроводів найчастіше пред'являють до якості газу досить жорсткі вимоги, які повинні бути дотримані до того, як газ буде закачаний. Межі по концентрації встановлюються з метою захисту від необмеженого припливу токсичних газів, вологи, діоксиду вуглецю і кисню. Наявність вологи і діоксиду вуглецю в трубопроводі може привести до корозії, утворення токсичних газів – до формування небезпечних умов на місці кінцевого використання, а кисню – до небезпеки вибуху.

МЗШ може також використовуватися в паливних елементах і мікротурбінах з метою задоволення потреб у виробництві електроенергії на місці або для обслуговування споживачів з низьким енергоспоживанням, проте ці технології в

Таблиця 1. Характеристики варіантів кінцевого споживання МЗШ

Варіант кінцевого використання	Використання	Переваги	Недоліки	Концентрація CH_4 , %
Закачування в трубопровід природного газу	Висока якість МЗШ (очищений)	Еквівалент природного газу, привабливий на ринках з високими цінами на газ і добре розвинутою трубопровідною інфраструктурою	Потребується МЗШ високої якості, джерела якого розташовані поблизу трубопроводу природного газу або мають доступ до нього. У разі невідповідності вимогам до якості необхідне дороге очищення	95–97
Закачування природного газу	Закачування МЗШ низької якості в трубопроводі природного газу	Сприяє використанню МЗШ низької якості, який в іншому випадку був би випущений в атмосферу	Може додаватися лише в певному обсязі з метою забезпечення дотримання технічних умов для природного газу; комерційне застосування вкрай обмежене внаслідок низької ціни на МЗШ. Перед закачуванням потрібно виключити можливість утворення потенційно вибухонебезпечних сумішей	більше 25
Промислове для безпосереднього використання з метою генерації тепла	Газ середньої якості для використання в промислових і комерційних цілях і опалення житлових районів	Низьковитратне джерело енергії, потрібна мінімальна газопідготовка, може видобуватися за запитом	Можуть виникати проблеми в плані обсягу і якості газу для довгострокових поставок; вартість прокладки місцевого трубопроводу або підключення до існуючого промислового трубопроводу	більше 35
Виробництво енергії і використання відпрацьованого тепла	Газові двигуни-генератори, що забезпечують при необхідності рекуперацію тепла	Добре зарекомендовані технології можуть забезпечити генерацію залежно від попиту в необхідних межах; можливість використання в період пікових навантажень з високими тарифами; можливість використання відпрацьованого тепла	Значні капітальні вкладення; можливість використання там, де відносно висока ціна на електроенергію; невизначеність в плані забезпечення витрат і якості газу в довгостроковій перспективі; виснаження ресурсів газу з плином часу; підключення до мереж може бути дорогим	більше 35
Інше використання	Сировина для хімічної промисловості; КПП і СПГ для транспортних засобів; мікротурбіни і паливні елементи	Точкове використання, прив'язка до місця і залежність від попиту	Як правило, вимагає дорогого очищення; звичайно потрібен газ, якість якого за процентним вмістом CH_4 не нижче якості газу для трубопроводів	менше 35

даний час є витратними через їх, як правило, невелику потужність.

Проект з утилізації МЗШ може включати видобуток і використання газу на одній або декількох виведених з експлуатації шахтах. Спільна реалізація проектів по МЗШ і ШМ на діючих шахтах буде вигідною. У той час як МЗШ може добуватися в міру необхідності, витяг МШ має бути безперервним для забезпечення безпеки діючої шахти. Тому з метою задоволення пікового попиту на газ МЗШ може використовуватися спільно з ШМ. У разі низького попиту виведена з експлуатації шахта може служити сховищем ШМ. Наявність декількох джерел газу вигідно в плані підвищення надійності газопостачання та забезпечення можливостей для контролю і підтримки бажаного рівня чистоти газу.

