

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.272.6

Р.О. Дичковський, д-р техн. наук, проф.

Держаний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна,
e-mail: dichre@yahoo.com

ВСТАНОВЛЕННЯ КРОКУ ПОСАДКИ ПОРІД ПРИ СВЕРДЛОВИННІЙ ПІДЗЕМНІЙ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

R.O. Dychkovskiy, Dr. Sci. (Tech.), Professor

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: dichre@yahoo.com

DETERMINATION OF THE ROCK SUBSIDENCE SPACING IN THE WELL UNDERGROUND COAL GASIFICATION

Мета. Встановлення залежності кроку опускання порід покрівлі від товщини штучно створених двошарових оболонок, сформованих способом варіації температури, тиску при зміні складу дуттьової суміші, для формування робочого простору геореактора, необхідного для безперешкодного проходження газових потоків.

Методика. Проведення аналітичних досліджень ґрунтувалось на основі пружних та пружно-пластичних деформацій, що протікають за зміни параметрів штучно створених оболонок у гірських породах у зоні дії температурного поля газогенератора. Для створення цих оболонок формуються необхідні температурні умови в осередку газифікації та подаються пароповітряні суміші для оплавлення порід на контакті геореактора. Ці оболонки мають змінені деформаційні характеристики в порівнянні з масивом у природному стані, і дають можливість коректувати крок опускання порід покрівлі. Даний параметр встановлювався аналітично із застосуванням відомого рівняння Клапейрона-Менделєєва, а також експериментальним шляхом на спеціальній установці, розробленій науковцями Національного гірничого університету. Для обробки даних та побудови узагальнюючих залежностей використано метод множинної регресії та застосовано загально визнані системи обробки даних таблиць Excel-2013.

Результати. Виконані багатоваріантні розрахунки кроку опускання порід, що є складовою визначення напружено-деформованого стану навколо геореактора за різних потужностей штучно створеної оболонки на контурі зони газифікації. Їх відповідність перевірена експериментально на спеціальній стендовій установці. Отримані масштабні коефіцієнти дали можливість отримати реальні значення деформаційних параметрів для конкретних гірничо-геологічних умов у вигляді встановлення геометричних розмірів зон руйнування порід і визначення необхідного простору для безперешкодного проходження дуттьових сумішей.

Наукова новизна. Встановлені залежності кроку переміщень бічних порід на контурі газогенератора від товщини двошарової штучно створеної оболонки, що характеризує розвиток деформацій у породному масиві навколо геореактора. Отримані розрахункові формули для визначення кроку опускання порід у залежності від товщини штучно створеної оболонки необхідні при виборі способу керування гірським тиском та забезпечення робочого простору геореактора.

Практична значимість. Запропоновано математичний механізм для встановлення деформаційних характеристик масиву гірських порід. Його ефективність експериментально підтверджена на спеціальній стендовій установці. Отримані залежності складають інженерну методику зі встановлення кроку опускання порід від товщини двошарової штучно створеної оболонки для забезпечення технологічності процесу газифікації.

Ключові слова: *геореактор, дуттьова суміш, крок опускання порід покрівлі, двошарова штучно створена оболонка, керування гірським тиском*

Вступ. Збитковість роботи багатьох вугільних підприємств, зниження безпеки виконання технологічних процесів гірничого виробництва, що призводить до травматизму та летальних випадків, вимагає перегляду ефективності існуючих механічних технологій відбивання вугілля від масиву та існування в наявному вигляді самих шахт. Сьогодні ведеться переорієнтація пі-

дприємств на системи: „шахта-лава“, „газовугільна шахта“ чи ін.; розробляються технології використання теплової енергії порід, перепадів температури вхідного й вихідного струменів повітря тощо. На жаль, дані перетворення лише вносять доповнення до існуючих способів отримання енергетичних джерел, руйнування, транспортування та переробки сировини.

До якісної зміни технологій видобування вугілля спонукає багато інших факторів. Основними серед них

є: збільшення середньої глибини ведення гірничих робіт, зниження потужності пластів, наявність тектонічних та природних зон підвищеного гірського тиску, геодинамічних і динамічних проявів у масиві тощо. Однією з радикально нових технологій розробки та переробки вугілля є свердловинна підземна газифікація вугілля (СПГВ). Дана технологія полягає в бурінні похило-горизонтальних свердловин по вугільному пласту зі з'єднанням їх між собою. Далі провадиться розпалювання вугілля та створюється керований вогневий вибій зі збалансованим дотриманням окислювальної та відновної зон. Це дає можливість отримувати суміш горючих газів з подальшим їх використанням як джерела електричної енергії та хімічних продуктів. У гірництві такий спосіб розробки вугільних родовищ за інноваційністю, безпекою праці, отриманням енергетичного продукту відноситься до категорії „високі технології (high technologies)“.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Новітні схеми СПГВ дають можливість провадити розробку запасів на новому техніко-економічному рівні з виключенням забруднення навколишнього середовища при видобутку, комплексній переробці вугільних пластів на місці їх залягання з отриманням високотехнологічних продуктів у вигляді електричної, теплової енергії та хімічної сировини.

