



Том 17

Гірничча промисловість та геоінженерія

УДК 622.324: 622.278: 536.12

Агаєв Р.А., к.т.н., с.н.с. відділу проблему технологій підземної розробки вугільних родовищ

Ключєв Е.С., к.т.н., м.н.с. відділу проблем розробки родовищ на великих глибинах (Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, м. Дніпро, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИХОДУ МЕТАНУ ПРИ ТЕПЛОВІЙ ДІЇ НА ТВЕРДУ ВУГЛЕЦЕВМІСНУ СИРОВИНУ

На сьогоднішній день для паливно-енергетичного комплексу України існує потреба в пошуку додаткових джерел енергії. Одним із перспективних напрямків вирішення цього питання є комплексне освоєння вуглецевмісних ресурсів, які зосереджені в породних відвалах та мулонакопичувачах вуглезбагачувальних фабрик. Тому актуальним є вдосконалення існуючих геотехнологічних способів розробки родовищ, які дозволяють найбільш ефективно переробити вуглецевмісні поклади та отримати альтернативу природному газу – метан [1,2].

При цьому необхідно вирішувати ряд завдань, пов'язаних з отриманням даних про кількість та склад газової фази, що утворюється при фізико-хімічних перетвореннях твердої вуглецевмісної сировини та супроводжуються тепловиділенням у пористому середовищі.

Тому метою роботи є вивчення особливостей отримання метану при тепловій дії на тверду вуглецевмісну сировину та встановлення закономірностей його виходу в залежності від температури процесу. Для досягнення поставленої мети виконано експериментальні дослідження з визначення складу вуглецевмісної сировини, що дозволить отримати газову фазу з високим вмістом метану при тепловій дії на неї.

В якості матеріалу для проведення досліджень обрано сапроеліт й продукт переробки вугілля шахти (вугільний шлам) «Червоноградська» Львівсько-Волинського басейну. При оцінці показників речовинного складу, параметрів технічного та хімічного аналізів компонентів середовища використано методи математичної статистики та визначено необхідну кількість зразків матеріалу. Оцінка проведена за наступними показниками: вміст вуглецю, водню, кисню, азоту, загальної сірки, вологість, зольність, вихід летких речовин і хімічний склад золи (табл. 1, 2).

Таблиця 1

Результати елементного та технічного аналізів

Проба	C ^p , %	H ^p , %	N ^p , %	O ^p , %	S ^p _{заг} , %	W ^p , %	A ^d , %	V ^{daf} , %
Сапроеліт	34,8	2,5	0,7	3,2	0,3	1,8	56,7	52,2
Порода проба № 1	26,9	3,1	2,8	19,5	1,7	2,1	43,9	33,1
Порода проба № 2	26,2	3,1	2,8	19,8	1,7	1,6	44,8	37,6
Порода проба № 3	25,6	3,0	2,9	19,9	1,8	1,4	45,4	34,7
Порода проба № 4	26,8	1,8	2,9	20,4	2,8	1,2	44,1	39,9

Таблиця 2

Результати визначення хімічного складу золи

Проба	Вміст хімічних речовин, %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	MgO	K ₂ O + Na ₂ O
Сапроеліт	47,3	26,7	20,0	0,5	2,3	2,2	1,0
Порода	42,9	23,7	10,5	2,8	5,0	2,5	12,6

При аналізі отриманих даних (рис. 1) встановлено, що вихід метану у діапазоні від 400 °С до 900 °С для різних компонентів сировини відбувається за наступними залежностями:

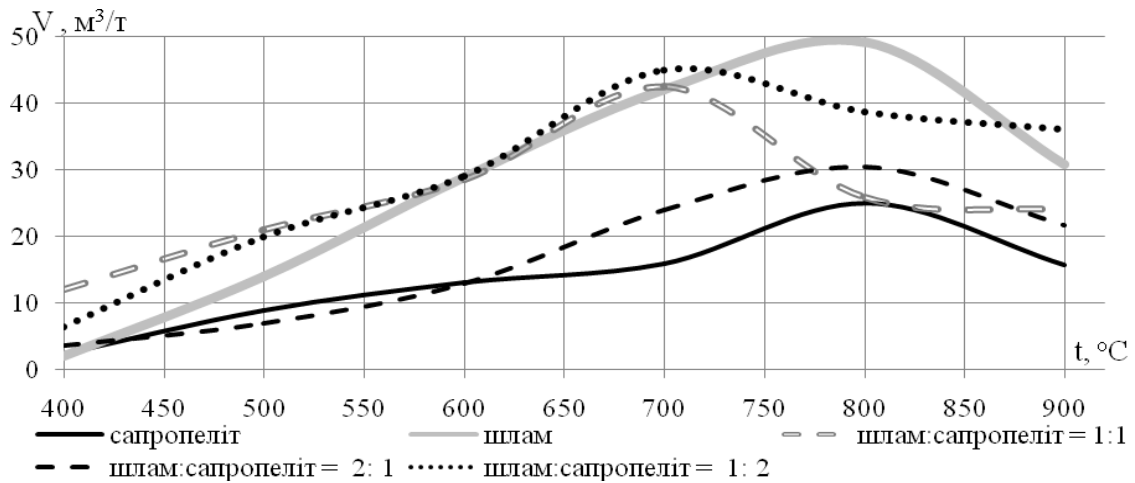


Рисунок 1. Зміна кількості метану в залежності від температури теплової дії на тверду вуглецевмісну сировину

– для сапропеліту: $V_{CH_4} = -0,0001 \cdot t^2 + 0,17 \cdot t - 49,86; R^2 = 0,84;$

– для породи: $V_{CH_4} = -0,0003 \cdot t^2 + 0,5 \cdot t - 157,37; R^2 = 0,91;$

– для бінарної суміші породи та сапропеліту у співвідношенні 1: 1:

$$V_{CH_4} = -0,0003 \cdot t^2 + 0,38 \cdot t - 89,79; R^2 = 0,78;$$

– для бінарної суміші породи та сапропеліту у співвідношенні 1: 2:

$$V_{CH_4} = -0,0003 \cdot t^2 + 0,39 \cdot t - 79,69; R^2 = 0,89.$$

– для бінарної суміші породи та сапропеліту у співвідношенні 2: 1:

$$V_{CH_4} = -0,0001 \cdot t^2 + 0,1852 \cdot t - 56,361; R^2 = 0,84.$$

Встановлено, що кількісний склад газової фази при тепловій дії на бінарні суміші сапропеліту і породи не відповідає сумарному кількісному складу газової фази, отриманої окремо із сапропеліту і породи. Це пов'язано, ймовірно, з можливим проявом каталітичних ефектів, що відбуваються при фізико-хімічних перетвореннях у вуглецевмісних породах. Наявність у мінеральному складі оксидів Fe_2O_3 і MgO сприяє прискоренню процесу розкладання органічних речовин, що підвищує вихід газової фази в 1,1-1,3 рази. Таким чином, вихід метану змінюється за параболічною кривою і в діапазоні температур від 700 °C до 800 °C має максимум. У подальшому вихід метану зменшується через його піроліз.

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що найбільша кількість метану утворюється при тепловій дії на вугільний шлам. Таким чином, експериментально підтверджено принципову можливість отримання метану для подальшого вдосконалення геотехнологічних способів розробки твердої вуглецевмісної сировини при здійсненні теплової дії.

Перелік посилань

1. Табаченко, М.М., Владико, О.Б., Хоменко, О.Є., & Мальцев, Д.В. (2012). *Фізико-хімічна геотехнологія*. Д.: Національний гірничий університет.

2. Agaiev, R., Vlasenko, V., & Kliuev E. (2014). Methane receiving from coal and technogenic deposits, *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, 113-120.