Незалежно від кінцевого використання, для проектів по МЗШ потрібно, щоб газ постачався з заданими витратами і концентрацією протягом всього терміну дії поставки. З метою ефективного управління проектом потрібно передбачити процеси, які призведуть до зміни складу, тиску і дебіту газу, і, зокрема, можуть мати наслідки, пов'язані з підвищенням рівня води в шахті. Тому в ліквідованих виробках необхідно проводити контроль припливу і рівня води.

Теплотворна здатність газу (скоригована на стандартні умови температури і тиску за відсутності вологи) є кращим на міжнародному рівні показником енергопостачання, який повинен використовуватися в якості основи при вирішенні питань договірному характеру і для оцінки роботи системи використання МЗШ.

До факторів, що впливають на вибір варіанта використання МЗШ для виробництва енергії, відносяться: розташування, потужність і клас існуючої електророзподільної інфраструктури; доступ і плата за підключення до національної системи постачання; пов'язані з вимірюванням і контролем витрати для поставки виробленої енергії; вимоги до потужності місцевого користувача; потенціал об'єктів місцевої інфраструктури; вимоги

щодо земельних ресурсів та доступу; використання відпрацьованого тепла на об'єкті або на місці; існування пільгових тарифів або інших субсидій на чисту енергію.

Викиди і використання МЗШ в окремих країнах. У табл. 2 представлені відомості про масштаб проектів зі скорочення викидів у провідних країнах з видобутку МЗШ. Слід зазначити, що викиди на багатьох закритих шахтах часто оцінюються за показниками якості, а не кількісно, причому оцінки проводяться на основі прийнятих методик, зокрема [11, 12]. Ці дані значно відрізняються від показників викидів, зареєстрованих на діючих шахтах, які найчастіше вимірюються як в цілях відстеження екологічних показників, так і моніторингу в галузі охорони здоров'я та техніки безпеки. В цілому це призводить до більшої невизначеності щодо зареєстрованих викидів МЗШ.

Китай. Потенційні ресурси МЗШ були виявлені в Китаї [13]. За повідомленнями, закинутими вважаються щонайменше 30000 вугільних шахт, розташованих в міських та сільських районах, проте більшість з них, ймовірно, занадто малі, щоб розробка проектів по МЗШ була доцільною. Крім того, були виявлені 120 виведених з експлуатації державних вугледобувних підприємств. На 50 з них, за повідомленнями, є можливості для видобутку МЗШ. У 2017 р. були закриті підприємства із загальною продуктивністю 150 млн т вугілля. Проте можливості по вилученню МЗШ в Китаї обмежені в силу ряду факторів, включаючи часто високі темпи загоплення, інтенсивність видобутку, що веде до ліквідації більшості джерел газу в деяких районах, і недосконалу нормативно-правову базу щодо власності на землю, майно, ресурси і відповідальності за їх використання після закриття шахти. У роботі [14] наводяться два приклади проектів по МЗШ і опис двох потенційних ділянок майбутньої діяльності.

Німеччина. Згідно з міжнародною базою Даних про проекти з шахтного метану, в Німеччині

Таблиця 2. Провідні країни з видобутку МЗШ

Країна	Кількість проектів	Скорочені викиди (млн т екв. CO ₂)	Використання МЗШ
Китай	Дані відсутні	В незначній кількості	Дані відсутні
Чехія	10	0,36	Виробництво енергії
Франція	5	10,6	Промисловість
Німеччина	40	5,71	Виробництво енергії
Велика Британія	20	0,64	Виробництво енергії
США	20	2,70	Продаж по мережі

Примітка. Джерело: EPA, 2015, CMM Country Profiles; EPA, 2017, U.S. GHG Inventory.