У Національному гірничому університеті на кафедрі підземної розробки родовищ розроблені технологічні концепції енергохімічного підприємства з видобутку та переробки пластів твердого палива з урахуванням геологічних і техногенних чинників у безпечному екологічно чистому циклі при утилізації й переробці димових газів, шламів і золоносіїв ТЕС, ТЕЦ та котельних. Замкнутий цикл підземної газифікації вугілля дає можливість вирішити актуальну екологічну проблему утилізації, переробки димових газів та відходів енергетичних підприємств. Газ свердловинної підземної газифікації вугілля не вимагає додаткової підготовки та використовується як енергоресурс для отримання теплової, електричної енергії на самій станції „Підземгаз“ за допомогою поршневих агрегатів, паротурбінних або газотурбінних установок.

Окремо слід розглядати формування напружено-деформованого стану при термічній обробці гірських порід при застосуванні технології свердловинної підземної газифікації вугілля. Підвищення температури масиву разом з високим тиском дуттьової суміші викликають зміни фізико-хімічних властивостей вугілля та бічних порід.

Особливо підвищені температури мають вплив на глиняні сланці, що під час термічної обробки підлягають так званому клінкерному процесу. При ньому відслонені поверхні породи покриваються кіркою, і вони втрачають пластичні властивості. Це призводить до підвищення міцнісних характеристик і збільшення грудкуватості при обваленні.

Розподіл температурного поля біля газогенератора відбувається за двома принципами. Конвекційний обмін температур відбувається лише безпосередньо на контактній реакційній зоні та поширюється до 2–4 потуж-

ностей вигазовуваного пласта. Далі ентальпія відбувається за рахунок кондукційного теплонагріву порід. Підвищення температури та її поширення у глибину масиву відбувається до виникнення термічних напружень, що змінюють характер поведінки порід при обваленні [1]. Ґрунтуючись на дослідженнях, проведених в умовах шахт Західного Донбасу, конвекційна передача ентальпії спостерігалася й на більшій відстані, досягаючи 6 м.

При застосуванні „традиційних“ технологій механічної відбійки вугілля та радикальних способів перетворення вугілля в газоподібне паливо безпосередньо на місці його залягання утворюється вироблений простір і техногенні пустоти, що поступово заповнюються [2]. Поперед очисного вибою формується зона опорного тиску, що залежить від гірничо-геологічних умов залягання вугільного пласта та його якісних характеристик.

Зона релаксації формується в підшві та покрівлі пласта безпосередньо після видобування вугілля. Її форма, поперечні розміри, разом з фізичною сутністю процесу розвантаження, залежать від геометричної форми виїмкового стовпа, глибини залягання, літологічної будови масиву, способу керування гірським тиском та інших параметрів. Руйнування різних за природою та властивостями твердих тіл відбувається в декілька стадій згідно з концентраційним критерієм, що передбачає зародження зони підвищеної напруженості (залежить від величини потенційної енергії масиву); нагромадження мікротріщин з подальшим формуванням макро-розривів (сам процес обвалення порід) [3].

Доцільність виконання досліджень за даною проблематикою. Гіпотези, що пояснюють процес формування гірського тиску, напруженості масиву та зрушення гірських порід, досить повно описані в роботі [4]. СПГВ може використовуватися при відпрацюванні як балансових, так і забалансових запасів. Логічна схема виконання таких досліджень передбачає відповідний алгоритм виконання робіт: від аналітичних розробок до шахтної експериментальної перевірки отриманих результатів.

Цей технологічний процес не дає можливості безпосереднього контакту та візуального спостереження за вигазовуванням вугілля. Аналіз стану геореактора здійснюється за допомогою контролю складу вхідної та вихідної газових сумішей, їх якісних характеристик (температура, наявність домішок). Відповідно, актуальним завданням для забезпечення безаварійної роботи системи є формування контрольованого обвалення порід безпосередньо в зоні газифікації. Це є основою для керування гірським тиском та забезпечення необхідного простору для проходження газових потоків через газогенератор.

