

## ABSTRACT

**The study purpose.** The purpose is to study the efficiency of natural ventilation of workplaces in the open pit of Poltava Mining-and-Processing Integrated Works to ensure standard sanitary and hygienic conditions at the workplaces; to determine the concentration of harmful substances release from mining and loading as well as transporting facilities; and to identify minimum air velocity required for their removal.

**Methodology.** To obtain the results, following methods were used: analytical - to study the efficiency of natural ventilation of workplaces in the open pit and to determine the minimum air velocity required for harmful substances removal; graphic-analytical - to develop an average cross-section of the open pit to determine the flow zones of the recirculating ventilation scheme.

**Results.** Concentration of harmful substances intensity release within the open pit of Poltava Mining-and-Processing Integrated Works as well as minimum air velocity required for their removal has been determined. Intensity of harmful substances (i.e. dust and gas) release, minimum air velocity required to remove them and provision of standard sanitary and hygienic conditions in the context of the workplaces have been identified.

**Scientific novelty.** The results concerning the efficiency of natural airing of workplaces within the open pit of Poltava Mining-and-Processing Integrated Works in the context of modern mining and hoisting as well as transportation systems use have been obtained.

**Practical significance.** The studies were carried out within the framework of the state-financed research titled "The development of technological foundations for environmentally friendly mining in the context of technogenically loaded mining regions of Ukraine".

**Keywords:** *efficiency of natural ventilation, concentration of harmful substances release, air velocity.*

УДК 622.278

© П.Б. Саїк, В.Г. Лозинський, М.В. Петльований, К.С. Сай, Є.М. Стрижаков

## СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО ОСВОЄННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ЗАЛИШЕНИХ ТА НЕКОНДИЦІЙНИХ ЗАПАСІВ ВУГІЛЛЯ

© P. Saik, V. Lozynskyi, M. Petlovanyi, K.Sai, Ye. Stryzhakov

## MODERN APPROACH TO THE DEVELOPMENT ENERGY RESOURCES OF RESIDUAL AND NON-COMMERCIAL COAL RESERVES

**Мета.** Формування нового сучасного підходу до раціонального освоєння енергетичних ресурсів залишених та некондиційних запасів вугілля термохімічним перетворенням на місці їх залягання з отриманням комплексу цінних промислових продуктів.

**Методика досліджень.** Для досягнення поставленої мети в роботі використано комплексний підхід, що включає: науково-технічний аналіз ефективності існуючих технологій видобутку вугілля, аналізу світового рівня зацікавленості до технологій газифікації та гідратування у провідних наукових журналах, що внесені до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science за допомогою «Data Search»; інженерно-конструкторське виконання нової технологічної схеми термічної переробки вугілля шляхом підземної газифікації.

**Результати дослідження.** Висвітлені актуальні питання низької ефективності технологій підземного видобутку вугілля з тонких та вельми тонких пластів і проблеми залишених у шахтних полях закритих гірничих підприємств. Встановлено, що виймання вугілля здійснюється здебільшого механізованими комплексами, проте капітальні витрати на модернізацію шахт, собівартість його вилучення та рівень безпеки с сучасних умовах ставлять під сумнів ефективність цих технологій. Виявлено, що стрімке превалювання публікацій протягом 50 років з напрямів газифікації вугілля та газогідратних технологій свідчить про значну зацікавленість та перспективність розвитку даних технологій у контексті сучасного сталого розвитку домінуючих технологій отримання альтернативних джерел енергії. Запропоновано інноваційну технологічну схему конверсії твердого палива, що передбачає комплексне використання отриманих енергетичних та хімічних продуктів при газифікації запасів вугілля на місці їх залягання.

**Наукова новизна.** Створено інноваційний підхід до раціонального освоєння енергетичних ресурсів залишених та некондиційних запасів вугілля на основі функціонування «трикомпонентної системи» – підземного газогенератора, рекуператора тепла та когенераційної установки.

**Практичне значення.** Створення комплексів з газифікації, когенерації та гідратування на території вугільних шахт дозволить на місці залягання переробляти запаси вугілля з отриманням теплової енергії, енергетичної та хімічної сировини, виходячи з кон'юнктури енергетичного й хімічного ринків.

**Ключові слова:** *запаси вугілля, технології видобутку, підземна газифікація, конверсія твердого палива, data search, технологічна схема, генераторний газ*

**Вступ.** Кам'яне вугілля є основним стратегічним паливно-енергетичним ресурсом України, який здатен, при розкритті його потенціалу, забезпечити її енергетичну незалежність. Розвідані й прогнозовані запаси нафти та природного газу у порівнянні з запасами вугілля в Україні досить обмежені. При сучасних рівнях видобутку природного газу в Україні вистачить на 50 – 60 років, нафти – на 40 – 50 років, а вугілля – більш, ніж на 500 років. До 75% вугілля використовується як паливо, а 25% – як технологічна сировина для чорної металургії, хімічної та інших галузей промисловості [1].

Незважаючи на стрімкий розвиток науково-технічного прогресу підземний видобуток вугілля в Україні залишається складним та трудоемним у зв'язку з незначною потужністю пластів, їх газоносністю та нестійкими породами. Основним гірничо-геологічним показником, що впливає на ефективність технології розробки вугільних пластів, є їх потужність, яка для більшості вугільних родовищ України, у 65% випадків складає менше 1,2 м. Розподіл запасів вугілля за потужностями пластів наведено на рисунку 1 [2].

Існуюче на сьогодні гірничодобувне обладнання та технології підземного видобутку не вирішують питання ефективного виймання вугільних пластів по-

тужністю менше 0,7 м, що призводить до суттєвих втрат вугілля в надрах. Так, загальні балансові запаси вугільних пластів оцінюються в 41,9 млрд т, забалансові – в 17,3 млрд т [3], балансові запаси, що залишились в межах шахтних полів закритих гірничих підприємств, складають понад 1,0 млрд т, які існуючими технологіями вже навряд чи будуть вилучені у повній мірі.

