

© П.Б. Саїк¹, В.Г. Лозинський¹, Д.С. Малашкевич¹, О.В. Черняєва¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро Україна

ДО ПИТАННЯ ПІДЗЕМНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ МАЛОПОТУЖНИХ НЕКОНДИЦІЙНИХ ЗАПАСІВ ВУГІЛЛЯ

© P. Saik¹, V. Lozynskyi¹, D. Malachkevych¹, O. Cherniaieva¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

TO THE ISSUE OF UNDERGROUND GASIFICATION OF LOW-THICKNESS UNCONDITIONED COAL RESERVES

Мета. Формування інноваційного підходу при раціональному освоєнні малопотужних некондиційних запасів вугілля з встановленням їх придатності до технології підземної газифікації та дослідженням матеріально-теплових показників процесу газифікації на прикладі шахти ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» ім. Героїв Космосу.

Методика досліджень. Можливість впровадження технології підземної газифікації на місці його залягання ґрунтувалось на основі проведення аналітичних досліджень. На основі розробленої професором кафедри гірничої інженерії та освіти НТУ «Дніпровська політехніка» Дичковським Р.О. «Методики оцінки придатності запасів до підземної газифікації вугілля» встановлено загальний коефіцієнт придатності запасів вугілля до газифікації, що залягають у межах шахтного поля ім. Героїв Космосу і є перспективними до майбутнього освоєння. Параметри виходу горючих та баластних генераторних газів, хімічний та енергетичний ККД процесу газифікації досліджувалися за допомогою використання програмного забезпечення «МТБ СПГВ», що пройшло промислову апробацію як при проведенні лабораторних, так і полігонних досліджень.

Результати дослідження. Висвітлено актуальні питання щодо застосування комбінації технологій розробки малопотужних некондиційних запасів вугілля, які дозволяють суттєво продовжити термін роботи гірничого підприємства. Зокрема, після відпрацювання продуктивних площ запасів вугілля орієнтація видобутку спрямована на переробку запасів на місці їх залягання технологією підземної газифікації. Встановлені критерії придатності запасів вугілля, що дозволили встановити першочерговість відпрацювання вугільних пластів. На основі зміни параметрів дуттьової суміші досліджено вихід горючих та баластних генераторних газів.

Наукова новизна. Встановлено, що при подачі у підземний газогенератор повітряного та збагаченого киснем дуття об'єм виходу горючих генераторних газів залишається однаковим, відмінність полягає у концентрації даних газів у вихідній суміші. Це обумовлюється великим вмістом азоту при повітряному дутті, який не вступає у хімічну реакцію з вугіллям, а при температурах у реакційному каналі нижче 900°C вихід СО знижується на 25 – 46%.

Практичне значення. Для умов шахти ім. Героїв Космосу визначено критерії придатності вугілля до газифікації. Два вугільних пласти шахти с₁₂ та с₇^В знаходяться в умовах достатньої придатності для підземної газифікації вугілля.

Ключові слова: підземна газифікація вугілля, критерії придатності, вугільний пласт, генераторний газ.

Вступ. У сучасних умовах із постійним зростанням виробництва та енергоспоживання актуальності набувають питання, пов'язані з перспективним та стабільним розвитком паливно-енергетичного комплексу. Паливно-енергетичний

комплекс (ПЕК) в Україні представлений підприємствами електроенергетики, вугледобувної, паливної та нафтопереробної промисловості. Відповідно до напрямів розвитку ПЕК України на період до 2030 року до пріоритетів стратегічного розвитку вугільної промисловості відносять [1]: стабілізацію і подальший розвиток вугільної галузі для задоволення потреб економіки країни та населення у вугіллі власного виробництва; розвиток шахтного фонду на сучасній технологічній основі; створення ринкових механізмів та стимулів для підвищення ефективності вугільних підприємств; економічно виправдане збереження наявного виробничого потенціалу галузі; створення умов для залучення у розвиток галузі інвестицій; структурні перетворення у галузі за рахунок чіткого розмежування функцій між суб'єктами управління на всіх рівнях; підвищення безпеки праці та соціального захисту працівників галузі та екологічної безпеки.

Для забезпечення стійких умов функціонування та розвитку вугільної промисловості необхідно впроваджувати ресурсозберігаючі технології видобутку запасів вугілля. Наприклад, впровадження технології селективного відпрацювання, яка передбачає роздільне виймання вугільних пластів і бічних порід, що присікаються, замість їх валового (спільного) виймання, дозволяє підвищити якість видобутого вугілля, вже в процесі його видобутку і залишити порожні пусті в шахті, а не транспортувати і складувати їх на поверхні [2]. Впровадження даного технологічного рішення значно збільшує тривалість виймального циклу через додатковий зворотний прохід комбайна з виймання породи та наступного відділення вугілля від породи при необхідному використанні додаткового обладнання. При цьому значна частина запасів вугільних шахт знаходиться у надтонких вугільних пластах, селективне відпрацювання яких є економічно недоцільним.

В Україні використовуються три основні способи механізованого видобутку вугілля: комбайновий, струговий та бурошнековий. Вони дають можливість найбільш повно механізувати усі технологічні процеси, пов'язані з вийманням, транспортуванням вугілля та керуванням станом гірського масиву. До геотехнологічних способів видобутку вугілля відносяться газифікація, гідрогенізація, екстракція, коксування чи напівкоксування. При цьому вони можуть виконуватися як у підземних умовах, так і на поверхні шахт, при попередньому видобуванні вугілля механізованими способами.