УДК 681.518.54

Прокопенко К.Н. м.н.с. кафедри підземної розробки месторождений
(Государственное ВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепр, Украина)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ДОБЫЧИ ГАЗА МЕТАНА ИЗ ГАЗОГИДРАТОВ

На сегодняшний день газогидратные технологии интенсивно развиваются, однако проблемы связанные с определением параметров образования и разрушения газогидратов требуют более детального и всестороннего изучения.

Проблему определения термодинамических и термобарических параметров возможно решить по средствам моделирования, поскольку проведение натурных экспериментов является затруднительным из-за большого размера газогидратного месторождения и как следствие больших затрат на проведение опыта. Решением данной проблемы является моделирование методом конечных элементов. В качестве программного комплекса выбран «ANSYS».

В качестве САД системы используется пакет «КОМПАС 3D V17.1», поскольку созданные графические объекты возможно перенести непосредственно в «ANSYS». Размеры исходной модели по средствам экспериментального подбора (альтернативные параметры приводили к затруднению расчетов, а также имели малую точность в конечном анализе в следствии того, что сетка конечных элементов имела малое количество конечных элементов и большой размер последних, а создание модели с меньшими размерами является неактуальным, поскольку газогидратное месторождение имеет большие размеры) составили 50 м × 50 м × 75 м. Было принято решение разбить объект на три составные части, такое решение обусловлено условиями существования в природе большинства газовых гидратов, мощность кровли составила 25 м и представлена песчаником (поскольку 87% разведанных месторождений были обнаружены включенными именно в таких породах); мощность газогидратной залежи составляет 20м (в природных условиях газогидратное тело имеет колебания по мощность, с целью упрощения расчетов рассматривается пласт постоянной мощности); подножье пласта представлено песчаником мощностью 30м. Поскольку известные системы разработки включают бурение, принято решение расположить скважину диаметром 0,4 м (поскольку для размещения оборудования и технических средств этого значения будет достаточно) и глубиной 37 м (обусловлено схемой отработки газогидратной залежи). Для ускорения и наглядности получаемых результатов расчета осуществляет симметричное сечение модели с осью в центре скважины.

С целью определения температурного воздействия активирующего агента необходимо осуществить тепловой анализ модели, для этого в параметры материалов и самой модели вносятся физические свойства и параметры. Затруднительным параметром является теплопроводность гидрата, поскольку не существует определенного значения, однако Пермяков М.Е. (Россия) вместе с коллегами в ряде лабораторных экспериментов выявил несколько значений при различных температурах, а также английские и американские ученые W.F.Waite , L.A. Stern, S.H. Kirby, W.J. Winters, D.H. Mason провели ряд исследований и получили некоторые значения, что позволило использовать данные значения в расчетах.

Агентом активатором используем морскую воду, поскольку она достаточно безопасна для окружающей среды, а также имеется в избытке вблизи морских залежей газовых гидратов. В качестве типичного морского месторождения используем Крымский шельф Черного моря. Температура поверхностных слоев составляет 18-24 °С , основываясь на этом, принимаем температуру агента 22 °С. Однако в зимний период необходимо подогревать воду. Температуру гидрата принимаем 4 °С, поскольку по данным исследовательского центра «MARUM» (Германия) температура залежи составляет 3-6°С. Для пород кровли и почвы пласта температура равна 18 °С ,

основываясь на том, что месторождение залегает на глубине 200 – 250 м ниже морского дна. Интересующие нас процессы теплообмена протекают между газогидратом и активирующим агентом, следовательно, если изолировать подаваемую воду в скважине, то теплообменом между породами возможно пренебречь. Поскольку вода присутствует и в газогидрате и в качестве активирующего агента, то возможно предположить, что принудительная конвекция происходит именно с водой, следовательно, можно принять коэффициент конвекции равным 600 Вт/мм^2 . Для контролируемости процесса диссоциации задаем время воздействия равное 20 ч (данное значение выбрано исходя из опыта иностранных исследований на месторождении Нанкай (Япония) и Маллик (Канада)). Минимальное значение потока составляет 100 Вт/мм^2 а максимальное 200 Вт/мм^2 .