Саме на встановлення залежностей величини кроку обвалення гірських порід від зміни стану гірського масиву спрямоване дослідження даної роботи. Це дає можливість сформувати робочу зону газогенератора для проходження дуття та забезпечення керування гірським тиском під час виконання процесу СПГВ.

Аналітичне встановлення кроку опускання порід. Для ефективного керування гірським тиском та забезпечення керованого опускання гірських порід автор ро-

боти пропонує штучно сформувати двошарову оболонку навколо підземних газогенераторів. Це здійснюється у два етапи: оплавлення порід, що знаходяться безпосередньо над осередком газифікації, та створення порід зі зміненими властивостями у глибині масиву. Даний процес досить детально описаний у роботі [4].

В основу промислового визначення кроку посадки порід покрівлі закладено принцип руху газоповітряних сумішей, що базуються на рівнянні стану ідеального газу (рівняння Клапейрона-Менделєєва) [5]

$$PV = nRT, \quad (1)$$

де n – число молей газу; P – тиск газоповітряної суміші; V – об'єм газу (у літрах); T – температура газу (у Кельвінах); R – газова стала (0,0821 л·Атм/моль·К).

Виразивши (1) через молярну масу суміші газів, отримуємо

$$P \cdot V = \frac{m}{M} R \cdot T,$$

де m – маса газу (кг); M – молярна маса газу, кг/моль.

Ураховуючи, що в нашому випадку витрата суміші газів є добутком швидкості на площу поперечного перерізу свердловин та реакційного каналу, отримуємо залежність, m^3/c

$$Q = v \cdot S,$$

де v – швидкість руху дуттьової суміші, м/с; S – площа поперечного перерізу.

У спрощеному вигляді, під час руху дуттьової суміші по каналах газифікації, дана залежність отримає вигляд

$$Q = v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 = v_3 \cdot S_3,$$

де $v_1, v_2, v_3, S_1, S_2, S_3$ – параметри швидкості руху дуттьової суміші та площі поперечного перерізу, відповідно, для подавальної свердловини, реакційного каналу та відповідної свердловини.

Виразивши площі через відповідні геометричні розміри, отримуємо

$$Q = v_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = v_2 \cdot m \cdot l_k = v_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_3^2}{4},$$

де d_1, d_3 – діаметри, відповідно, подавальної та відповідної свердловин; m – потужність пласта, що газифікувався; l_k – крок посадки покрівлі.

З урахуванням зміни температур на вході та виході з характерної ділянки газогенератора, отримуємо, що крок посадки покрівлі може бути визначений за виразом, m^3/c

$$l_k = \frac{v_1 \cdot \pi \cdot d_1^2 \cdot \Delta T_1}{4 \cdot m \cdot v_2 \cdot \Delta T_2} = \frac{v_3 \cdot \pi \cdot d_3^2 \cdot \Delta T_3}{4 \cdot m \cdot v_2 \cdot \Delta T_2},$$

де $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ – перепад температур, відповідно, у подавальній, газовідвідній свердловинах та в геореакторі.

Тому для визначення кроку посадки покрівлі при підземній газифікації дуже важливою є витрата повітря по всій зоні газифікації.

Опис тестових установок та експериментальні дослідження кроку обвалення порід. Перевірка результатів аналітичного моделювання проводилася на двох

стендових установках, що були виконані для умов шахт Західного Донбасу, Соленівського родовища (Україна), Нижньо-Сілезького промислового регіону (Польща) та на експериментальній шахті „Барбара“ (Міколув, Польща). Експериментальну стендову установку розроблено співробітниками Національного гірничого університету та запатентовано у цьому вищому навчальному закладі. Її було побудовано на виробничих потужностях НВО „Нафтомаш“ за фінансової підтримки Міністерства науки і освіти України. Вона складається з наступних, наведених на рис. 1, основних елементів.

Для визначення параметрів температурного поля застосовується система термодатчиків з перетворювачами сигналу, обладнаних інтерфейсом. Контроль стану породувугільного масиву та переміщення гірських порід проводився реперами (датчиками зсуву, рис. 2).

Моделювання робочих параметрів процесу СПГВ за критеріями подібності до натурних умов. Проведення експериментів на наземних стендових установках спрямовані на імітацію процесів СПГВ з урахуванням моделювання геологічних і технологічних параметрів. Для прикладу візьмемо гірничо-геологічні умови залягання одного з пластів дослідної ділянки шахти Західного Донбасу.

Для імітації на стендовій установці натурних умов експерименту підземної газифікації вугілля слід встановити масштабні коефіцієнти та виконати умови подібності [4].

Геометричний масштаб (C_l)

$$C_l = \frac{l_H^i}{l_C^i},$$

де l_H^i, l_C^i – лінійні розміри стенда й області в натурі. Приймаємо $C_l = 40$ м/м; $C_l' = 0,4$ м/см.