На сучасному етапі розвитку високоефективних технологій у гірничодобувній та переробній галузях основна перевага повинна надаватись технологіям термохімічної деструкції [3, 4]. Так, запаси вугілля, що знаходяться у пластах, які недоступні звичайним методам експлуатації, можуть бути перетворені на синтетичний газ в підземних умовах, а вже отриманий синтетичний газ може перероблятися електростанціями або хімічною промисловістю.

При обґрунтуванні параметрів технології підземної газифікації малопотужних некондиційних запасів вугілля, перш за все, є встановлення критеріїв доцільності їх впровадження. Ці критерії ґрунтуються на даних щодо гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов залягання зазначених запасів. Проте аналізувати та систематизувати сукупності факторів залягання запасів і технології їх відпрацювання необхідно для конкретних вугільних площ, а не для вугільного родовища у цілому.

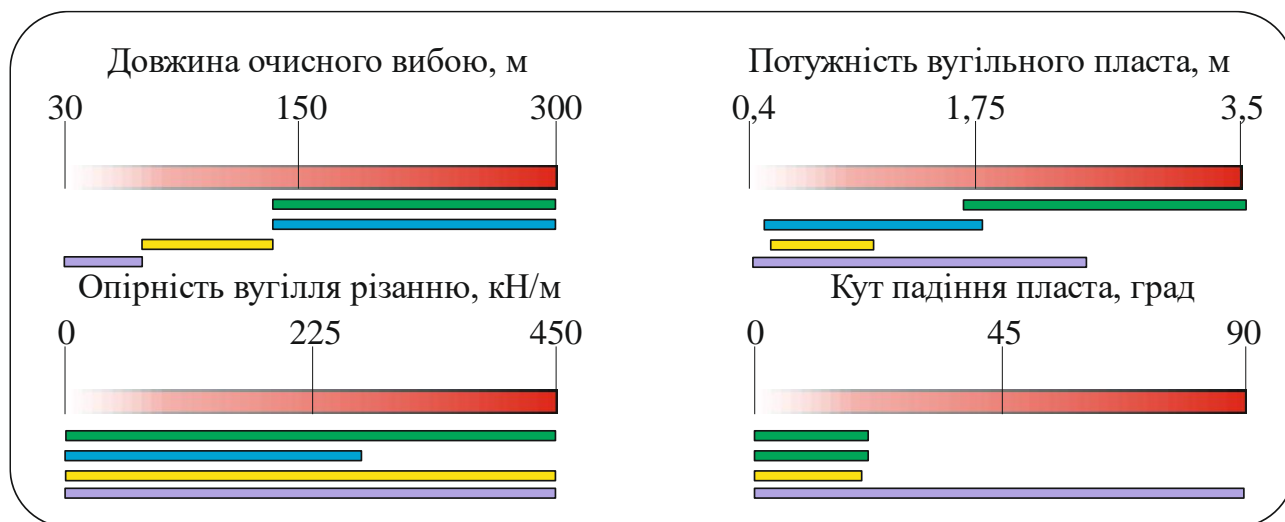
Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [5] розглянуто суміщення технології видобутку вугілля очисними комплексами та підземною газифікацією. Як відмітив автор даної роботи, вирішення питань, пов'язаних зі зміною технологій видобутку вугілля та концентрації очисних робіт, є найбільш важливими. У роботі [6] проведено порівняльний аналіз двох механізованих технологій видобутку вугілля: стругової та комбайнової. З якого випливає, що основні техніко-економічні показники роботи очисного вибою навантаження при струговій технології на 2025 т/добу більше ніж при комбайновій. А підвищення показників з видобутку вугілля прямопропорційно залежить від збільшення довжини очисних вибоїв, темпів їх посування та потужності вугільного пласта. Недопустимим є застосування очисних комплексів на виїмкових стовпах довжиною 1000 – 1500 м. Ця величина має відповідати технічному зносу механізованих комплексів до проведення капітальних ремонтів, з видачею конструктивних елементів на поверхню. При сучасному технічному оснащенні видобувних робіт ця величина має складати 2000 – 3000 м [7]. В Україні в пластах потужністю менше 1,0 м зосереджено понад 30% балансових запасів вугілля. За своєю якістю відповідають кондиціям, але мають недостатню для їх виймання потужність, менше 0,55 м. Таким чином, питання, що пов'язані з видобутком даних запасів, є вельми актуальними. Забезпечити прийнятний рівень ефективності виймання пластів потужністю менше 0,55 м можна використовуючи технології бурошнекового виймання та геотехнологію підземної газифікації.

Бурошнекова технологія виймання включає видобуток вугілля в одну або в обидві сторони від штреку шляхом спеціального вибурювання свердловин. Бурошнекові установки вибурюють свердловини діаметром дещо менше потужності пласта, відокремлені одна від одної вугільними ціликами. На відміну від комбайнового або стругового видобутку вугілля бурошнекова технологія забезпечує безлюдне виймання вугілля. Але дана технологія має низку недоліків, основні з яких: незадовільна спрямованість буріння свердловин, значні втрати (до 70%) вугілля в міжсвердловинних ціликах, великий обсяг допоміжних операцій. Все вищеперераховане не дозволило бурошнековій технології отримати заслужене з низки технічних характеристик широкого розповсюдження [8, 9].