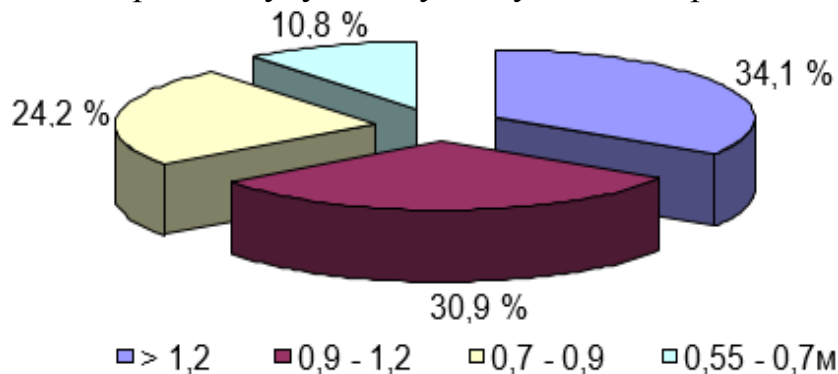


Рис. 1. Діаграма розподілу запасів вугілля України за потужністю, що знаходяться на балансі шахт

Видобуток вугілля в Україні здійснюється лише для забезпечення електроенергією промислових підприємств та суспільство на рівні 45% від загального обсягу її виробництва, проте відомо, що при фізико-хімічному перетворенні вугілля та зміні його агрегатного стану існує можливість отримання цінних хімічних та енергетичних продуктів, здатних замінити частину природного газу, що імпортується із закордону.

Тому до питання розробки вугільних родовищ України потрібно підходити комплексно, а концепція їх подальшого освоєння має базуватись на заміщенні частини існуючого обсягу вуглевидобутку нетрадиційними технологіями, перш за все підземною газифікацією вугілля (ПГВ), яку доцільно здійснювати на місці залягання вугільних запасів в умовах діючих гірничих підприємств та тих, що готуються до закриття.

**Аналіз ефективності наявних технологій розробки вугільних родовищ.** За історію незалежної України вугілля вилучалось відкритим та підземним способом. Відкритим способом розроблялись поклади бурого вугілля у Придніпровському буровугільному регіоні до середини 90-х років. На сьогодні видобувається тільки кам'яне вугілля та антрацит і лише підземним способом. Досвід підземного видобутку в Україні вказує, що виймання вугілля здійснювалося з використанням механічної та гідравлічної розробки пластів. В залежності від кута падіння вугільних пластів відрізняються і технології їх механізованої розробки.

При розробці пологих та похилих вугільних пластів (до 35°) застосовують механізоване та індивідуальне кріплення з комбайновим або струговим вийманням, а в діапазоні 35 – 90° – молоткові лави і щитові агрегати.

Аналіз та узагальнення переваг і недоліків усіх технологій видобутку вугілля протягом промислового освоєння вугільних басейнів України надали можливість скласти порівняльну таблицю їх показників (табл. 1).

Отже найбільш поширеним в умовах сьогодення є виймання вугілля механізованими комплексами, проте капітальні витрати на модернізацію шахт, собівартість його вилучення та рівень безпеки ставлять під сумнів дану технологію. Вугільна промисловість вважається рентабельною, якщо дохід від реалізації вугілля перевищує собівартість не менше, ніж на 16% [4].

Таблиця 1  
Якісне порівняння показників технологій видобутку вугілля в Україні

Показники/ технології	Технологія виймання механізованими комплексами	Технологія виймання з індивідуальним кріпленням	Технологія виймання відбійними молотками	Технологія виймання щитовими агрегатами	Технологія бурошнекового виймання	Технологія підземного гідровидобутку
Капітальні витрати	значні	середні	незначні	середні	незначні	незначні
Потужність пластів, що розробляються, м	0.95 – 2.0	0.5 – 2.5	0.8 – 1.5	0.9 – 2.6	0.6 – 0.9	0.9 – 20.0
Експлуатаційні витрати, %	15 – 50				40 – 50	30 – 50
Кут падіння пласта, град	≤ 35	≤ 35	36 – 85	36 – 85	≤ 35	5 – 80
Собівартість вугілля	середня	висока	висока	висока	незначна	незначна
Безпека гірничих робіт	середня	незначна	незначна	незначна	висока	висока
Навантаження на очисний вибій	висока	незначна	незначна	незначна	середня	незначна
Трудоемність	середня	висока	висока	середня	незначна	незначна

Але якщо розглядати ефективність видобування вугілля комплексно, то необхідно також враховувати і транспортні витрати на переміщення вугілля в ланцюгу від видобутку до ТЕС (шахта – збагачувальна фабрика, збагачувальна фабрика – ТЕС), які також закладаються у тарифи вартості електроенергії. Підземний видобуток корисних копалин негативно впливає на навколишнє середовище, а саме порушує земну поверхню, призводить до затоплень територій і зміни гідрогеологічного режиму підземних вод, забруднює атмосферу викидами газу метану з шахтних стволів, сприяє накопиченню техногенних відходів та відчуженню земельних територій [5, 6]. Збагачення вугілля, у свою чергу, призводить до утворень шламонакопичувачів великої площі та забруднень ґрунту, а спалювання вугілля на ТЕС – до забруднень атмосферного повітря й накопичення парникових газів тощо.

На сьогодні вугільна галузь країни знаходиться у кризовому стані, що обумовлено рядом причин: застаріле та фізично зношене гірниче обладнання,

висока собівартість видобутку, відсутність суттєвих інвестицій у переоснащення виробництва, втрата кадрового потенціалу галузі внаслідок падіння престижності, недосконалість цінової і тарифної політики в залежності від енергетичної цінності вугільної продукції та непрозорості ринку [7]. В основному криза викликана наявністю в галузі великої кількості збиткових, малопродуктивних підприємств і відсутністю засобів для модернізації шахт, перспективних для інвестицій. За даними більшості експертів, надто збиткові шахти повинні бути закриті. Збитковість більшості державних шахт потребує значних обсягів фінансової підтримки з державного бюджету. Так, у 2013 році дотації склали 14,9 млрд грн, 2014 році – 14,0 млрд грн; 2015 році – 4,0 млрд грн; 2016 році – 3,6 млрд грн; 2017 році – 1,8 млрд грн. Зменшення фінансування пов'язано зі знаходженням більшості шахт на окупованих територіях. Тому очевидно, що перспективним є перерозподіл бюджетних коштів на фінансування проектів нетрадиційних технологій фізико-хімічного перетворення вугілля.