Потужність вугільного пласта на стенді (M_m) складе, см

$$M_m = \frac{0,9 \text{ м}}{40 \text{ м / м}} = 0,023 = 2,3.$$

Приймаємо габаритні розміри стендової установки 2,0×2,2×1,8 м. Вона є паралелепіпедом з однієї секції, звареним з листової сталі. З урахуванням розміру секції 2,0×2,2×1,8 м, розміри пласта за падінням $H = 2,2$ м і за простяганням $S = 2,0$ м.

У цьому випадку натурні розміри модельованого простору, з урахуванням впливу газогенератора на масив, становлять:

– за падінням пласта

$$l_H = l_m \cdot C_l \cdot C_l' = 2,2 \cdot 40 \cdot 0,4 = 35,2;$$

– за потужністю масиву

$$h_m = h_M \cdot C_l \cdot C_l' = 1,8 \cdot 40 \cdot 0,4 = 28,8;$$

– за простяганням

$$l_s = l_n \cdot C_l \cdot C_l' = 2,0 \cdot 40 \cdot 0,4 = 32,$$

де l_m, h_m, l_n – відповідно, розміри пласта за падінням, потужністю та простяганням на стенді, м.

Відповідно до проекту СПГВ, протяжність реакційного каналу за простяганням складає 30 м. З урахуванням умов геометричної подібності, довжина реакційного каналу в умовах моделі становить, м

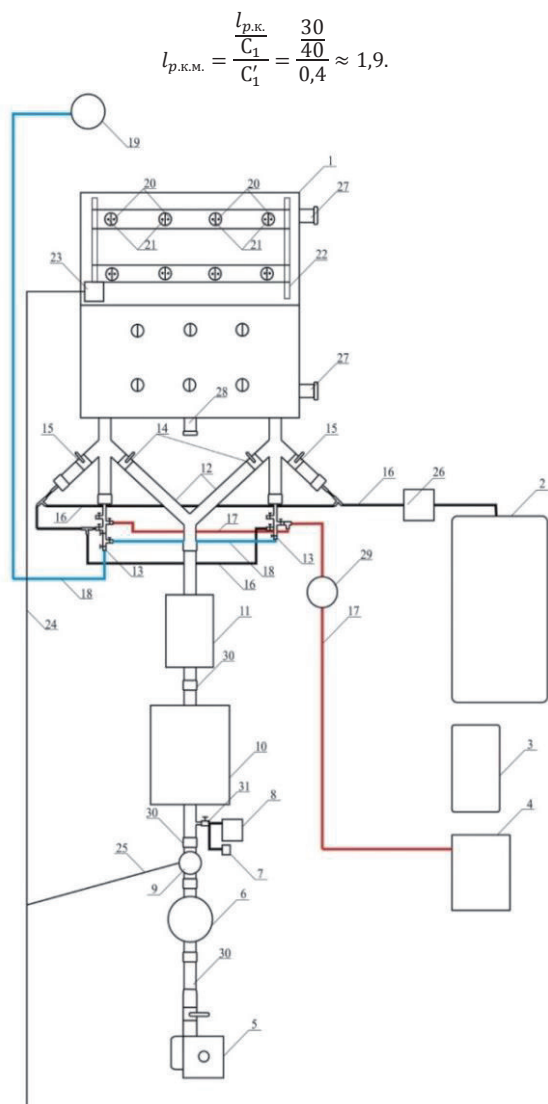


Рис. 1. Принципова схема експериментальної стендової установки: 1 – металевий ящик; 2 – робочий компресор; 3 – резервний компресор; 4 – парогенератор; 5 – димосос; 6 – фільтр очищення; 7 – портативний газоаналізатор VX-170; 8 – аналізатор газу трикомпонентний Casboard-3200L; 9 – витратомір; 10 – відстійник для конденсату; 11 – бак розширник; 12 – газовідвідний трійник; 13 – керований високонапірний трубопровід; 14 – шарнірні крани газовідвідної гілки для реверсування; 15 – шарнірні крани повітроподавальної гілки для реверсування; 16 – шланг високого тиску; 17 – високотемпературний шланг; 18 – кисневий шланг; 19 – кисневий балон; 20, 21 – отвори для встановлення реперних датчиків зсуву та термопар; 22 – установка для реперних лінійок зсуву; 23 – з'єднувальна коробка мережних кабелів термопар і реперних датчиків зсуву; 24, 25 – мережний кабель для живлення термопар, реперних датчиків зсуву та витратоміра; 26 – витратомір для визначення подачі дуттьової суміші; 28 – розпалювально-контрольний отвір; 29 – паровий ресивер; 30 – газовідвідний трубопровід; 31 – засувка для відбору проб газу