Геотехнологія підземної газифікації полягає у тому, що до вугільного пласта, який залягає на певній глибині під землею, по пробурених з поверхні землі експлуатаційних свердловинах підводяться газоподібні реагенти, окремо або в сумішах (повітря, пара, кисень, вуглець). На певних стадіях термічної переробки вугільного пласта, у сформованому реакційному каналі, забезпечується контакт між площиною вугільного пласта із дуттям з метою отримання газоподібних енергетичних продуктів (генераторний газ) [10, 11].

Зазначені технології видобутку вугілля мають як спільні, так і відмінні риси. Якщо поєднання технологій механізованого виймання вугілля у межах одного родовища, чи навіть у межах одного шахтного поля не призводить до ускладнень, пов'язаних з процесом видобутку, то введення геотехнології газифікації у діяльність підприємства зумовлює до перегляду усіх виробничих процесів. Практична реалізація технології газифікації в основному здійснювалась на шахтних полях, де

не проводились раніше роботи з видобутку вугілля. Тому для оцінки критеріїв доцільності застосування даних технологій, що можуть слугувати параметрами їх вибору, автори проєкту пропонують орієнтуватися, при достатньо однакових гірничо-геологічних умовах залягання вугільного пласта, на довжину очисного вибою, потужність вугільного пласта та його кут падіння й опірність вугілля різанню. За цими чотирьма параметрами авторами проєкту була зроблена оцінка можливості впровадження зазначених технологій, що наведена у вигляді експрес-схеми (рис.1).



I. Комбайнова технологія видобутку

II. Бурошнекова технологія видобутку

I. Стругова технологія видобутку

III. Технологія підземної газифікації

Рис. 1. Експрес-схема з оцінки можливості впровадження технологій видобутку вугілля

З аналізу експрес-схеми можна стверджувати, що за зазначеними параметрами технологія підземної газифікації має превалювання. Тому автори проєкту в подальшому розглядають дану технологію як перспективну, що може суттєво вплинути на термін роботи вугледобувних підприємств країни. При застосуванні технологій видобутку на першому етапі (I) передбачаються стругове та комбайнове виймання, на другому (II) бурошнекове, а вже на третьому (III) газифікація.

Гірничо-геологічні умови реалізації технології підземної газифікації. Вихідними даними для проведення досліджень слугували позабалансові запаси вугілля. Оскільки дані запаси вугілля раніше не розроблялися, тому коефіцієнти за невідомими параметрами приймалися 0,6, що характеризують умови достатньої придатності для підземної газифікації.

У межах шахтного поля залягають позабалансові запаси вугілля на пластах:
 - пласт c_{12} є самим верхнім пластом у стратиграфічному розрізі самарської світи. Із позабалансовою потужністю (0,45 – 0,58м) пласт зафіксовано на обме-

жених ділянках у західній та східній частинах оцінюваної площі. У крайній східній частині шахтного поля відмічена робоча потужність пласта (0,60 – 0,65 м), але у зв'язку з невеликою площею її розповсюдження підраховані запаси віднесені до запасів з невизначеним промисловим значенням.

Будова пласта c_{12} переважно проста. Вугільний пласт c_{12} невитриманий. У покрівлі та підосві пласта c_{12} залягають аргіліти та алевроліти;

- пласт c_7^B залягає на 24 м нижче пласта c_8^H . Характеризується позабалансовою потужністю (0,45 – 0,55 м) майже на всій площі шахтного поля. В межах південної та західної частин оцінюваної площі присутні порівняно невеликі площі з робочою потужністю (0,60 – 0,65 м), але у зв'язку з їх обмеженими розмірами запаси на цих площах віднесені до запасів з невизначеним промисловим значенням. У північно-західній частині шахтного поля потужність пласта зменшується до 0,30 – 0,40 м, за винятком вузької смуги (біля 300 м) субмеридіонального напрямку, де зберігається позабалансова потужність пласта (0,50 м).

Будова пласта c_7^B переважно проста. Вугільний пласт c_7^B невитриманий. У покрівлі та підосві пласта залягають аргіліти та алевроліти;

- пласт c_6^B залягає на 42 м нижче вугільного пласта c_7^H . Позабалансова потужність пласта (0,45 – 0,55 м) зберігається у південно-західній та центральній частинах шахтного поля. На сході центральної частини оцінюваної площі пласт c_6^B розмитий і заміщений пісковиком. У південно-західній частині пласт c_6^B характеризується невитриманою потужністю: ділянки з потужністю 0,20 – 0,40 м чергуються з площами, що мають гранично балансову потужність (0,55 – 0,60 м), та внаслідок обмеженого розміру позбавлені промислового значення.

Будова пласта c_6^B переважно проста і тільки у східній частині оцінюваної площі місцями відмічена двопачкова будова. Вугільний пласт c_6^B невитриманий. Покрівлю та підосві пласта складають аргіліти та алевроліти.

- пласт c_6^H розташований на 4 м нижче пласта c_6^B . Пласт із потужністю 0,45 – 0,55 м просліджується у вигляді смуги складної конфігурації шириною від 500 до 1600 м у південно-західній та західній частинах оцінюваної площі. На інших ділянках шахтного поля потужність пласта зменшується до 0,20 – 0,30 м.