реалізовано понад 35 проєктів по МЗШ, і всі вони пов'язані з виробництвом електроенергії або комбінованим виробництвом теплової та електричної енергії. Станом на 2015 р. налічувалося 94 установки для виробництва теплової та електричної енергії, що спалюють МЗШ (один проєкт зазвичай охоплює декілька установок), сукупної встановленої генеруючої потужністю 120 МВт. У рамках цих проєктів по МЗШ виробляється більше 500 МВт·год електроенергії і 75·МВт год тепла в рік і вдається запобігти 2,3 млн т викидів CO₂ екв. [15]. Реалізація більшості проєктів з МЗШ в Німеччині почалася на початку 2000-х років, коли, відповідно до оновленої політики країни в галузі відновлюваних джерел енергії, було встановлено спеціальний пільговий тариф на виробництво електроенергії на основі спалювання МЗШ і ШМ. У той же час, за повідомленнями, щорічні викиди ПГ на виведених з експлуатації шахтах скоротилися з 5 млн т CO₂ екв. у 2000 р. до приблизно 18000 т CO₂ екв. в 2015 р. У 2015 р. у Німеччині в рамках діючих проєктів по МЗШ, за оцінками, було утилізовано 99% сукупних викидів метану на виведених з експлуатації шахтах [16].

Франція. У Франції остання вугільна шахта Ла-Ув була закрита в 2004 р., роботи по каптажу і утилізації МЗШ почалися в 1978 р. у відповідь на нафтову кризу, яка виникла на Близькому Сході у 1973 р., та призвела до зростання цін на нафту протягом декількох років. З тих пір на ряді газових вугільних шахт, які виведені з експлуатації на півночі Франції, ведеться видобуток газу, який закачується в газопроводи і використовується для вироблення електроенергії. Протягом багатьох років цією діяльністю займалася компанія «Газенор», колишня дочірня компанія національної вугільної компанії Франції «Шарбонаж де Франс», яка була ліквідована в 2008 р. Основними джерелами газу є три вугледобувних підприємства в Авійоні, Дівйоні і Дезірі. [17]. У 2016 р. компанію «Газенор» придбало відкрите акціонерне товариство «Французька енергетична компанія», що контролює в даний час на умовах концесійного договору ділянки площею приблизно 1500 км² і займається видобутком газу на виведених з експлуатації шахтах і виробництвом електроенергії на п'ятьох електростанціях з встановленою потужністю 9 МВт. У 1978–2018 рр. в Авійоні було видобуто 1068 млн м³ метану, а в Дівйоні і Дезірі – 325 млн м³ і 145 млн м³ відповідно. У 2018 р. сукупний річний видобуток газу на цих трьох шахтах склав 26 млн м³ метану. За оцінками «Французької енергетичної компанії», щорічно вдається запобігти більше 600 тис. т викидів діоксиду вуглецю за рахунок використання метану в якості палива-замінника вугілля.

Велика Британія. До 1990 р. у Великій Британії було закрито майже 80% підземних вугледобувних підприємств, і до 2010 р. значна частка МЗШ викидалася в атмосферу або утилізувалася [18]. Видобуток МЗШ на малих шахтах вважалася нерентабельним, вугледобувні підприємства і шахти з низьким вмістом газу були закриті більше десяти років і затоплені. До 2018 р. видобуток вугілля було припинено в 150 районах вугледобутку, було розроблено майже 30 проєктів по використанню МЗШ з метою вироблення електроенергії та газопостачання, реалізація яких не обов'язково почалася одночасно. Станом на 2017 р. здійснювалися 13 проєктів з МЗШ: 12 проєктів з виробництва електроенергії (сукупної встановленою потужністю 78 МВт) і один проєкт із закачування газу в трубопроводи. В рамках реалізованих у Великій Британії проєктів з МЗШ утилізується близько 58% викидів метану на виведених з експлуатації шахтах. Викиди метану на виведених з експлуатації шахтах скоротилися у Великобританії з 1,4 млн т CO₂ екв. у 2000 р. до 0,441 млн т CO₂ екв. у 2015 р.