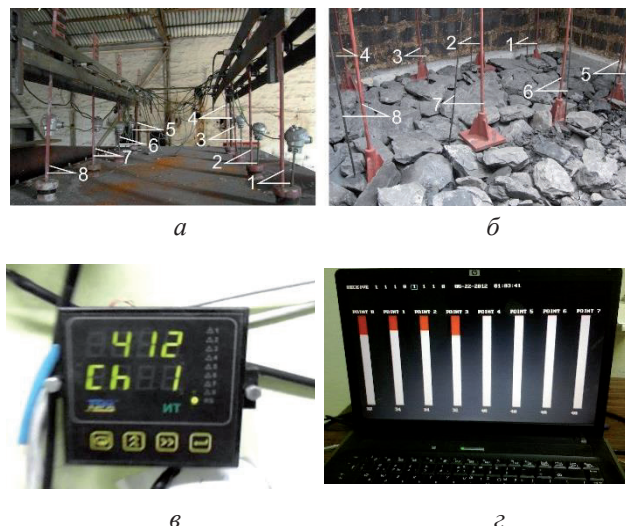


Рис. 2. Візуалізація системи контролю температурного поля та зсуву порід: а – відображення оголовок датчиків переміщення та термопар; б – місце встановлення датчиків переміщення та термопар у масиві; в – пристрій для фіксації температур; програмне відтворення переміщення порід у режимі реального часу (1–8 – система термопар і датчиків зсуву)

Приймаємо довжину реакційного каналу 1,9 м в умовах моделі підземного газогенератора. Діаметр реакційного каналу приймається з урахуванням потужності пласта $d_k = 20$ см.

Для імітації процесу СПГВ проводяться горизонтальні свердловини (повітроподавальна та газовідвідна), що з'єднуються з реакційним каналом. Відповідно, їх діаметри відповідають діаметру реакційного каналу та становлять 20 см

Безпосередня покрівля представлена пісковиками, сірими сланцями з прошарками глинистого сланцю міцністю $f = 3-4$ і потужністю 3,2 м. Основна покрівля, потужністю 6 м, представлена піскуватим сланцем міцністю $f = 5-8$. Виходячи з вертикальних розмірів стенда, приймаємо масштаб активної породної товщі 1:6, тоді потужність, м:

– безпосередньої покрівлі

$$h^I_c = \frac{h^I_{ch}}{M} = \frac{3,2}{6} = 0,53;$$

– основної покрівлі

$$h^0_c = \frac{h^0_{co}}{M} = \frac{6}{6} = 1,0.$$

Загальна потужність надвугільної товщі, м

$$h^I_c = h^I_c + h^0_c = 0,53 + 1,0 = 1,53.$$

Для дотримання кінематичної подібності встановлюємо масштаб часу

$$C_\tau = \frac{\tau_n^i}{\tau_c^i},$$

де τ_n^i – час переміщення частинки в натурних умовах від однієї точки до іншої; τ_c^i – час переміщення однієї частинки між точками на стенді.

На проектному підземному газогенераторі мінімальна швидкість посування вогневого вибою складе $V_h = 2,3$ м/доб.

Приймаємо $C_t = 40$, при $C_l = 40$; $V_h = 2,3$; $l_m = 2,2$ м; $\tau = 1$ доба; $l_m = 2,2$ м; $0,096$ м/год – масштаб швидкостей.

Час вигазовування моделі підземного газогенератора становитиме, діб.

$$C_v = \frac{V_h}{V_c} = \frac{2,3}{2,2} = 1,1.$$

Механічна подібність моделі газогенератора досягається дотриманням рівності

$$\frac{C_p}{C_p \cdot C_l^2 \cdot C_v^2} = 1,$$

де C_p , C_v – масштаби, відповідно, швидкості та тиску.

Породна товща (безпосередньої й основної покрівлі) моделювалася з порід, що безпосередньо залягають над пластом і взятих у натурних умовах. Для створення подібності монолітності та теплопровідності порід безпосередньої й основної покрівлі породні куски скріплювалися сумішшю шамотної глини й цементу (4:1). Зразкова густина масиву складала різницю від природної 25%. Середня густина породної товщі в натурних умовах складає $\gamma = 1,45$ т./м³, звідси можна визначити масштаб густини, т./м³

$$C_p = \frac{\gamma_H}{\gamma_c} = \frac{1,45}{1,45 \cdot 0,75} = 1,32.$$

Масштаб тиску складе, кг/см²

$$C_p = C_p \cdot C_l^2 \cdot C_v^2 = 1,32 \cdot 40^2 \cdot 1^2 = 2112 \text{ т./м}^2 = 21,12,$$

де C_p , C_l , C_v – масштаби густини, лінійний та швидкостей.