Будова пласта проста. Вугільний пласт c_6^H - невитриманий. У покрівлі та підосві пласта c_6^H залягають аргіліти та алевроліти;

- пласт c_4^2 розташований на 10 м нижче вугільного пласта c_5 . У центральній та східній частинах шахтного поля потужність пласта c_4^2 становить 0,45 – 0,55 м. У західній та північно-західній частинах оцінюваної площі потужність пласта c_4^2 зменшується до невідрахованої (0,10 – 0,40 м). Запаси вугілля не підраховувались.

Будова пласта c_4^2 проста. За комплексними показниками (група потужності; площа розповсюдження; коефіцієнт варіації потужності; мінливість морфології) згідно з Інструкцією ДКЗ України, пласт c_4^2 невитриманий. У покрівлі та підосві пласта залягають аргіліти та алевроліти;

- пласт c_2 залягає на 50 м нижче пласта c_4^2 . З позабалансовою потужністю (0,45 – 0,55 м, рідко більше) пласт c_2 розповсюджений на значній території східної та центральної частин і на дуже обмеженій площі північно-західної частини шахтного поля.

У південно-західній, західній, центральній та північній частинах оцінюваної площі потужність пласта знижується до 0,20 – 0,30 м. Навіть в місцях розповсюдження пласта з позабалансовою потужністю спостерігається чергування ділянок з позабалансовою та непідрахунковою потужністю пласта (0,30 – 0,40 м). За комплексними показниками (група потужності; площа розповсюдження; коефіцієнт варіації потужності; мінливість морфології), згідно з Інструкцією ДКЗ України, пласт c_2 невитриманий. Будова вугільного пласта c_2 проста. У покрівлі та підшві пласта c_2 залягають аргіліти та алевроліти;

- пласт c_0^1 залягає на 12 м нижче вугільного пласта c_1 . Підрахункова потужність пласта (в основному 0,45 – 0,55 м) відмічена на незначній площі у південно-західній частині шахтного поля.

На інших ділянках шахтного поля потужність пласта c_0^1 зменшується до 0,20 – 0,40 м. Будова пласта проста. Вмісні породи представлені аргілітами та алевролітами. Вугільний пласт c_0^1 – невитриманий.

Загальна характеристика позабалансових запасів вугілля наведена у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика забалансових запасів вугілля

Синоніміка пласта	Потужність		Будова пласта	Ступінь витриманості	Площа підрахунку запасів, тис.м ²	Глибина підрахунку запасів, м
	чистих вугільних пачок, м	з урахуванням засмічення, м				
c_{12}	<u>0,45-1,00</u> 0,51	<u>0,45-1,00</u> 0,52	проста	невитриманий	14596	420
c_7^B	<u>0,45-0,80</u> 0,55	<u>0,45-1,0</u> 0,56	проста	невитриманий	21136	550
c_6^B	<u>0,45-0,74</u> 0,51	<u>0,45-0,79</u> 0,51	проста	невитриманий	17831	590
c_6^H	<u>0,45-0,65</u> 0,49	<u>0,45-0,65</u> 0,49	проста	невитриманий	10975	590
c_4^2	<u>0,45-0,65</u> 0,50	<u>0,45-0,68</u> 0,50	проста	невитриманий	8357	620
c_2	<u>0,45-0,70</u> 0,50	<u>0,45-0,70</u> 0,50	проста	невитриманий	14971	700
c_0^1	<u>0,45-0,70</u> 0,48	<u>0,45-0,70</u> 0,48	проста	невитриманий	7943	630

Характер обводнення виробок оцінюваних вугільних пластів. Шахта ім. Героїв Космосу характеризується невисокою обводненістю. З початку експлуатації (1979 р.) на шахті розробляються 3 вугільних пласти: c_{11} , c_{10}^B , c_9 , які відносяться до пластів “закритого” типу, тобто в межах всієї площі шахтного поля вугільні пласти не мають виходу під водоносні горизонти посткарбонівих відкладів і гідралічний взаємозв’язок з ними повністю відсутній. Інші оцінювані вугільні

пласти, що є на балансі шахти (c_{12} , c_8^H , c_7^B , c_7^H , c_6^B , c_6^H , c_5 , c_4^2 , c_2 , c_1 , c_0^1), знаходяться в таких же гідрогеологічних умовах, перекриті надвугільною товщею та ізольовані на півдні Богданівським та Вербським скидами, на півночі – Благодатним скидом, які є в регіоні водонепроникними екранами на шляху руху підземних вод. В таких умовах обводнення розроблюваних і оцінюваних вугільних пластів та гірничих виробок відбувається за рахунок статичних запасів підземних вод, що містяться в пісковиках та безпосередньо у вугільних пластах. Вода в гірничі виробки надходить переважно із покрівлі у вигляді капежів та струменів (іноді переривчатих) різноманітної інтенсивності.

Відповідно до попереднього аналізу забалансових вугільних пластів було відзначено їх гідрогеологічні особливості.

Вугільний пласт c_{12} шахтою не розробляється. Покрівля і подошва пласта складена, в основному, аргілітами та алевролітами, в західній і центральній частинах у покрівлі зустрічаються прошарки пісковика. Коефіцієнт фільтрації вугільного пласта та пісковиків становить 0,132 – 0,76 м/добу, водопровідності – 0,079 – 0,304 м²/добу. Гідрокаротажні дослідження зафіксували 100 % приплив із пласта (св. № 14254) – 0,014 л/с. Коефіцієнт фільтрації вугільного пласта та пісковиків становить 0,0202 м/добу, водопровідності – 0,0850 м²/добу. Водоприпливи по пласту формуються за рахунок статичних запасів пласта і становлять 5 – 10 м³/год, в середньому складають 7 м³/год. При відпрацюванні пласта і посадці лав води пісковиків будуть брати участь в обводненні гірничих виробок.