США. У США нараховується 7500 виведених з експлуатації шахт, 524 з яких вважаються газовими [19]. Хоча в США проєкти з МЗШ традиційно реалізуються в цілях закачування газу в існуючі трубопроводи природного газу, кількість енергетичних проєктів з МЗШ і проєктів з факельного спалювання МЗШ збільшилася в останні роки. В цілому на 45 вугільних шахтах реалізується 19 проєктів з МЗШ. До них відносяться комбіновані проєкти, включаючи три проєкти по МЗШ, кожен з яких охоплює 3–5 шахт, один проєкт з МЗШ, який використовує метан, що видобувається на 14 шахтах, і три проєкти з МЗШ, які об'єднують існуючі проєкти з ШМ [20]. Внаслідок зростання використання МЗШ чисті викиди метану на виведених з експлуатації шахтах скоротилися з 8,8 млн т CO₂ екв. у 2000 р. до 6,4 млн т CO₂ екв. у 2017 р. Загальний обсяг вивільненого МЗШ збільшився до 9,2 млн т CO₂ екв. в 2017 р., з яких 2,7 млн т CO₂ екв. використовується для виробництва енергії і продажу газу через трубопровідні системи [21]. Хоча в США видобуток вугілля, як і раніше, є важливим елементом енергетичного комплексу, кількість підземних вугледобувних підприємств скоротилося з 583 у 2008 р. до 237 у 2017 р. внаслідок використання конкурентних видів палива і тривалої тенденції зростання продуктивності видобутку вугілля в лавах. Закриття останнім часом багатьох шахт може забезпечити можливість для рентабельної експлуатації ресурсів МЗШ.

Україна. Для адекватної інтерпретації геологічних даних при оцінці запасів метану, що залишився на старих шахтних полях, необхідно

деталізоване вивчення процесів міграції метану з виробленого простору закритих шахт на земну поверхню. Процес емісії метану на поверхню є некерованим процесом і може продовжуватися десятиліттями. У разі виділення метану на поверхню гірничого шахтного відводу, будівництво приміщень господарського та житлового призначень може становити небезпеку для їх подальшої експлуатації або зовсім неможливе без проведення комплексу протидій виділенню метану.

Тільки в Донецькій області за останні 20 років закрито більше 80 вугільних шахт і ще більше десятка шахт належать до третьої групи за газоносністю, на яких проводяться роботи з підготовки до ліквідації. В Україні немає досвіду утилізації метану закритих шахт, але, з огляду на досвід інших країн, можна очікувати, що дослідження в цьому напрямку можуть виявитися перспективними. Для оцінки ресурсів за метаном закритих шахт була оброблена геологічна інформація по 114 вугільним шахтам Донецької області [3]. З позицій перспективності гірничих відводів для вилучення техногенного метану було відібрано 16 закритих шахт, з яких в якості пріоритетних об'єктів для вивчення можливості вилучення метану були обрані чотири шахти: «Харцизька», «13 біс», «Кіровська», ім. Батова. Залишковий ресурс шахтного газу, складав 15–22% від геологічних показників обсягів метану на діючих шахтах, а саме, емісійні запаси метану в підробленому масиві на шахтах: «Харцизька» – 546 млн м³; «13 біс» – 130 млн м³, «Кіровська» – 969 млн м³; ім. Батова – 190 млн м³ (тимчасово розташовані на території ОРДЛО). На даний час близько 12 шахт не ведуть видобування, та переведені в категорію підготовлених до ліквідації. Оцінка залишкових запасів метану та можливості що до його використання, повинні уточнюватися згідно проектних планів закриття шахт. Як приклад, детальну оцінку доцільно провести по шахтам сухої консервації «Піонер», «Родинська» та «Д.С. Коротченко».

Проблема вилучення МЗШ в Україні на даний час не має комплексного підходу до вирішення, що особливо важливо у зв'язку з втратою контролю держави над частиною Луганської та Донецької областей і хаотичним, некерованим затопленням шахт на цих територіях. Як наслідок, потрапляння води на нижчі шахтні горизонти, та процес додаткової міграції (видавлювання) метану на діючі й закриті шахти контрольованої території. Дана проблема більш менш вивчалась до 2014 р. Кількість публікацій та дані щодо способів закриття шахт і реального фактажу обсягів виділення обмежена. Роботи здебільшого присвячені спробам розробки методичних підходів з оцінювання ресурсів метану.