Так, при термохімічному перетворенні вугілля (наприклад ПГВ) теплотворна здатність газу при подачі атмосферного повітря становить 3,35 – 4,19 МДж/м<sup>3</sup>, який може бути використаний для енергетичних цілей (виробництво електроенергії, пари, гарячої води). Однак такий газ економічно недоцільно транспортувати на відстані більше 25 – 30 км, тому галузь його застосування різко звужується. Експериментально підтверджено, що газифікація вугільних пластів з підвищеним вмістом кисню сприяє зростанню температури в окислювальній зоні й більш повному реагуванню вуглецю вугілля. Теплота згорання газу досягає максимальних значень для бурого вугілля 6,5 – 6,7 МДж/м<sup>3</sup>, кам'яного вугілля 8,0 – 8,2 МДж/м<sup>3</sup> при концентрації кисню у дутті 65 – 70% в умовах звичайного тиску і 10,2 – 10,4 МДж/м<sup>3</sup> при підвищеному тиску [8].

Щодо економічної оцінки даної фізико-хімічної технології перетворення вугілля, японськими експертами зроблено порівняння економічних розрахунків показників технології ПГВ, отриманих у результаті проведених досліджень американських і російських вчених [9]. Так, для підприємств ПГВ з отриманням сирого газу (синтез-газу для виробництва заміни природного газу) з теплою згорання 11,3 МДж/м<sup>3</sup> (2700 ккал/м<sup>3</sup>) собівартість газоподібного енергоносія склала: в американських проектах – 0,029 – 0,045 дол. США/МДж (7 – 11 дол./Гкал); у російських – 0,023 дол. США/МДж (5,5 дол./Гкал). Суттєвою перевагою технології є значно менші капітальні вкладення на будівництво станцій ПГВ у порівнянні з будівництвом нових шахт, блоків тощо.

Реалізація проектів щодо переведення реструктуризованих шахт у розряд газовидобувних надасть можливість зменшити бюджетні витрати на закриття неперспективних підприємств приблизно на 50 – 60% і знизити соціальне навантаження при закритті шахт, створюючи додатково 40 – 50 робочих місць на одну позицію [10].

Всі ці аспекти вказують на те, що необхідний суттєво новий підхід до технологій розробки родовищ енергоресурсів та виробництва електроенергії без-

посередньо на місці їх залягання в замкнутому екологічно безпечному циклі. Одним з підходів може бути закриття неперспективних шахт та перерозподіл державних коштів для фінансування нових проектів технологій нетрадиційного видобутку вуглецевої сировини.

**Інноваційні аспекти нетрадиційних технологій видобутку твердого палива.** В умовах сьогодення перехід до розробки запасів газовугільних родовищ нетрадиційними технологіями видобутку та переробки підсилює конкуренцію вугілля серед енергоресурсних потоків на глобальному та регіональному рівнях. Серед нетрадиційних технологій переробки запасів вугілля найбільше поширення отримали гідрогенізація, екстракція, підземна газифікація, підземне спалювання, коксування та напівкоксування.

Групою дослідників на базі виконаних науково-експериментальних робіт розроблено інноваційні технологічні рішення, що пов'язані із забезпеченням ефективності й економічності застосування даних технологій. Необхідно відмітити, що тільки підземна газифікація та підземне спалювання забезпечують термічну переробку вугілля на місці його залягання. Всі інші процеси термічного перетворення вугілля вимагають проведення першочергових операцій з його підготовки, а саме: виймання, сушіння, подрібнення тощо. Це обумовлено технічними особливостями виконання наземних газогенераторів або спеціально обладнаних установок [11].

Серед процесів комплексної переробки вугілля, за обсягами виробництва і різноманітністю виробленої продукції, коксування та напівкоксування займають одне з провідних місць. Продукти напівкоксування – горючий газ, – використовується як паливо з високою теплою згоряння й сировина для органічного синтезу-газу; смола – джерело отримання моторних палив, розчинників і мономерів; напівкокс використовується як паливо та добавка до шихти для коксування [12].

Одним з ефективних способів отримання тепла та/або електроенергії є підземне спалювання вугілля. Суть технології полягає у керованому та економічно-ефективному підземному спалюванні вугілля, перевага надається вугільним ціликам відпрацьованих шахт, тонким і високозольним некондиційним пластам з метою отримання теплової та/або електричної енергії безпосередньо на місці розробки. При підземному спалюванні вугілля не виникає потреби проводити відбір продуктів газифікації та їх транспортування, що дозволяє значно спростити технологічну схему термохімічного перетворення вугілля на місці його залягання [13].

Автори статті, проаналізувавши наявні способи термохімічного перетворення твердих видів органічного палива (зокрема кам'яного вугілля), встановили, що сьогодні одним із найперспективніших та найефективніших технологічних рішень з переробки вугілля на місці його залягання є підземна газифікація. Формування напряму розвитку нетрадиційних технологій передбачає усестороннє використання отриманого енергетичного та хімічного потенціалу, що до-

звояє зорієнтувати роботу станції з газифікації на необхідний кінцевий продукт.

Основним енергетичним продуктом при газифікації вугілля є генераторний газ. Збалансованість концентрацій горючих газів у ньому залежить від технології подачі дуттьової суміші у газогенератор і концентрації у ній реагентів дуття. Аналітичними та лабораторними дослідженнями [14] встановлено основні показники процесу газифікації залежно від типу дуттьової суміші. На рисунку 2 наведено середні показники виходу газів залежно від типу дуттьової суміші, що безпосередньо спрямовується на «дзеркало» вогневого вибою.

Зміна концентрації горючих газів напряму пов'язана з підвищенням інтенсивності процесу газифікації, яка відбувається за умови рівності концентрацій кисню та вуглецю у реакційному каналі підземного газогенератора. Швидкість газифікації зумовлюється інтенсивністю протікання хімічних реакцій за площиною вогневого вибою, підведенням кисню на нього й відведенням продуктів газифікації. Це забезпечує стабільне протікання процесу газифікації й збереження умов параметризації між відновною та окислювальною зонами підземного газогенератора [8].