Вугільний пласт c_7^B шахтою не розробляється. Покрівлею та безпосередньою подошвою пласта є аргіліти та алевроліти. Але на окремих площах у подошві пласта c_7^B , різко контактуючи з ним, а частіше нижче його на 1,3 – 10,0 м, залягає досить потужний (3 – 31 м) тріщинуватий пісковик, до якого приурочений високонапірний горизонт. При проходці головним та допоміжним стволом цього пісковика приплив із нього складав, відповідно, 36,6 – 38 м³/год та 42 – 51 м³/год. Гідрокаротажні дослідження зафіксували приплив 0,0166 – 0,095 л/с із цього пісковика. За результатами пластовипробувань коефіцієнт фільтрації пісковиків, які залягають у подошві пласта, становить 0,625 – 2,2 м/добу, водопровідності – 1,375 – 13,23 м²/добу. При відпрацюванні пласта c_7^B водоносний горизонт, приурочений до пісковика в його подошві, буде істотно впливати на обводнення гірничих виробок.

Вугільні пласти c_6^B , c_6^H шахтою не розробляються. В їх подошві та покрівлі залягають аргіліти та алевроліти, але на окремих площах поля в покрівлі чи в подошві пласта, вище (нижче) 5 – 20 см шару аргілітів і алевролітів, залягає пісковик потужністю 1 – 35 м. При проходці стволами шахти спостерігалася підвищена обводненість цих пісковиків, припливи склали 30 – 35 м³/год. Коефіцієнт фільтрації пласта становить 6,23 м/добу, водопровідності – 1,56 м²/добу. При відпрацюванні пластів води пісковика будуть істотно впливати на обводнення гірничих виробок.

Вугільний пласт c_4^2 шахтою не розробляється. На всій частині шахтного поля пласт розмитий або неробочої потужності. У покрівлі, як і в подошві пласта, залягають аргіліти та алевроліти потужністю до 18 м, лише на окремих ділянках – пісковики потужністю до 20 м.

Вугільний пласт c_0^1 шахтою не розробляється. Розвинутий лише на західній частині шахтного поля та має неробочу потужність. Підшва та покрівля пласта складена аргілітами та алевролітами, лише в поодиноких випадках зустрічаються пісковики.

Встановлення критеріїв придатності запасів до підземної газифікації. На основі розробленої професором кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Дичковським Р.О. методики оцінки придатності запасів вугілля до підземної газифікації [12] була проведена оцінка даних запасів до зазначеної технології. Для оцінки можливої газифікації родовище розбивають на характерні ділянки, і їх придатність до підземної газифікації визначається величиною загального коефіцієнта (K), який залежить від природних параметрів залягання ділянки газифікації, виходячи з відповідних коефіцієнтів (0,9 – 1,0 – ідеальні умови для підземної газифікації вугілля; 0,8 – 0,9 – умови хорошої придатності для підземної газифікації вугілля; 0,75 – 0,8 – умови достатньої придатності для підземної газифікації вугілля; 0,6 – 0,75 – умови задовільної придатності до підземної газифікації вугілля; 0,5 – 0,6 – умови можливої газифікації при істотних змінах в технологічному процесі СПГВ; більше 0,5 – на даному етапі розвитку техніки і технології ПГВ запаси є непридатними до підземної газифікації вугілля). Враховуючи критерії придатності вугільних пластів до свердловинної підземної газифікації вугілля було проведено аналіз гірничо-геологічних, гідрогеологічних і гірничотехнічних умов залягання вугільних пластів з метою обґрунтування придатності вибраної ділянки для підземної газифікації. Промислове значення мають 7 вугільних пластів: c_{11} , c_{10}^B , c_9 , c_8^H , c_7^H , c_5 і c_1 . Пласти c_{12} , c_7^B , c_6^B , c_6^H , c_4^2 , c_2 , c_0^1 мають підпорядковане значення та віднесені до позабалансових, за винятком пластів c_{10}^H і c_4^B , запаси по яких не підраховуються. На площі шахтного поля витриманість пластів неоднакова.