Тиск на вугільний пласт c_6^1 у натурних умовах, при середній глибині залягання пласта $H_n = 135$ м і середній густині порід, що покривають пласт, $\gamma_n = 1,75$ т./м³, складе, кг/см²

$$P_H = H_n \cdot \gamma_n = 135 \cdot 1,45 = 196 \text{ т./м}^3 = 19,6.$$

Тиск на вугільний пласт (P_c) у модельованих умовах складе, кг/см²

$$P_c = \frac{P_H}{C_p} = \frac{19,6}{21,12} = 0,92.$$

При висоті моделі $2,5$ м і $\gamma_c = 1,45 \cdot 0,75 = 1,1$ т./м³ фактичний тиск буде, кг/см²

$$2,5 \cdot 1,1 = 2,75 \text{ т./см}^2 = 0,275.$$

При прийнятих значеннях C_t , C_l , C_v і C_p дотримується також індикатор гідромеханічної подібності

$$\frac{C_v \cdot C_t}{C_l} = \frac{0,8 \cdot 50}{40} = 1$$

та критерій гомохронності

$$H_0 = \frac{v' \cdot \tau'}{l'} = \frac{v'' \cdot \tau''}{l''},$$

де v' – швидкість переміщення матеріальної точки в натурі, м/доб; τ' – час переміщення цієї точки, діб; l' – шлях, що проходить матеріальна точка за час τ' , м; v'' , τ'' , l'' – відповідно, швидкість, час і шлях подібної матеріальної точки на моделі

$$H_0 = \frac{0,8 \cdot 50}{40} = 1.$$

Критерій Фруда $F_r = \frac{gl}{v^2}$, критерій Ейлера $E_u = \frac{P}{\rho v^2}$ і критерій Рейнольдса $R_e = \frac{\rho v l}{\mu}$ не витримуються. Як відомо, одночасне дотримання вказаних критеріїв практично неможливе.

Крім того, у даному випадку, вплив параметрів густини ρ , сили тяжіння g і в'язкості μ для цілей вирішуваної задачі не мають істотного значення.

За проектом продуктивність підземного газогенератора 74 т./доб вугілля. При теплотворній здатності вугілля 8134 ккал/кг загальне тепловиділення, ккал/доб.

$$Q_{\text{заг}} = 74000 \cdot 8134 = 6,02 \cdot 10^8.$$

Кількість тепла (q), що виділяється при вигазовуванні 1 п.м вогневого вибою, становить, Дж/доб.

$$q = \frac{6,02 \cdot 10^8}{30} = 2,01 \cdot 10^6 \text{ ккал/доб} = 4186,8 \cdot 2,01 \cdot 10^6 = 0,84 \cdot 10^{10}.$$

При $C_l = 40$ м/м і ширині моделі $2,0$ м протяжність ділянки вогневого вибою, відповідна ширині моделі, складе $1,9$ м. Тепловиділення на ділянці вогневого вибою протяжністю $1,9$ м, Дж.

$$0,84 \cdot 10^{10} \cdot 1,9 = 1,6 \cdot 10^{11}.$$

Згідно з проектом установки ПГВ, приплив підземних вод до вигазованого простору складатиме $1,75$ м³/год (42 м³/доб). На 1 п.м вогневого вибою $\frac{42}{30} = 1,4$ м³/доб. на вогневий вибій протяжністю $1,9$ м – $2,8$ м³.

За дотримання гідромеханічної подібності, кількість води, яка повинна надходити до елемента моделі, що виділяє тепло, складає

$$q_m = q_n \frac{C_t}{C_n \cdot C_l^2},$$

де q_n – кількість води, що надходить до вогневого вибою установки ПГВ; C_t , C_n , C_l – відповідно, масштаби часу, тиску та геометричний.

Ураховуючи висоту моделі $H_m = 2,5$ м, приймаємо $C_n = 135$ м/м. Тоді, м³/год.

$$q_i = 2,8 \cdot \frac{40}{135 \cdot 40^2} = 0,00052.$$

Масштабні коефіцієнти тепловіддачі та температур встановимо, використовуючи критерії

$$C_t C_\alpha = \frac{C_\lambda C_\tau}{\lambda_n} u \frac{\alpha_n l_n}{\lambda_n} = \frac{\alpha_m l_m}{\lambda_m},$$

де C_n , C_α і C_λ – масштабні коефіцієнти температур, тепловіддачі та теплопровідності; α_n , α_m – коефіцієнти тепловіддачі, відповідно, у природі та на моделі; λ_n , λ_m – коефіцієнти теплопровідності, відповідно, у природі та на моделі.