По результатам исследования можно утверждать о следующем, что при данных условиях и модели максимальное тепловое воздействие с температурой 22°C наблюдается в диаметре 37,5 м от центра скважины, а минимальное 7°C в диаметре 49,7 м, промежуточные значения составляют для диаметра 46 м температура 13°C , диаметр 43 м температура 17°C , для 40 м температура 19°C .

Исследование напряжений невозможно без введения дополнительных физических параметров. Поскольку интересуют только напряжения в пласте гидрата, то для кровли, почвы и скважины необходимо установить жесткую фиксацию в исходной геометрической фигуре. Также в связи с невозможностью задать давление для всего гидратного пласта, поскольку он рассматривается как твердое тело, то задается внешнее давление, действующее на все грани пласта и равное 7 МПа, основываясь на значениях, полученных из скважины Субботина № 403 (на шельфе Черного моря).

Руководствуясь тем, что у газогидрата физические свойства как твердого тела схожи со льдом, возможно, принять следующие значения: плотность $900 \text{ кг}\cdot\text{см}^3$; модуль Юнга 0,1 МПа; коэффициент Пуассона 0,42. Поскольку в качестве агента выступает вода, а для нее не существует коэффициента Пуассона и модуля Юнга т.к. это несжимаемая жидкость, однако альтернативой является объемный коэффициент равный 2000 МПа, то принимаем именно его, плотность же равна $1000 \text{ кг}\cdot\text{см}^3$.

Основываясь на результатах исследования напряжений можно утверждать следующее, максимальное давление формируется у границ гидратного пласта и вмещающих пород и составляет 20 МПа, а минимальное в диаметре 37,5 м вокруг скважины составляет 3,3 МПа.

Основываясь на полученных модельных данных можно утверждать следующее: качественная зона диссоциации под действием температуры заключена в объеме тороида диаметром 37,5 м; продуктивное влияние давлением заключено в пределах сфероида диаметром 37,5 м; решение проблемы обработки граничных зон залежи заключается в том, что под влиянием температуры и давления происходят деформации смещающие граничные участки залежи на 11 м в направлении продуктивных зон диссоциации.

Комплексный подход к воздействию на залежь является перспективным поскольку исходя из исследований для заданного объема газогидратного тела возможно минимизировать затраты подаваемого агента основываясь на том, что для прогрева граничных участков пласта нет необходимости увеличивать подаваемое количество агента и его температуру, что в свою очередь, ведет к снижению ресурсозатрат и энергозатрат.

УДК 622.342

Судоплатов В.А. студент гр. ГРг-14-5

Научный руководитель: Яворский А.В., к.т.н., доцент кафедры подземной разработки месторождений

(Государственное ВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепр, Украина)

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТКИ МУЖИЕВСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Золото – один из самых ценных и востребованных металлов во всем мире. Оно трудно поддается естественному окислению и в связи с этим его активно используют в технике, электронике, медицине, ювелирном деле и во многих других отраслях. А также золото играет огромную роль в экономике государства.

Во времена СССР перспективе разработки золотоносных месторождений Украины не уделялось должного внимания, по причине разведки более богатых залежей золота в Якутии, Восточной Сибири и Северо-восточных районах страны. Однако после обретения Украиной независимости интерес к золоторудному потенциалу государства значительно повысился. По предварительным оценкам недра страны обладают достаточно большими запасами золота и со временем Украина способна занять одно из ведущих мест в Европе по его добыче. [1]. На рис.1 приведена карта золоторудных месторождений страны.



Рисунок 1. Карта месторождений золота в Украине

Так в пределах Береговского рудного поля разведано и начата эксплуатация Мужиевского золото-полиметаллического месторождения. Оно подготовлено к эксплуатации еще в 1990 году, а в 1999 году начата разработка Мужиевским рудником ЗАО "Полиметаллы Украины". По причине низкой эффективности производства и больших потерь при извлечении золота работы вскоре были приостановлены. Всего за время работы рудника (1999-2006 гг.) было добыто 800 кг золота. В настоящее время планируется возобновить разработку месторождения, однако конкретной информации об этом и пока что нет. [2].