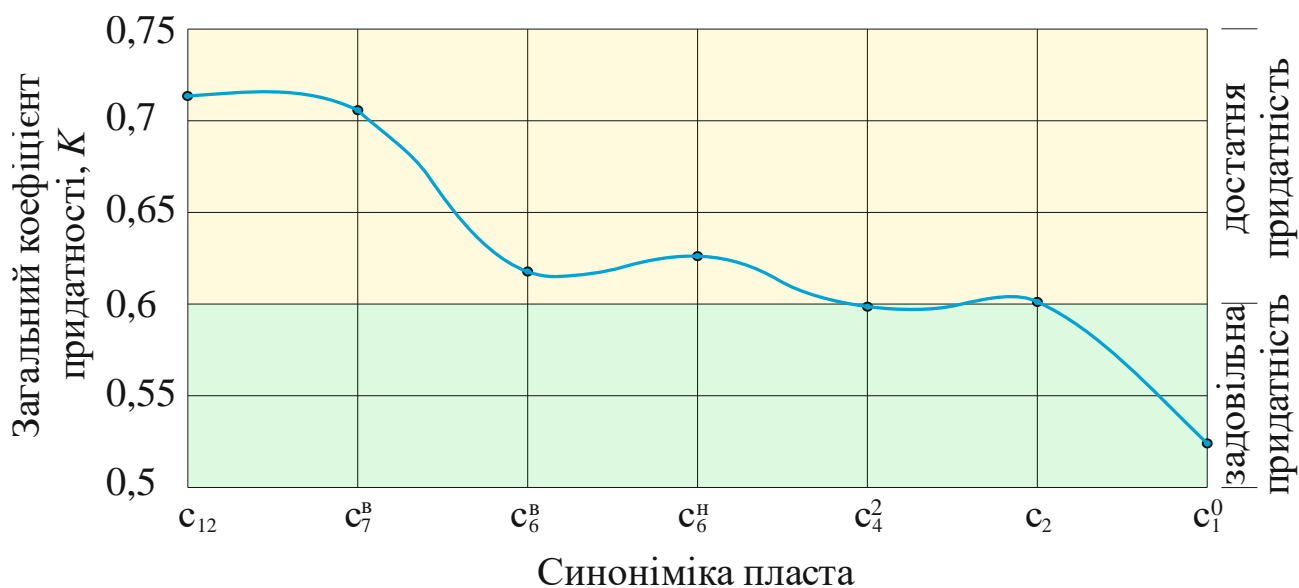


Рис. 2. Графік зміни загального коефіцієнта придатності вугілля пластів шахти ім. Героїв Космосу

За результатами аналізу даних (див. рис. 2) першочерговими для відпрацювання є вугільні пласти c_{12} та c_7^B , що знаходяться в умовах достатньої придатності. Запаси вугільних пластів c_6^B , c_6^H , c_4^2 , c_2 та c_0^1 – в умовах задовільної придатності до підземної газифікації вугілля.

Дослідження параметрів матеріально-теплового балансу процесу газифікації. Від збалансованості системи «підземний газогенератор», швидкостей хімічних реакцій і фізичних процесів при вигазовуванні вугільного пласта залежать керованість, безпека і технологічність виробництва штучного газу. Матеріальний баланс підземної газифікації вугілля показує зіставлення надходження і витрати мас речовин або їх об'ємних показників у цьому процесі [13, 14]. На основі встановлених критеріїв придатності запасів вугілля до газифікації було досліджено параметри виходу горючих генераторних газів при подачі повітряної дуттьової суміші ($O_2 = 21\%$) при газифікації вугілля пластів c_{12} та c_7^B , що є першочерговими до відпрацювання. Даний вихід досліджувався для пласта c_{12} , що є першочерговим для відпрацювання та знаходиться в умовах достатньої придатності до підземної газифікації вугілля. Оскільки математичне моделювання процесів підземної газифікації вугілля носить багаторівневий характер, тому для прогнозування якісного складу і кількості вхідної та вихідної сумішей авторами проєкту відповідно до наведеної методики у роботі [9] було проведено розрахунок матеріально-теплового балансу газифікації (табл. 2).

Таблиця 2

Показники процесу ПГВ при різних видах дуття

Вид дуття	Склад дуття, %			Склад вихідних газів, %							Q, МДж/м ³	ККД, %
	O ₂	CO ₂	пар	H ₂	CH ₄	CO	N ₂	H ₂ S	CO ₂	O ₂		
O ₂ N ₂	21	–	–	9,9	6,5	19,1	54,1	0,3	9	1,1	5,4	52,2
O ₂ N ₂	66	–	–	19,5	10,7	31,4	18,85	0,75	15,7	3,1	9,6	67,7
O ₂ N ₂	61	–	–	17,3	12,9	34,5	18,45	0,65	13,8	2,4	9,8	66,6
H ₂ O+O ₂	23	–	8,0	8,9	6,6	22,1	50,95	0,45	9,7	1,3	5,9	54,8
H ₂ O+O ₂	56	–	19,5	16,1	11,1	38,1	6,65	1,25	22,9	3,9	10,3	68,5
	53	–	30,6	12,4	10,9	39,3	5,75	0,95	26,6	3,8	11,3	69,2
CO ₂ +O ₂	54	42,0	–	17,3	10,6	48,95	1,1	1,25	17,5	3,3	10,9	68,4
	50	30,7	–	16,5	9,9	46,5	0,55	1,05	22,2	3,3	10,0	65,2
	50	38,5	–	16,6	1,3	50,1	0,55	1,15	18,0	3,2	11,6	68,9
CO ₂ +C ₂ + +H ₂ O	52	34,4	15,4	17,3	12,0	48,3	1,35	0,85	17,0	3,2	11,1	68,7
	44	36,9	11,0	16,8	10,0	51,0	1,05	0,85	17,2	3,1	10,8	70,1

Тепловий баланс вказує на теплообмін в системі підземного газогенератора (отриманій, використаній та втраченій тепловій енергії) [15, 16]. Тепловий баланс вимірюється одиницями енергії (джоулі, калорії) або у відсотках від загальної кількості теплоти, що припадає на одиницю отриманого газу, одиницю часу або одиницю маси витраченої речовини (вугілля) (табл. 3).