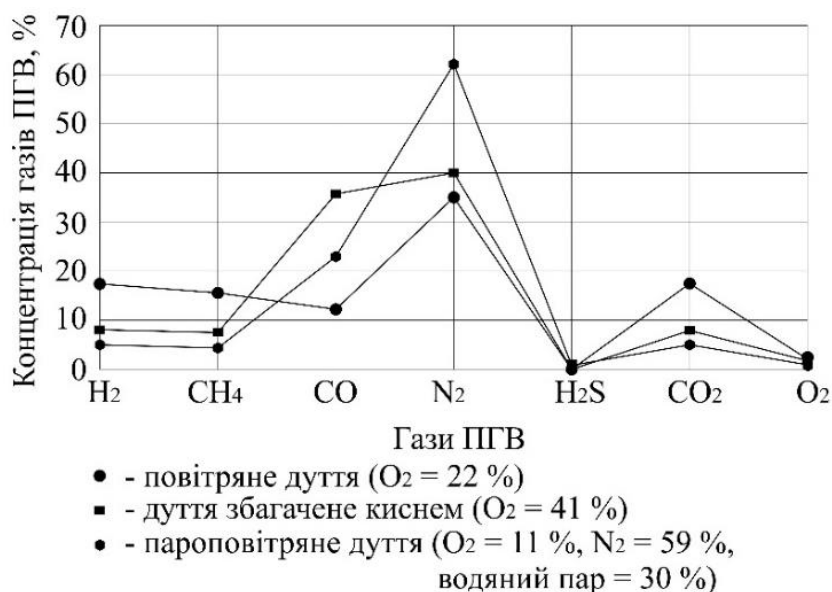


Рис. 2. Графік зміни концентрації генераторних газів залежно від типу дуттьової суміші

Дослідженнями встановлено, що середня теплота згоряння генераторного газу при повітряному дутті не перевищує 5,0 МДж, при дутті збагаченому киснем (22 – 41%) – максимум теплоти наближається до 7,8 МДж. Максимальна теплота згоряння генераторного газу склала майже 8,9 МДж при подачі дуття, збагаченого киснем та паром (пара = 0 – 30%). Це пояснюється тим, що газоподібні продукти первинних реакцій вступають у реакцію з вуглецем палива, кис-

нем водяною парою та між собою і формують так звані вторинні реакції. Найважливішою вторинною реакцією газифікації є гетерогенна реакція відновлення  $\text{CO}_2$  в  $\text{CO}$  ( $\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO} \pm q$ ,  $q$  – теплова енергія, що утворюється у процесі реакції). Ця реакція є вирішальною і визначає кількість одержуваного газу та його теплоту згоряння [15].

Отримання генераторного газу є одним із складових процесів комплексної розробки газовугільних родовищ. Його використання вимагає конкретних технологічних рішень та технічних засобів щодо подальшого залучення у енергетичний баланс. Станція із газифікації вугілля у своєму технічному забезпеченні має низку енергогенеруючих об'єктів. Для їх безперебійної роботи вводяться два незалежні джерела живлення, одне з яких є зовнішнім, інше – внутрішнім. До зовнішнього джерела відносяться високовольтні лінії електропередач. Робота внутрішнього джерела живлення побудована на основі когенераційної системи, яка дозволяє залучати частку генераторного газу для власного енергозабезпечення.

Важливим чинником при виборі способу транспортування генераторного газу є його ефективність. Транспортування можна проводити за декількома варіантами: магістральними газопроводами; транспортними засобами у зрідженому або стисненому станах; у формі газогідратних блоків.

Прокладання системи магістральних трубопроводів є трудоемним процесом, а їх експлуатація вимагає проведення постійного моніторингу стану трубопроводів. Крім цього газ потрібно не лише очищувати від шкідливих домішок, а й по всій довжині трубопроводів додатково компримувати за допомогою потужних компресорних станцій.

При транспортуванні газу у зрідженому стані його, перш за все, необхідно перевести у рідкий стан, а потім проводити транспортування у спеціально обладнаному транспорті при низьких температурах з подальшою регазифікацією. Недоліком технології зрідження є необхідність створення високовартісної інфраструктури зі зрідження та регазифікації.

Особливість технології транспортування газу у стисненому стані передбачає його попереднє компримування з подальшим транспортуванням у ємностях під високим тиском (до 20 МПа).

Основні фізичні властивості газових сумішей наведено у таблиці 2.

З аналізу даних Таблиці 2 випливає, що газові гідрати можуть транспортуватися при більш високій температурі, ніж зріджений газ. Це дозволяє стверджувати про економічність такого способу перевезення. Також можна виділити і наступні переваги: капітальні та експлуатаційні витрати, енергоємність, викиди парникових газів при формуванні й транспортуванні, і, найголовніше, безпеку перевезення газу, оскільки можливість раптового вибуху зводиться до нуля.



## Порівняння фізичних властивостей газових сумішей

Характеристика	Газові гідрати	Зріджений газ	Стиснений газ
Стан	твердий	рідкий	газоподібний
Вміст газу в 1 м <sup>3</sup> , м <sup>3</sup>	145,00 – 200,00	600,00 – 620,00	250,00 – 300,00
Тиск, МПа	0,10	4,50	16,00 – 20,00
Температура, °С	-5...-20	-162	0
Питома вага, кг/м <sup>3</sup>	850,00 – 950,00	420,00 – 470,00	0,60 – 0,70

Щодо транспортування газу у газогідратній формі, то на сьогодні розглядається кілька схожих концепцій. Найбільш привабливою є технологія його транспортування за нерівноважних умов (незначна від'ємна температура та атмосферний тиск). Дана технологія потребує виробництва газогідрату у максимально стабільних умовах. Згідно [16] газогідрат пропонується транспортувати у формі гранул.

Однак з часом гранули змерзаються у моноліт, що ускладнює процес їх розвантаження [17]. Також гранульований газогідрат лише на 78% заповнює об'єм транспортних засобів чи сховищ [18]. Крім того, значна площа поверхні гранул і система відкритих каналів між гранулами стимулюють процес об'ємної дисоціації газогідратної маси. Підтримання їх стабільності за атмосферного тиску потребує додаткових витрат на охолодження до температури нижче 258 К. Найбільш перспективним варіантом транспортування гідратів, на думку авторів роботи, є формування з газу монолітних блоків великого розміру [19, 20].