Данное месторождение относится к вулканогенно-гидротермальному типу. Рудные тела представлены крутопадающими кварцевыми жилами с примесью халцедона, каолинита, гидрослюд. Содержание золота здесь варьирует в пределах 4,5-15 г/тону, а запасы золота, по разным источникам, оцениваются в 30-50 тонн. Глубина залегания золотовмещающих пород достигает до 200 метров. [3].

Мужиевское месторождение разрабатывали подземным способом. На его территории функционировали две шахты. Помимо золота данное месторождение также богато на цинк и свинец, запасы которых оцениваются в 1 млн. тонн. [4, 5].

При разработке месторождения целесообразно использовать систему разработки с закладкой выработанного пространства, осуществляя выемку руды горизонтальными слоями по восстанью. При этом необходимо искать способы повышения производительности труда и уменьшение расходов на добычу руды путем совершенствования техники и технологии закладочных работ, механизации и автоматизации производственных процессов, улучшение организации труда и управления, а также реконструкции рудника.

Следует отметить, что постоянное совершенствование конструкций буровых установок, увеличения их мощности, универсальности, а также увеличение стойкости бурового инструмента и постоянное снижение трудоемкости проходческих работ, проходку вертикальных выработок буровым способом на руднике можно считать перспективной и конкурентоспособной по сравнению с буровзрывным способом. [6].

Внедрение технологической схемы разработки тонких крутопадающих жильных месторождений с применением малогабаритных погрузочно-доставочных машин послужит снижению трудовых и материальных затрат и улучшению качества добываемой руды. Использование погрузочно-доставочных машин позволит вести селективную выемку на руднике и сократит разубоживание руды. Это обеспечит повышение содержания полезных компонентов в добытой руде на 20%, что значительно улучшает качество добываемой руды. [6].

Запасы золота Мужиевского месторождения в денежном эквиваленте приблизительно варьируются в пределах 2 млрд. долларов, а запасы цинка и свинца оцениваются в 1,6-1,8 млрд. долларов, при учете что рыночная стоимость одного грамма золота в Украине на сегодняшний день составляет около 43 долларов, а цинка и свинца соответственно 3 тыс. долларов за 1 тонну и 1,2 тыс. долларов за 1 тонну.

Государство несомненно должно финансировать добычу золота, а также стимулировать ее в виде предоставления налоговых льгот добывающим компаниям. Поэтому разработка Мужиевского золоторудного месторождения в некоторой степени должно повлиять на стабилизацию экономической ситуации и укрепление суверенитета Украины. При этом, следует провести детальный анализ запасов полезного ископаемого, применяемой системы разработки и технологии и необходимых материальных затрат для обеспечения рентабельности рудника.

Перечень ссылок

1. <https://www.photoukraine.com/russian/articles?id=81>;
2. <http://webmineral.ru/deposits/item.php?id=3450>;
3. <http://nuina.net/hde-mozhno-najty-y-dobyvat-zoloto-v-ukrayne-mestorozhdenyja-zolota-ukrayny-pryhodnye-dlja-staratelskoj-dobychy-karty-y-shemy/>;
4. http://studbooks.net/1789906/geografiya/tsena_voprosa;
5. <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2014/01/13/7009437/>;
6. Коровяка, Е.А. (2008). *Обоснование направлений совершенствования технологий разработки тонкожильных золоторудных месторождений Украины*, Днепропетровск, НГУ.

УДК 622.278

Лозинська Д.Г. студентка гр. 184-16-3 ГФ

Науковий керівник: Саїк П.Б., доцент кафедри підземної розробки родовищ
(Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпро, Україна)

ПОЛЬСКИЙ ДОСВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДЗЕМНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

Сутність технології підземної газифікації вугілля (ПГВ) 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) [1].