ВИСНОВКИ

Незважаючи на зростаюче скорочення світового шахтного фонду, частка викинутого техногенного метану закритих шахт у перспективі може значно збільшитися. У 2010 р. на метан закритих шахт припадало 17% загальносвітового обсягу викидів, згідно з прогнозами в 2050 р. ця частка може зрости до 24%.

Світовий досвід і теоретичні дослідження емісії метану на поверхню при консервації (закритті) шахт важливі для аналізу процесів виділення метану і відповідного ступеню його подальшого залучення в економіку України. При затопленні шахтного простору відбувається міграція газу в залишкові пустоти, де відбувається підвищення тиску вільного газу у виробках над рівнем ґрунтових вод. Затоплення закритої шахти зупиняє витік метану протягом приблизно п'яти років, концентрація метану при цьому може досягати до 19%. При сухій консервації витік може відбуватися при концентраціях понад 30% протягом десяти років.

В Україні існує необхідність розробки проектів, що мають реалізовуватися після припинення видобувної діяльності шахт, і спрямовуватися на скорочення викидів, характерних для життєвого циклу вуглевидобутку шляхом оптимізації вилучення та утилізації метану, який в іншому випадку потрапляв би в атмосферу. Об'єднання малих і середніх проектів з видобутку метану закритих шахт разом із програмами утилізації шахтного метану на діючих шахтах, сприятиме підвищенню гнучкості і рентабельності їх сумісного застосування за рахунок використання джерела газу для безпосереднього забезпечення потреб енергетики, або шляхом накопичення і зберігання його у газовому сховищі при низькому рівні споживання в конкретний період часу.

Розв'язання проблеми утилізації емісії метану закритих шахт на поверхню також дозволить вирішити нагальні безпекові проблеми для досі депресивних шахтарських регіонів при реструктуризації вугільної галузі.

1. Прекращение добычи угля не снизит до нуля выбросы метана из шахт. *Национальная ассоциация нефтегазового сервиса*. 2021. URL: <https://nangs.org/news/renewables/prekrashtenie-dobychi-uglya-ne-snizit-do-nulya-vybrosy-metana-iz-shaht> (дата звернення: 03.08.2021).

2. Kholod, N., Evans, M., Pilcer, R.C., Cote, M., & Collings, R. (2018). Global CMM and AMM Emissions: Implications of Mining Depth and Future Coal Production. *Global Methane Forum*, April 16, 2018, Toronto, Canada. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ftpgp_2012_15_17 (дата звернення: 06.08.2021).

3. Гринев В.Г., Кузнецова Л.Д., Волошина Н.И., Сергиенко А.И., Подрухин А.А. Изучение ресурсов шахтного метана закрытых угольных шахт Донецкой области.

Физико-технические проблемы горного производства. 2012. Вып. 15. С. 131—139. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LIN&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&S21P03=FILEA=&S21ISTR=ftpgp_2012_15_17 (дата звернення: 03.08.2021).

4. Корчагина Т.В., Ефимова Н.В., Жабин А.Б., Ишутина С.А.. Исследование эмиссии угольного метана на поверхность из ликвидируемых шахт. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. 2017. Вып. 4. С. 48—60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-emissii-ugolnogo-metana-na-poverhnost-iz-likvidiruemyh-shaht> (дата звернення: 03.08.2021).

5. Гринев В.Г., Сергиенко А.И., Подрухин А.А. Исследования процесса миграции метана из выработанного пространства закрытых шахт. *Физико-технические проблемы горного производства*. 2009. Вып. 12. С. 74—79. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/12562/11Grinev.pdf?sequence=1> (дата звернення: 10.08.2021).

6. Руководство по наилучшей практике эффективной дегазации источников метановыделения и утилизации метана на угольных шахтах. *Серия публикаций ЕЭК по энергетике*. № 31. ООН. 2010. 107 с. URL: https://www.globalmethane.org/documents/BPG-Effective-Methane-Drainage-Coal-Mines_2017_Russian.pdf (дата звернення: 12.08.2021).