Визначення актуальності та інноваційності напрямів наукових досліджень з газифікації вугілля та можливостей транспортування газу у вигляді газових гідратів є складним завданням, вирішення якого вимагає скрупульозного підходу з урахуванням великої кількості факторів. В даному підрозділі автори використали сучасний, з точки зору адекватності оцінювання, підхід, який заключається у кількісному порівняльному аналізі публікацій передових наукометричних баз даних Scopus від Elsevier та Web of Science від Clarivate Analytics.

В якості методологічного підходу авторами визначено ключовий напрям досліджень у гірництві та сучасні альтернативні напрями отримання енергетичних продуктів. Найбільш повно, на думку авторів, традиційну технологію видобування вугілля підземним способом у науковій літературі визначають слова (терміни) «*underground, coal, mining*», які зустрічаються у поєднанні один з одним або роздільно в назвах статей та/або абстрактах. Для альтернативних технологій пошук проводився по словам «*coal, gasification*» та «*gas hydrate*». Часові рамки (останні 50 років) за даним підходом обрано із урахуванням наповненості наукометричних баз даних. Запропонований підхід є простим для використання у будь-яких напрямках досліджень, проте важливим залишається об'єктивна оцінка інтерпретації отриманих даних. Результати пошуку кількості літературних джерел за вищенаведеним алгоритмом наведено на рисунку 3.

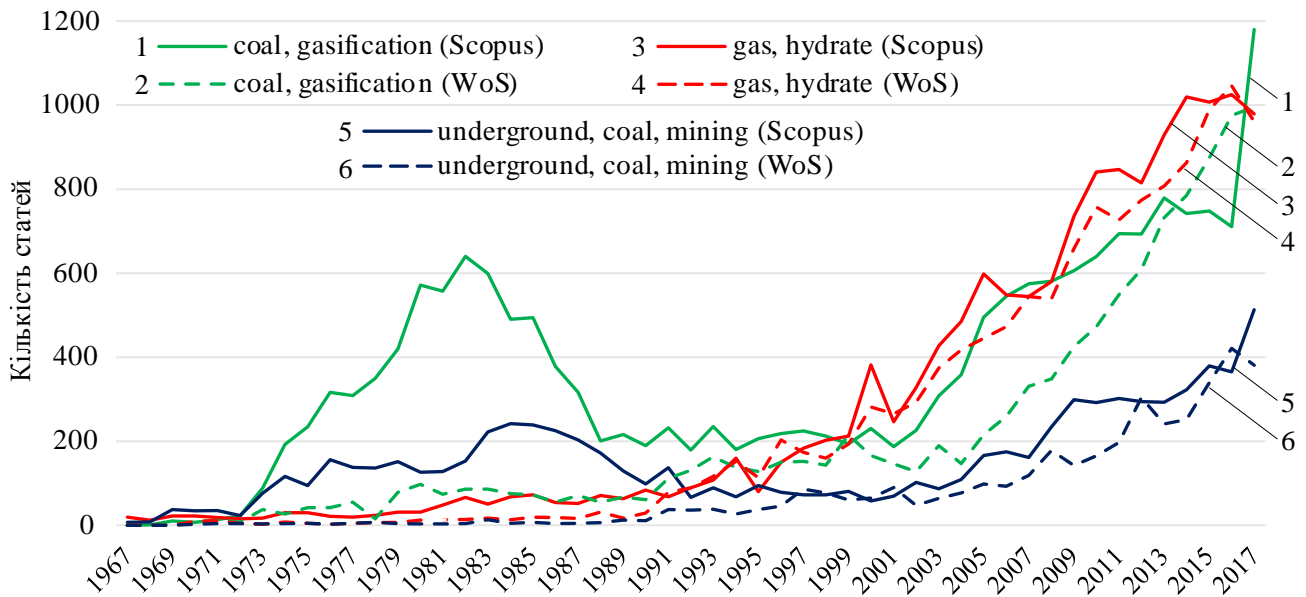


Рис. 3. Розподіл кількості публікацій перспективних напрямів досліджень за роками по базах даних Scopus та Web of Science

Як видно з рисунку 3, у 1973 році різко збільшилася кількість публікацій за напрямом газифікації вугілля, що зумовлено пошуком міжнародною науковою спільнотою нових джерел енергії внаслідок нафтової кризи 1983 року. Тогочасний пік зацікавленості до процесу підземної газифікації тривав до 1985 року, допоки не стабілізувалися ціни на нафтові продукти.

Стрімке превалювання публікацій за останні роки з напрямів газифікації вугілля та газогідратних технологій свідчить про значну зацікавленість та перспективність розвитку даних технологій у контексті сучасного сталого розвитку домінуючих технологій отримання альтернативних джерел енергії. У зв'язку з цим автори роботи в подальшому акцентують увагу на найбільш перспективних технологіях, відсовуючи традиційну технологію підземного видобування вугілля на другий план як «морально застарілу» та таку, що не може у повній мірі забезпечити потреби суспільства.

Остатні 5 років Національний гірничий університет по праву є лідером в області обґрунтування технологічних схем та розробки параметрів ПГВ в Україні. Його співробітниками виконано низку науково-дослідних проектів з обґрунтування технічних та технологічних параметрів енергохімічного комплексу на базі свердловинної ПГВ, вдосконалено та розроблено технологічні рішення щодо транспортування отриманого генераторного газу у процесі газифікації [21, 22]. Сьогодні вже постало питання перенесення та впровадження отриманих результатів в умови реальних газовугільних підприємств.

**Запропонована технологічна схема конверсії твердого палива.** Досвід у галузі підземної та наземної газифікації вугілля свідчить про можливість технологічних і технічних рішень з реалізації отримання енергетичних та хімічних

продуктів. На наведеній схемі (рис. 4) представлено запропоноване технологічне виконання станції з газифікації вугілля. Дана схема передбачає комплексне використання отриманих енергетичних та хімічних продуктів при газифікації запасів вугілля на місці їх залягання.