Приймаємо $C_\lambda = 1$. У цьому випадку

$$\frac{\alpha_n}{\lambda_n} l_n = l_m; C_\alpha l_n = l_m; C_\alpha = \frac{l_m}{l_n} = \frac{1}{40} = 0,025 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{доб} \cdot \text{град}}.$$

Використовуючи формулу, отримаємо

$$C_t = \sqrt{\frac{C_\tau C_l}{C_\lambda}} = \sqrt{\frac{0,025 \cdot 40}{1}} = 1.$$

Результати експерименту дослідження кроку обвалення порід наведені в таблиці.

Графічне відображення залежності зміни кроку обвалення порід від товщини штучно створеної оболонки наведене на рис. 3.

У загальному вигляді дану залежність можна записати

$$l_k = b_1 \cdot \delta^2 + b_2 \cdot \delta + b_3,$$

де $b_1 - b_3$ – емпіричні коефіцієнти, що залежать від розповсюдження термополя в масиві гірських порід.

Таблиця

Узагальнені результати кроку обвалення порід

Параметр	Значення параметра				
Товщина штучно створеної оболонки оплавлених порід, δ , м	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25
Крок обвалення порід покрівлі, l_k , м	1,2	1,3	1,5	1,9	3,1

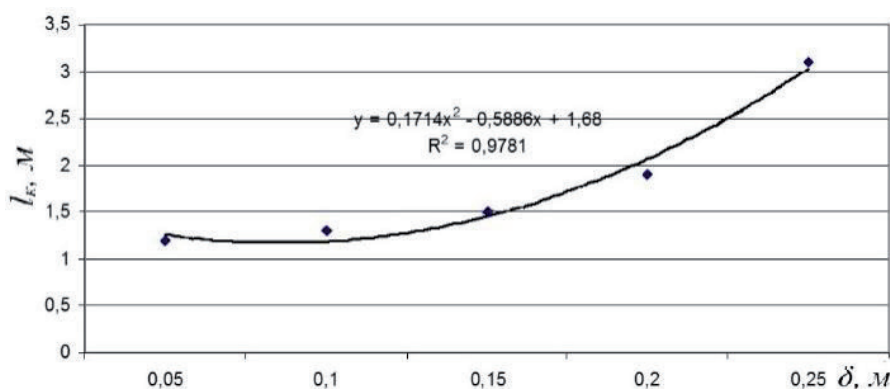


Рис. 3. Залежність зміни кроку обвалення порід l_k від товщини штучно створеної оболонки δ ,

Висновки. Крок обвалення порід від джерела газифікації l_0 збільшується від 1,2 до 3,1 м зі збільшенням товщини оплавленої штучно створеної оболонки в межах від 0,05 до 0,25 м за параболічною залежністю у слабометаморфізованих породах Західного Донбасу.

Урахування цієї залежності дає можливість забезпечити стійкий процес газифікації тонких та вельми тонких вугільних пластів і завчасно встановити крок обвалення порід для визначення ефективних способів керування гірським тиском і необхідних об'ємів дуттьової суміші.

Список літератури / References

- Lozynskyi, V.H., Dychkovskiy, R.O., Falshtynskiy, V.S. and Saik, P.B. (2015), "Revisiting possibility to cross disjunctive geological faults by underground gasifier", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no.4, pp. 22–28.
- Bondarenko, V., Tabachenko, M. and Wachowicz, J. (2010), "Possibility of production complex of sufficient

gasses in Ukraine", *New Techniques and Technologies in Mining*, CRC Press/Balkema, The Netherlands, pp. 113–119.

- Saik, P.B. (2014), "On the issue of simultaneous gasification of contiguous low-coal seams", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 6, pp. 33–37.

- Falshtynskyy, V., Dychkovskyy, R. and Lozynskyy, V. (2013), "Justification of the gasification channel length in underground gas generator", *Annual Scientific-Technical Colletion "Mining of Mineral Deposits 2013"*, CRC Press/Balkema, The Netherlands, pp. 125–132.

- Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля: монография / под общ. ред. О.В. Колоколова – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 281 с.

- Kolokolov, O.V. (2000), *Teoriya i praktika termokhimicheskoy tekhnologii dobychi i pererabotki uglya* [Theory and Practice of Thermochemical Technologies of Coal Extraction and Processing], Monograph, NMA of Ukraine, Dnipropetrovsk, Ukraine.