За кордоном перші експериментальні роботи із ПГВ були розпочаті після Другої світової війни. Експериментальні роботи проводилися у Польщі, Чехії, Бельгії, Великобританії, Франції, США і у низці інших країн [2]. У період енергетичної кризи особлива увага до досліджень процесу свердловинної підземної газифікації вугілля була проявлена у Бельгії, ФРН і США. При цьому розроблялися нові технологічні схеми і програми робіт із СПГВ на основі технологій, розроблених у СРСР [3, 4].

У Польщі (1949 р.) інженери Управління підземною газифікацією вугілля брали участь у бельгійських дослідженнях із підземної газифікації; з 1955 р. розпочалися експерименти з ПГВ у районі м. Катовіце [5].

Дослідний газогенератор був підготовлений шахтним способом у кам'яновугільному пласті (потужність 1,15 м, кут падіння 5 – 70 °), два паралельно пройдені штреки були з'єднані свердловинами. За результатами досліджень теплота згоряння газів СПГВ на кисневому дутті складала 6,7 – 8,4 МДж/м³ із складом горючих газів: СО – 28 %, Н₂ – 28 %, СН₄ – 2,2 % [3, 6].

У 1968 році у Польщі дослідження почали проводитись на експериментальних пілотних установках з газифікації вугілля. Більш широкі експерименти із апробації та вивчення технології газифікації вугільних пластів проводилися у 1983 – 1988 роках за проектом «Марс». Підземній газифікації піддавалися некондиційні кам'яновугільні пласти. Тривалість експериментів складала 9 – 18 днів. При цьому були отримані результати по генераторному газу із складом паливних газів: СО – 26,2 %, Н₂ – 37%, СН₄ – 6,1% та теплою згоряння 6,2 – 7,9 МДж/м³ при застосуванні кисневого дуття [5].

Проект виконувався у Головному інституті гірництва м. Катовіце. Очолював групу вчених професор Ян Паларські. У результаті були розроблені математичні моделі процесу підземної газифікації, технологічні схеми газифікації вугільних пластів за підняттям та за потужністю вугільного пласта з висхідним потоком газів (Вертикально-орієнтований метод газифікації вугільної товщі, 1986). У 2004 році професором Богданом Жакевічем (Дослідний Інститут Радикальних Технологій, м. Варшава,) була розроблена нова технологічна схема підземного газогенератора. Дана схема забезпечує техніко-технологічні умови параметризації спрямованості дії дуттьових сумішей на вугільний пласт із отриманням енергетичних продуктів (генераторний газ) та хімічної сировини [7].

Починаючи з липня 2007 р., на території Польщі почала відбулась реалізація великомасштабного спільного науково-практичного проекту «HUGE: Воднево орієнтована підземна газифікація для Європи», в якому брали провідні вчені та промисловці з України, Польщі, Німеччини, Бельгії та Англії. Загальна вартість проекту становила 3,6 млн Євро. Основні фінансові витрати припадають на Європейський фонд «Вугілля і сталі» [8 – 10].

Кінцевим результатом проекту була розробка та впровадження у експлуатацію експериментального газогенератора в умовах шахти «Барбара». Конструктивними особливостями газогенератора було передбачено підведення відкритого полум'я в розпалювальну нішу, яка монтувалася зі сторони бортового штреку і була ізольована фосфогіпсовою перемичкою. Подача дуття в розпалювальну нішу забезпечувалась через розпалювальну свердловину. Відведення продуктів згоряння здійснювалось по газовідвідному трубопроводу [11].

Аналіз польського досвіду впровадження підземних газогенераторів, ще раз доказав можливість отримання якісних енергетичних та хімічних продуктів на місці залягання вугілля шляхом його термохімічної переробки зі збереженням екологічних та економічних компонент процесу. Впровадження технології ПГВ дозволяє ліквідувати відвали шахтних порід, відходи вуглезбагачення, золошлаки теплових електростанцій і котельнь, димові викиди шкідливих продуктів згоряння вугілля, що є побічними продуктами при традиційному вуглевидобутку (механізованими комплексами).