7. Про газ (метан) вугільних родовищ: Закон України від 21 травня 2009 року за № 1392-VI.

8. Защита зданий от проникновения метана. Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 2001. 61 с.

9. Backhaus C. (2017). Experience with the utilization of coal mine gas from abandoned mines in the region of North-Rhine-Westphalia, Germany. Presentation at Workshop on Coal Mine Methane and Abandoned Mine Methane in the context of Sustainable Energy. *United Nations Economic Commission for Europe*. Geneva, Switzerland. URL: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/cmm12/Workshop_2017/7_Mr_Backhaus.pdf (дата звернення: 16.08.2021).

10. Берелл Р., Керто С. Утилизация метана закрытых шахт: опыт Сибири и Великобритании. Сокращение эмиссии метана: докл. II Международной конф. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 518 с.

11. IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Vol 2: Energy Chapter, Fugitive Emissions. 2006. Geneva, Switzerland.: URL: https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_4_Ch4_Fugitive_Emissions.pdf (дата звернення: 18.08.2021).

12. EPA (2004). Methane Emissions from Abandoned Coal Mines In The United States: Emission Inventory Methodology and 1990—2002 Emissions Estimates. 2004. Washington, D.C. USA. URL: https://www.epa.gov/sites/production/files/201603/documents/amm_final_report.pdf (дата звернення: 18.08.2021).

13. Cote M. (2018). Significance of Abandoned Mine Methane Emissions and Preparing for Projects, *Global Methane Forum UNECE Side Event, Toronto, Canada, 16 April, 2018*.

14. Liu Y., Zhu Y., Liu S., & Li, W.A. (2018) Hierarchical methane adsorption characterization through a multiscale approach by considering the macromolecular structure and pore size distribution. *Marine and Petroleum Geology*. № 96. P. 304—314.

15. Backhaus C. (2017). Experience with the utilization of coal mine gas from abandoned mines in the region of North-Rhine Westphalia, Germany. Presentation at Workshop on Coal Mine Methane and Abandoned Mine Methane in the context of Sustainable Energy. *United Nations Economic Commission for Europe*. Geneva, Switzerland. URL: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/cmm/cmm12/Workshop_2017/7_Mr_Backhaus.pdf (дата звернення: 20.08.2021).

16. Denysenko A., Evans M., Kholod N., Butler N., Roshanka V. (2019). Legal and Regulatory Status of Abandoned Mine Methane in Selected Countries: Considerations for Decision Makers. EPA Publication № 430R19003. March 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/330090549_Legal_and_Regulatory_Status_of_Abandoned_Mine_Methane_in_Selected_Countries_Considerations_for_Decision (дата звернення: 20.08.2021).

17. Moulin J. (2019). Personal interview with R.C. Pilcher, 2 July 2019. URL: https://www.globalmethane.org/documents/1921351_R_ECE_ENERGY_128_WEB.pdf (дата звернення: 20.08.2021).

18. Fernando S. (2011). Update of Estimated Methane Emissions from UK Abandoned Coal Mines, WSP Environment and Energy, Department of Energy and Climate Change, 25th May 2011. 37 p. URL: https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat07/1107080945_1775-ghg-improvement-project-wsreport.pdf (дата звернення: 20.08.2021).

19. EPA (2017). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2015. *U.S. Environmental Protection Agency*. Washington, DC. URL: https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-02/documents/2017_complete_report.pdf (дата звернення: 03.08.2021).

20. Cote M. (2018). Maximizing Value of Abandoned Mine Methane, *Global Methane Forum, Toronto, Canada, 17 April 2018*. 17 p. URL: https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/images/CMM/CMM_CE/19_Cote.pdf (дата звернення: 20.08.2021).

21. EPA (2019). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2017. *U.S. Environmental Protection Agency*. Washington, DC. URL: <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks-1990-2017> (дата звернення: 18.08.2021).

Надійшла до редколегії: 02.09.2021