Таблиця 3

Тепловий баланс підземної газифікації вугільного пласта шахтної свердловини-газогенератора

Показник	Склад дуття					
	повітряне		кисневе		O ₂ + CO ₂ + пара	
	МДж/кг	%	МДж/кг	%	МДж/кг	%
Виділення тепла:						
Теплота згоряння на робоче паливо	32,1	97,6	31,9	90,7	31,9	90,7
Тепловміст масиву у зоні окислення	0,7	2,1	1,3	3,6	1,3	3,6
Тепловміст дуття	0,208	0,64	2,087	5,83	2,087	5,83
Всього:	32,8	100,00	35,6	100	35,6	100
Теплота згоряння газу СПГВ	12,1	36,5	15,7	44,6	14,7	42,5
Втрати тепла:						
Нагрів золи і шлаку	0,095	0,30	0,095	0,26	0,095	0,27
Нагрів і використання вологи	0,375	1,14	0,375	1,10	0,375	1,09
Нагрів вмісних порід	6,805	20,80	5,858	16,70	6,211	18,04
Тепловміст сухого генераторного газу	13,7	41,5	13,3	37,5	13,4	38,8
Всього:	32,9	100	35,3	100	34,5	100
Температура при виході з реакційного каналу, °С	433		702		655	
Температура газів ПГВ при виході з газовідвідної свердловини, °С	237		395		362	

При температурах у реакційному каналі нижче 900°С вихід СО знижується на 25 – 46%. За розрахунковими даними вміст монооксиду вуглецю у продуктах газифікації з підвищенням температури постійно збільшується: при 600°С становить 6 – 7%; 800°С – 24 – 26%; 1000°С – 50%; а вміст діоксиду вуглецю знижується, відповідно – 35 – 38%; 23 – 25% і 10%.

Кількісні показники газифікації вугілля у виїмковому стовпі шахтного газогенератора залежать від запасів вугілля у межах виїмального стовпа. Важливою складовою є дослідження швидкості посування вогневого вибою та часу переходу підземного газогенератора у режим реверсування, що дозволяє спрогнозувати розкриття та підготовку наступного газогенератора. Прогнозна швидкість руху вогневого вибою визначалась на основі залежностей наведених у роботі [17]:

- стендові експериментальні дослідження: $v = 5,1 - 2,5m$, м/доб;
- теоретичні дослідження: $v = 5,4 - 2,5m$, м/доб;

- усереднена залежність між стендовими експериментальними та теоретичними дослідженнями: $v = 5,25 - 2,5t$, м/доб

Технологічні параметри процесу газифікації підземного газогенератора розмірами при довжині стовпа газифікації 300 м, реакційного каналу 30 м та середній потужності пласта c_{12} 0,51 м наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Технологічні параметри процесу газифікації для одного підземного газогенератора розмірами $300 \times 30 \times 0,51$ м

Тиск у вогневому каналі, Р, МПа	1,6-2,6
Температура процесу, Т, °С	1050 – 1250
Температура газів у вертикальній свердловині, T_r , °С	350 – 1150
Швидкість посування вогневого вибою, м/доб	3,98
Дотримання паритету окислювальної і відновлювальної зон	0,3 – 0,7
Теплова потужність газогенератора, Гкал/год	5 – 8
Електрична потужність газогенератора, кВт/год	6000 – 10150

Газифікація вугілля в межах стовпа дає можливість при середньому виході генераторного газу $1800 - 2400$ м³/т вугілля, отримати $11,57 - 15,42$ млн м³ газу. Частка газу метану при повітряному дутті ($O_2 = 21\%$), складе $1,68 - 2,12$ млн м³ газу, реалізація якого при теперішній ціні становитиме $38,48 - 51,48$ млн грн.

Висновки. Україна має потужну енергетичну галузь, яка здатна забезпечити потреби держави, але в останні часи має кризові проблеми. Тому енергетична концепція держави має бути орієнтована на вугледобувний сектор.

Застосування комбінації технологій розробки малопотужних некондиційних запасів вугілля дозволяє суттєво продовжити термін роботи гірничого підприємства. Зокрема після відпрацювання продуктивних площ запасів вугілля орієнтація видобутку спрямована на переробку запасів на місці їх залягання технологією підземної газифікації.

Для умов шахти ім. Героїв Космосу визначено критерії придатності вугілля до газифікації. Два вугільних пласти шахти c_{12} та c_{7^B} знаходяться в умовах достатньої придатності для підземної газифікації вугілля.

Встановлено, що при подачі у підземний газогенератор повітряного та збагаченого киснем дуття об'єм виходу горючих генераторних газів залишається однаковим, відмінність полягає у концентрації даних газів у вихідній суміші. Це обумовлюється великим вмістом азоту при повітряному дутті, який не вступає у хімічну реакцію з вугіллям. При температурах у реакційному каналі нижче 900°C вихід СО знижується на $25 - 46\%$.

Вдячність. Представлені результати отримано у рамках виконання науково-дослідної роботи ГП-502 «Розробка прогресивних технологій повноцінного вилучення енергетичного вугілля з акумуляцією пустих порід у підземному просторі» (№держреєстрації 0120U101099).