Комплектність системного виконання станції сприяє залученню у її роботу попутного потенціалу генераторного газу. Використання фізичного тепла газу можливо за декількома варіантами. Найбільш поширеним є система утилізаційних котлів-рекуператорів. Результатом процесу утилізації тепла при цій системі є водяна пара. Дана пара нагріває холодну воду задля забезпечення адміністративно-побутових та промислових приміщень станції з газифікації вугілля гарячою водою. Отримання водяної пари передбачає введення в технологічну схему газифікації рекуператора тепла (11), який монтується на трубопроводі газовідвідної свердловини (6) на промисловій площадці станції.

Як було зазначено раніше, основним енергетичним продуктом є генераторний газ. Після проходження ним рекуператора тепла (11) газ направляється на комплекс з очистки та переробки (12). Він проходить повний цикл очистки від зольних залишків і смол з наступним розподілом на горючі гази – CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Для розділення газів свердловинної підземної газифікації вугільних пластів можуть використовуватися мембранні промислові установки, які пропускають крізь себе великі об'єми промислових газів. Процес розділення сумішей мембранним методом відбувається в потоці речовини, що рухається вздовж розділеної мембрани. Вихідна газова суміш втрачає відокремлені частинки (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S і N<sub>2</sub>), що проходять через пористу роздільну мембрану. При цьому відбувається збільшення концентрації газів (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> та O<sub>2</sub>), що залишаються в потоці. Ступінь розділення і продуктивність мембранної установки залежать від матеріалу та структури мембрани, а також від конструкції та технічного забезпечення пристроїв і апаратів, що використовуються в кожному конкретному випадку. Необхідно зазначити, що ефективна робота мембранних елементів і модулів неможлива без попередньої обробки газової суміші перед подачею її безпосередньо на мембранну установку очищення.

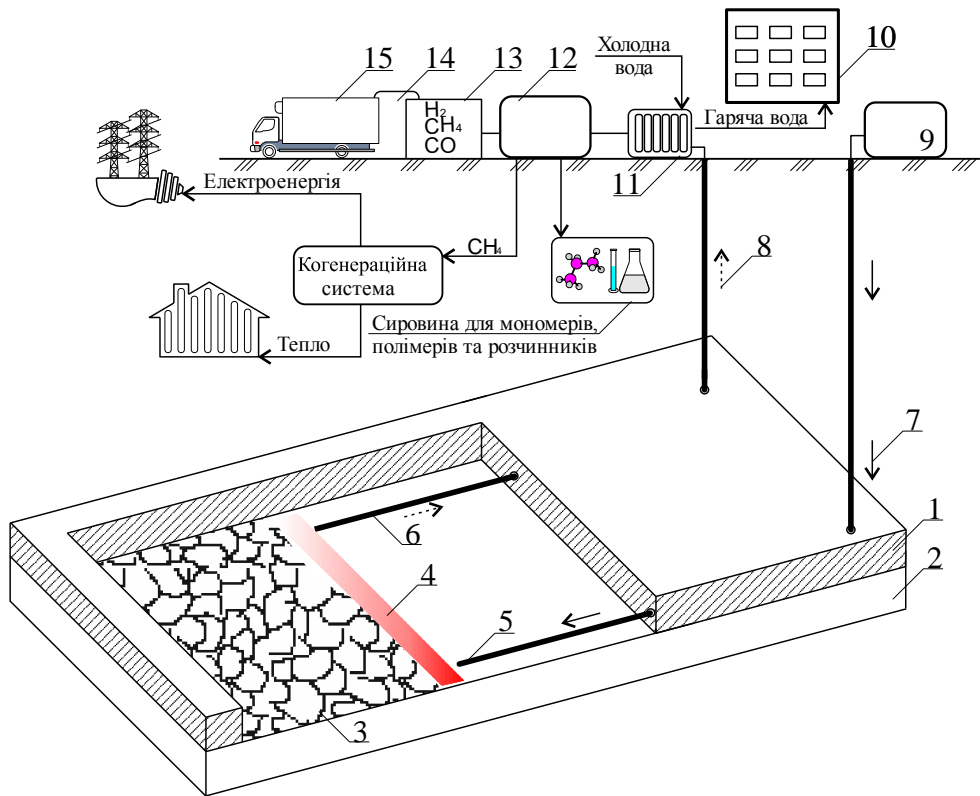


Рис. 4. Технологічна схема отримання енергетичних та хімічних продуктів на базі підземної газифікації вугілля: 1 – вугільний пласт; 2 – безпосередня підшва вугільного пласта; 3 – вигазований простір; 4 – вогневий вибій; 5 – дуттьова свердловина; 6 – газовідвідна свердловина; 7 – напрям руху дуттьової суміші; 8 – напрям руху генераторного газу; 9 – комплекс з подачі та приготування дуттьової суміші; 10 – адміністративно-побутове приміщення; 11 – рекуператор тепла; 12 – комплекс з очистки та переробки генераторного газу; 13 – комплекс з гідратуутворення; 14 – завантажувальний бокс; 15 – рефрижератор

Після процесу очищення газ метан у достатній кількості направляється на когенераційну систему. Дана система забезпечує комбіноване виробництво теплової й електричної енергії. Комплексний підхід, надійність, продуктивність та універсальність когенераційних систем сприяють їх широкому застосуванню від невеликих житлових будинків до промислових об'єктів. Перетворення теплогенеруючих потужностей в когенераційні системи дозволяє практично повністю забезпечити прилеглий до станції житловий масив та саму станцію власною електроенергією.

За даними [23], ефективність когенераційних систем можна оцінити за чотирма основними чинниками, які є складовою частиною енергетичного аудиту:

– енергетичний (електричний та тепловий ККД, ККД використання палива);

- економічний (собівартість теплової та електричної енергії, термін окупності);
- технологічний (надійність, продуктивність);
- екологічний (рівень шуму та вібрації, норми по викидам шкідливих газів).

Спалювання палива ( $\text{CH}_4$ ) в когенераційному циклі призводить до суттєвого зменшення викидів парникових газів у традиційних енерготехнологіях. Таким чином, когенераційні технології із засобів вирішення регіональних енергетичних проблем переростають в елемент енергозбереження у вугільній галузі.