Перелік посилань

1. Лозинський, В. Г., Саїк, П. Б., Паваленко, О. В., & Кошка, Д. О. (2010). Аналіз сучасного стану і перспективи промислового застосування свердловинної підземної газифікації вугілля в Україні. В *Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції “Школа підземної розробки”* (рр. 351-363). Дніпропетровськ: Національний Гірничий Університет.

2. Klimenko, A. Y. (2018). Early developments and inventions in underground coal gasification. *Underground Coal Gasification and Combustion*, 11–24. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100313-8.00002-5>

3. Фальштинський, В. С. (2009). *Удосконалення технології свердловинної підземної газифікації вугілля*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет.

4. Saptikov, I. M. (2018). History of UCG development in the USSR. *Underground Coal Gasification and Combustion*, 25–58. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100313-8.00003-7>

5. Stephens, D. R., & Miller, D. G. (1976). Soviet-bloc underground coal gasification results using enriched air and steam. [Gorlovskaya, Lisichausk, Podmoskovnaya, Mars Mine-Logizsa field scale experiments]. <https://doi.org/10.2172/7325761>

6. Wachowicz, J., Janoszek, T., & Iwaszenko, S. (2010). Model tests of the coal gasification process. *Archives of Mining Sciences*, 55(2), 249-262.

7. Дичковський, Р.О., Табаченко, М.М., Фальштинський, В.С., Лозинський, В.Г., & Саїк, П., (2017). *Адаптація технології свердловинної підземної газифікації вугілля*. Дніпро: Національний Гірничий Університет.

8. Stańczyk, K., Howaniec, N., Smoliński, A., Świądrowski, J., Kapusta, K., Wiatowski, M., Rogut, J. (2011). Gasification of lignite and hard coal with air and oxygen enriched air in a pilot scale ex situ reactor for underground gasification. *Fuel*, 90(5), 1953-1962. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.007>

9. Саїк, П., & Лозинський, В. (2016). Розвиток та впровадження технології підземної газифікації вугілля. В *Матеріали X міжнародної науково-технічної конференції “Школа підземної розробки”* (рр. 17-18). Бердянськ: Національний Гірничий Університет.

10. Stańczyk, K., Smoliński, A., Kapusta, K., Wiatowski, M., Świądrowski, J., Kotyrba, A., & Rogut, J. (2010). Dynamic experimental simulation of hydrogen oriented underground gasification of lignite. *Fuel*, 89(11), 3307–314. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.004>

11. 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: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 91-95. <https://doi.org/10.1201/b19901-18>

УДК 622.324.5

Лисенко Р.С., аспірант кафедри підземної розробки родовищ
(Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпро, Україна)

ГАЗОГІДРАТНІ ТЕХНОЛОГІЇ: СТВОРЕННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ТЕХНОГЕННИХ ГАЗОВИХ ГІДРАТІВ

Найважливішим питанням, як сучасного світу, так й України зокрема, є втілення технологій, пов'язаних з оновленням та збільшенням джерел надходження енергоресурсів. Перспективним у вирішенні цих завдань є інноваційний науковий напрям – розробка і використання газогідратних технологій, які нададуть можливість з більшою енергоефективністю збирати, зберігати і транспортувати природний газ, а також використовувати метан дегазаційних свердловин вугільних шахт та розробляти малодобітні родовища газу, що раніше було економічно невиправданим.

Основною перевагою застосування газогідратних технологій є здатність гідратів утримувати в 1 м^3 до 200 м^3 природного газу при атмосферному тиску та температурі $-15 \dots -20^\circ\text{C}$. Саме ця властивість дає змогу конкурувати газогідратним технологіям з технологією зрідження газу. Можливість тривалого зберігання газогідратів в холодильних камерах у стабільному стані дає змогу транспортування газу на значні відстані для подальшого його використання в якості енергоносія. Також газ, який підлягає транспортуванню в газогідратної формі, не детонує, на відміну від зрідженого газу, що є привабливим з точки зору безпеки технології. Саме тому, створення газових гідратів є досить актуальним, а створення відповідної технологічної схеми та установки – доцільним.