Перелік посилань

1. Основні напрями розвитку паливно-енергетичного комплексу України на період до 2030 року. (2005). https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v01_1558-05#Text
2. Sotskov, V. O., Podvyhina, O. O., Dereviahina, N. I., & Malashkevych, D. S. (2018). Substantiating the criteria for applying selective excavation of coal deposits in the Western Donbass. *Вісник Дніпропетровського Університету. Геологія, Географія*, 26(1), 158–164. <https://doi.org/10.15421/111817>
3. Saik, P., Dychkovskiy, R., Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., Cabana, E. C., & Hrytsenko, L. (2021). Chemistry of the Gasification of Carbonaceous Raw Material. *Materials Science Forum*, (1045), 67-78. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1045.67>
4. Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., Saik, P., Lozynskiy, V., Sulaiev, V., & Cabana, E. C. (2019). The Concept of Mining Enterprises Progress on the Basis of Underground Coal Gasification Method Characteristic. *Solid State Phenomena*, (291), 137-147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.291.137>
5. Дичковський, Р.О. (2013). *Наукові засади синтезу технологій видобування вугілля у слабо-метаморфізованих породах: монографія*. НГУ.
6. Тимошенко, Є.В. (2009). До питання підвищення ефективності відпрацювання тонких вугільних пластів. *Матеріали III Міжнародна науково-практична конференція 13–19 вересня 2009 року «Школа підземної розробки-2009»*, 583-588.
7. Dychkovskiy, R. O., Lozynskiy, V. H., Saik, P. B., Dubiei, Yu. V., Cáceres Cabana, E., Shavarskiy, Ia.T (2019). Technological, lithological and economic aspects of data geometrization in coal mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 22-28. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-5/4>
8. Bołoz, Ł. U. K. A. S. Z. (2018). Mining of thin coal seams using surface-underground methods. *Mining–Informatics, Automation and Electrical Engineering*, 56, 47-52. <http://dx.doi.org/10.7494/miag.2018.3.535.47>
9. Lubosik, Z. (2013). Assessment of auger mining application in Polish hard coal deep mines. *Mining of Mineral Deposits*, 133-142.
10. Rosen, M. A., Reddy, B. V., & Self, S. J. (2018). Underground coal gasification (UCG) modeling and analysis. *Underground Coal Gasification and Combustion*, 329–362. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100313-8.00011-6>
11. Saik, P. B., Falshtynskiy, V. S., Lozynskiy, V. H., Cabana, E., Demydov, M., & Dychkovskiy, R. (2020). Efficiency of underground gas generator in consideration of the reverse mode. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 39-46. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/039>
12. Дичковський, Р.О. (2013). *Наукові засади синтезу технологій видобування вугільних пластів у слабометаморфізованих породах*. (Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин).
13. Lozynskiy, V., Dichkovskiy, R., Saik, P., & Falshtynskiy, V. (2018). Coal Seam Gasification in Faulting Zones (Heat and Mass Balance Study). *Solid State Phenomena*, 277, 66–79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.277.66>
14. Laciak, M. (2011). Material and energy balance of the ucg process in the laboratory conditions. *SGEM2011 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. <https://doi.org/10.5593/sgem2011/s18.111>

15. Fischer, D D., Boysen, J.E., & Gunn, R.D. (1977). Energy balance for the second underground coal gasification experiment, Hanna, Wyoming. *Trans Soc Min Eng AIME*, 262(4), 341-347.
16. Sawyer, W.K., & Shuck, L.Z. (1976). Numerical simulation of mass and energy transfer in the longwall process of underground gasification of coal. *Symposium on Numerical Simulation of Reservoir Performance*, 355-365
17. Саїк, П.Б. (2015). *Обґрунтування параметрів технології свердловинної підземної газифікації вугілля зі зближених пластів* (Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, 05.15.02 – підземна розробка родовищ корисних копалин).

ABSTRACT

Purpose. Formation of an innovative approach in the rational development of low-thickness unconditioned coal reserves with the establishment of their suitability for underground gasification technology and the study of mass and heat indicators of the gasification process on the example of the mine of PJSC "DTEK Pavlohradvuhillia" named after Heroiv Kosmosu.

Methods. The possibility of implementing the technology of in situ underground coal gasification was based on analytical studies. On the basis of the work developed by the professor of the Department of Mining Engineering and Education of "Dnipro University of Technology" Dychkovskiy R.O "Methods for assessing the suitability of reserves for underground coal gasification" established the general coefficient of the suitability of coal reserves for gasification located within the minefield named after Heroiv Kosmosu and are promising for future development. The output parameters of combustible and ballast generator gases, and the chemical and energy efficiency of the gasification process were studied using the "MTB SPGV" software, which passed industrial approval both during laboratory and field tests.

Findings. Current issues related to the application of a combination the technologies for the development of low-thickness non-conditional coal reserves, which allow significantly extend the life of the mining enterprise, are highlighted. In particular, after working out the productive areas of coal reserves, the orientation of production is aimed at the processing of reserves at the place of their occurrence by underground gasification technology. Criteria for the suitability of coal reserves were established, which allowed the establishment of the priority of coal seams gasification. Based on the change in the parameters of the fuel mixture, the output of combustible and ballast generator gases was investigated.

Originality. It was established that when air and oxygen-enriched blowing is supplied to the underground gas generator, the output volume of combustible generator gases remains the same, the difference lies in the concentration of these gases in the initial mixture. This is due to the high content of nitrogen during air blowing, which does not enter into a chemical reaction with coal, and at temperatures in the reaction channel below 900°C, the output of CO decreases by 25-46%.

Practical implications. The conditions of the mine named after Heroiv Kosmosu defined criteria for the suitability of coal for gasification. Two coal seams of the mine c_{12} and c_7^{top} are in conditions of sufficient suitability for underground coal gasification.

Keywords: *underground coal gasification, eligibility criteria, coal seam, generator gas.*