Частка газу, яка не бере участі у процесах роботи когенераційної системи, направляється на комплекс гідратуутворення, в якому під дією заданих термобаричних умов ( $P = 6 - 8$  МПа,  $T = 274 - 276$  К) відбувається процес формування гідратних блоків. Авторами роботи, згідно розробленої технологічної схеми (Рис. 4), транспортування газогідратних блоків пропонується здійснювати автомобільними рефрижераторами до газосховищ або газорозподільчих пунктів.

Отримані хімічні продукти при газифікації вугілля можуть відпускатися хімічними та нафтохімічними підприємствами як сировина (кам'яновугільна смола, бензол, аміачна вода, феноли, олефіни, ацетилен, піридинові основи) або перероблятися на місці – технічні гіпосульфіти, поверхнево-активні речовини, барвники, сажі, полімери тощо. Серед хімічних речовин необхідно відмітити групу фенолів та аміаку, що знаходяться в газовому конденсаті. Це дозволяє використовувати їх як мінеральне азотне добриво.

#### **Висновки.**

1. Існуюче на сьогодні гірничодобувне обладнання та технології підземного видобутку не вирішують питання ефективного виймання вугільних пластів потужністю менше 0,7 м, що призводить до суттєвих втрат вугілля у надрах, крім того, в межах шахтних полів закритих гірничих підприємств залишилась суттєва частина запасів. Альтернативним варіантом використання енергоресурсів цих запасів вугілля є їх фізико-хімічне перетворення зі зміною агрегатного стану з можливістю отримання цінних хімічних та енергетичних продуктів, здатних замінити частину природного газу, що імпортується із закордону.

2. У зв'язку із кризовою ситуацією у вугільній галузі України пропонується при реструктуризації вугільних підприємств перерозподіляти бюджетні кошти для інвестування проектів нетрадиційних технологій фізико-хімічного перетворення вугілля, зокрема створення енергогенеруючих підприємств на місці залягання запасів способом ПГВ.

3. Проведені дослідження щодо аналізу світового рівня зацікавленості протягом останніх 50 років до технологій газифікації та гідратуутворення підтверджують доцільність розвитку наукових досліджень у даному напрямі в Україні.

4. Розробка технологічних і технічних рішень щодо відпрацювання запасів вугілля технологією підземної газифікації є одним із перспективних напрямів формування власної енергетичної концепції з підвищення енергогенеруючого потенціалу гірничодобувних регіонів. Створення комплексів з газифікації, когенерації та гідра-

тоутворення на території вугільних шахт дозволить на місці залягання переробляти запаси вугілля з отриманням енергетичної та теплової енергій і хімічної сировини, виходячи з кон'юнктури енергетичного та хімічного ринків.

**Вдячність.** Представлені результати отримані у рамках виконання науково-дослідної роботи ГП-487 «Наукове обґрунтування та розробка енергоефективних маловідходних технологій видобування вуглеводневої та мінеральної сировини» (№ держреєстрації 0116U008041).

### Перелік посилань

1. Snihur, V., Malashkevych, D., & Vvedenska, T. (2016). Tendencies of coal industry development in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 10(2), 1-8.  
doi:10.15407/mining10.02.001
2. Бузило, В.И., Кошка, А.Г., Сердюк, В.П., Сулаев, В.И., Яворский, А.В., & Яворская, Е.А. (2012). *Технология селективной отработки тонких угольных пластов*. Днепропетровск: Национальный горный университет.
3. Рудько, Г.І., Литвинюк, С.Ф., & Ловинюков, В.І. (2016). Геолого-економічна оцінка вугільних родовищ України. *Мінеральні ресурси України*, (2), 23-28.
4. Петенко, И.В., & Майдукова, С.С. (2014). Проблемы рентабельности угольной продукции. *Уголь Украины*, (10), 18-27.
5. Кузьменко, А.М., Петлєваний, М.В., & Усатый, В.Ю. (2015). *Твердеючая закладка при отработке рудных крутых залежей в сложных горно-геологических условиях*. Днепропетровск: Национальный горный университет.
6. Петлєваний, М.В., & Лащенко, Я.А. (2015). Екологічні та технологічні аспекти оставлення шахтних порід в підземному просторі. В *Матеріалах науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Наукова весна»* (с. 21-22). Дніпропетровськ: Національний гірничий університет.
7. Про схвалення Концепції реформування та розвитку вугільної промисловості на період до 2020 року. Режим доступу [http://search.ligazakon.ua/l\\_doc2.nsf/link1/KR170733.html](http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/KR170733.html)
8. Falshtynskyi, V.S., Dychkovskyi, R.O., Lozynskyi, V.G., & Saik, P.B. (2013). Determination of the technological parameters of borehole underground coal gasification for thin coal seams. *Journal of Sustainable Mining*, 12(3), 8-16.  
doi:10.7424/jsm130302
9. Shimada, S., Ohga, K., Tamari, A., & Ishii, E. (1996). Cost estimation of underground coal gasification in Japan. *Mineral Resources Engineering*, 5(03), 241-252.
10. Перов, М.О., Макаров, В.М., Новицький, І.Ю., & Жуков, О.П. (2012). Наукові основи та інформаційні засоби прогнозування науково-технічного прогресу в енергетиці. *Проблеми загальної енергетики*, 2(29), 58-64.
11. Falshtynskyi, V., Dychkovskyi, R., Saik, P., & Lozynskyi, V. (2014). Some aspects of technological processes control of an in-situ gasifier during coal seam gasification. *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 109-112.  
doi:10.1201/b17547-20
12. Бутузова, Л.Ф., Шевкопляс, В.М., Сафін, В.О., Налівкіна, А.О., Кулакова, В.О., Ошовський, В.В., & Бутузов, Г.М. (2014). Можливості оптимізації стандартного процесу напівкоксування низькометаморфізованого вугілля. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімічна і хімічна технологія*, 1(22), 174-183.