Цель. Установление зависимости шага опускания пород кровли от толщины искусственно созданных двухслойных оболочек, сформированных способом вариации температуры, давления при изменении состава дутьевой смеси, для формирования рабочего пространства геореактора, необходимого для беспрепятственного прохождения газовых потоков.

Методика. Проведение аналитических исследований базировалось на основе упругих и упруго-пластических деформаций, протекающих при изменении параметров искусственно созданных оболочек в горных породах в зоне действия температурного поля газогенератора. Для создания этих оболочек формируются необходимые температурные условия в очаге газификации и подаются паровоздушные смеси для оплавления пород на контакте геореактора. Эти оболочки имеют измененные деформационные характеристики в сравнении с массивом в природном состоянии и дают возможность корректировать шаг опускания пород кровли. Данный параметр устанавливался аналитически с применением известного уравнения Клапейрона-Менделеева, а также экспериментальным путем на специальной установке, разработанной учеными Национального горного университета. Для обработки данных и построения обобщающих зависимостей использован метод множественной регрессии и применены общепризнанные системы обработки данных таблиц Excel-2013.

Результаты. Выполнены многовариантные расчеты шага опускания пород, что является составляющей частью определения напряженно-деформированного состояния возле геореактора при различных мощностях искусственно созданной оболочки на контуре зоны газификации. Их соответствие проверено экспериментально на специальной стендовой установке. Полученные масштабные коэффициенты дали возможность получить реальные значения деформационных параметров для конкретных горно-геологических условий в виде установления геометрических размеров зон разрушения пород и определения необходимого пространства для беспрепятственного прохождения дутьевых смесей.

Научная новизна. Установлены зависимости шага перемещений боковых пород на контуре газогенератора от толщины двухслойной искусственно созданной оболочки, характеризующей развитие деформаций в породном массиве вокруг геореактора. Полученные расчетные формулы для определения шага опускания пород в зависимости от толщины искусственно созданной оболочки необходимы при выборе способа управления горным давлением и обеспечении рабочего пространства геореактора.

Практическая значимость. Предложен математический механизм для установления деформационных характеристик массива горных пород. Его эффективность экспериментально подтверждена на специальной стендовой установке. Полученные зависимости составляют инженерную методику по установлению шага опускания пород от толщины двухслойной искусственно созданной оболочки для обеспечения технологичности процесса газификации.

Ключевые слова: геореактор, дутьевая смесь, шаг опускания пород кровли, двухслойная искусственно созданная оболочка, управления горным давлением

Purpose. The determination of the dependence of the roof rocks subsidence spacing on the thickness of the artificial bilayer shell formed by the variation of temperature and pressure during changing the composition of the mixtures. It is necessary for creating the workspace of the gasogene. This space is created for unobstructed passing of gas flows.

Methodology. The analytical research was based on the elastic and elastic-plastic deformations that occur in changing the artificial shell parameters in the zone influenced by the gas generator temperature field. For the shell creation the necessary temperature is formed in the center of gasification; gas-vapour mixtures are fed to melt the rocks on contour of the gasifier. These shells have the changing properties in comparison with the natural rock massif. In addition, they allows predicting the spacing of the roof rocks subsidence. These parameters had been determined analytically using the well-known analytical equation of Clapeyron-Mendeleev and experimentally, using the special installation developed by the scientists of the National Mining University. To process the data and plot the summarizing dependencies we used the multiple regression method and applied universal Excel-2013 tables' data processing system.

Findings. The multivariate calculations of the rock subsidence have been carried out as a stage of determination of the stressed state around the georeactor for the artificial shells of various thickness on the gasification contour. Their compliance was tested experimentally on the special test site. The scale coefficients allow receiving the real parameters of deformations for geological conditions in the form of the established deformation and destruction zones of rocks and formation of the necessary space, which is required for the blowing mixtures passage.

Originality. The dependences of the rock displacement along the gas generator contour on the thickness of artificial bilayer shell, which characterizes the development of de-formations in rock mass around the gasogene. The formulas for calculation of the spacing of the rock subsidence depending on the thickness of artificial shells. It is necessary for the selection of the method of rock pressure control and providing the workspace of the gasogen.

Practical value. The mathematical mechanism for determination of the deformation characteristics of the rock massif was proposed. Its effectiveness has been proved experimentally on the special test site. The dependences make the base for the method of the subsidence spacing determination depending on the thickness of the bilayer artificial shell, which is aimed to provide the stability of gasification.

Keywords: georeactor, blowing mixture, roof rock subsidence, artificially created shell, stress-strain state

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Бузилом. Дата надходження рукопису 02.12.14.