13. Жолудев, С.В. (2011). Підземні газифікація та спалювання бурого вугілля з використанням підземних вод. Вісник Дніпропетровського університету. *Геологія, географія*, 19(32), 91-96.
14. Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., Lozynskiy, V., & Saik, P. (2015). Analytical, laboratory and bench test researches of underground coal gasification technology in National Mining University. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 97-106.  
doi:10.1201/b19901-19
15. Tabachenko, M., Saik, P., Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., & Dychkovskiy, R. (2016). Features of setting up a complex, combined and zero-waste gasifier plant. *Mining of Mineral Deposits*, 10(3), 37-45.  
doi:10.15407/mining10.03.037
16. Gudmundsson, J.S. (1996). *Method for production of gas hydrates for transportation and storage*. U.S. Patent No. 5,536,893. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
17. Dawe, R. A. (2003). Hydrate technology for transporting natural gas. *Engineering Journal of the University of Qatar*, (16), 11-18.
18. Gudmundsson, J.S., & Graff, O.F. (2003). Hydrate non-pipeline technology for transport of natural gas. In *22nd World Gas Conference*, (4).
19. Sai, K.S., & Ganushevych, K.A. (2014). Utilization of mine methane and their transportation in gas hydrates state. *Mining of Mineral Deposits*, 8(3), 299-307.  
doi:10.15407/mining08.03.299
20. Овчинников, М.П., Ганушевич, К.А., & Сай, К.С. (2014). Утилізація шахтного метану дегазаційних свердловин та його транспортування у твердому стані. *Геотехнічна механіка*, (115), 131-140.
21. Dychkovskiy, R., Falshtynskiy, V., Lozynskiy, V., & Saik, P. (2015). Development the concept of borehole underground coal gasification technology in Ukraine. *New Developments in Mining Engineering 2015*, 91-95.  
doi:10.1201/b19901-18
22. Lozynskiy, V., Saik, P., Petlovanyi, M., Sai, K., & Malanchuk, Y. (2018). Analytical research of the stress-deformed state in the rock massif around faulting. *International Journal of Engineering Research in Africa*, (35), 77-88.  
doi:10.4028/www.scientific.net/jera.35.77
23. Басок, Б.И., Базеев, Е.Т., Диденко, В.М., & Коломейко, Д.А. (2006). Анализ когенерационных установок. Часть I. Классификация и основные показатели. *Промышленная теплотехника*, 3(28), 83-89

## АННОТАЦИЯ

**Цель.** Формирование нового современного подхода к рациональному освоению энергетических ресурсов оставленных и некондиционных запасов угля термическим превращением на месте их залегания с получением комплекса ценных промышленных продуктов.

**Методика исследований.** Для достижения поставленной цели в работе использован комплексный подход, включающий: научно-технический анализ эффективности существующих технологий добычи угля, анализа мирового уровня заинтересованности к технологиям газификации и гидратообразования в ведущих научных журналах, которые внесены в наукометрические базы данных Scopus и Web of Science с помощью «Data Search»; инженерно-конструкторское исполнение новой технологической схемы термохимического превращения угля путем подземной газификации.

**Результаты исследования.** Освещены актуальные вопросы низкой эффективности технологий подземной добычи угля из тонких и весьма тонких пластов и проблемы оставленных запасов в шахтных полях закрытых горных предприятий. Установлено, что выемка угля осуществляется в основном механизированными комплексами, однако капитальные затраты на модернизацию шахт, себестоимость его извлечения и уровень безопасности в современных условиях ставят под сомнение эффективность этих технологий. Выявлено, что стремительное превалирование публикаций в течение 50 лет по направлениям газификации угля и газо-гидратных технологий свидетельствует о значительной заинтересованности и перспективности развития данных технологий в контексте современного устойчивого развития доминирующих технологий получения альтернативных источников энергии. Предложено инновационную технологическую схему конверсии твердого топлива, предусматривающую комплексное использование полученных энергетических и химических продуктов при газификации запасов угля на месте их залегания.

**Научная новизна.** Создан инновационный подход к рациональному освоению энергетических ресурсов оставленных и некондиционных запасов угля на основе функционирования «трехкомпонентной системы» – подземного газогенератора, рекуператора тепла и когенерационной установки.

**Практическое значение.** Создание комплексов по газификации, когенерации и гидратообразования на территории угольных шахт позволит на месте залегания перерабатывать запасы угля с получением тепловой энергии, энергетического и химического сырья, исходя из конъюнктуры энергетического и химического рынков.

**Ключевые слова:** запасы угля, технологии добычи, подземная газификация, конверсия твердого топлива, data search, технологическая схема, генераторный газ

#### ABSTRACT

**Purpose.** Formation of a new modern approach to the rational development of energy resources of residual and non-commercial coal reserves by thermochemical conversion in-situ by obtaining a complex of valuable industrial products.

**Methods.** In order to achieve this goal, an integrated approach has been used, including a scientific and technical analysis of the existing coal mining technologies, the global interest in gasification technologies and hydrate formation in leading scientific journals introduced into Scopus; and Web of Science databases using the “Data Search” option; engineering design of a new technological scheme for thermal coal processing due to underground coal gasification.

**Findings.** The actual issues of low efficiency of underground coal mining technologies from thin and ultra-thin coal seams and problems of residual coal seams in mine fields of closed mining enterprises are highlighted. It has been established that extraction of coal is carried out mostly by mechanized complexes, but the capital costs for mine modernization, cost of its extraction and the level of safety from modern conditions promote additional questions for efficiency of these technologies. It has been revealed that the rapid prevalence of publications over the course of 50 years in the areas of coal gasification and gas-hydrated technologies indicates a significant interest and perspective on the development of these technologies in the context of the modern sustainable development of dominant technologies for obtaining alternative energy sources. The innovative technological scheme of conversion of solid fuel is proposed, which involves the complex use of the obtained energy and chemical products during in-situ coal gasification.



**Originality.** An innovative approach to the rational development of energy resources of residual and non-commercial coal reserves is created based on the functioning of a “three-component system” – an underground gasifier, a heat recuperator and a cogeneration unit.

**Practical implications.** Creation of gasification, cogeneration and hydration complexes on the territory of coal mines will enable to convert coal reserves in-situ with heat energy reception as well as energy and chemical raw materials, based on the state of the energy and chemical markets.

**Keywords:** *coal reserves, extraction technologies, underground gasification, solid conversion, data search, flowsheet, generator gas*