Пропонується технологічне рішення переведення газу в газогідратний стан з подальшим транспортуванням до споживача, яке реалізується в декілька етапів. На першому етапі вловлюється газ, який виходить з свердловини і при тиску 5–6 МПа і температурі $+1 \dots +3^\circ\text{C}$ перетворюється в твердий газогідратний стан у реакторі установки. На другому етапі гідрат примусово консервується шляхом зниження температури до $-15 \dots -20^\circ\text{C}$ і тиску до 1 атм. На цьому ж етапі гідрат дозується у форму гранул та складається у термокамері для зберігання, де за допомогою активного охолодження перебуває у стабільному стані. Далі готові гранули газогідрату транспортуються до місця знаходження бункера. Газогідрат зберігається в бункері за рахунок ефекту самоконсервації при зазначених раніше термобарических параметрах. Для виділення газу з газового гідрату достатньо підвищити температуру в бункері, внаслідок чого гідрат розкладається на газ і воду. Газ відводиться в систему газопостачання, а вода може бути повторно використана для створення газогідрату.

Одним з найважливіших параметрів для промислового використання даної технології є швидкість утворення газових гідратів. Без інтенсифікації цього процесу гідрат буде створюватись дуже повільно, понад 4 години і більше, що не є доцільним. Для прискорення гідратоутворення використовують дію фізичних полів та домішки різного хімічного складу. Також важливою частиною є конструкція та принцип роботи реактора гідратоутворення. Нові підходи у конструкціях реакторів продемонстрували вчені у роботі [1].

За допомогою способу формування гідрату, спричиненого впливом ударної хвилі у водно-пузирчастому середовищі при відповідних термобарических умовах гідратоутворення у реакторі та з додаванням поверхнево активних речовин у воду, що вступає в реакцію з газом, вдалося досягти майже миттєвого початку формування кристалів гідрату за фронтом ударної хвилі, яка фрагментує газові бульбашки. Це підвищує теплопередачу від міжфази та призводить до швидкого утворення гідратної оболонки навколо бульбашки. Весь процес цього способу триває всього пару мілісекунд, але лише газ, який міститься в бульбашках, може бути перетворений у газогідрат.

Вибухове кип'ятіння зрідженого газу в замкненому об'ємі води, викликане швидкою декомпресією робочої секції реактора, реалізується у другому способі. Цей процес передбачає формування збільшеної зони контакту фаз, інтенсивне змішування рідкої та газової фаз і охолодження середовища реактора, викликаного фазовим переходом. Всі вищезгадані чинники призводять до швидкого формування та зростання маси гідрату. Процес формування гідрату триває пару секунд. Але в цьому способі не весь газ у камері може бути перетворений в гідратний стан. Втрачений газ через вентиляцію можна легко повернути до системи та використати на повторному етапі.

В третьому способі реалізований циклічний процес гідратації газу киплячої конденсації. Як і в попередньому способі, висока швидкість утворення гідрату обумовлена утворенням збільшеної зони контакту фаз та наявністю примусової конвекції в рідині з бульбашками. Формування гідрату в триває півгодини, але в цьому способі весь газ в робочому об'ємі реактора зрештою переходить в гідратний стан.

Ідеї, розроблені в цих дослідженнях, можуть бути використані для створення нових енергоефективних та економічно вигідних методів швидкісного гідратуутворення. Перспективи розвитку створення техногенних газових гідратів підтверджуються роботою [2], де був зроблений порівняльний техніко-економічний аналіз транспортування природного газу морськими шляхами у вигляді газових гідратів та в зрідженому стані. Опрацьовано два сценарії технологічної лінії транспортування різного об'єму газу на різні відстані. Не зважаючи на те, що щільність газового гідрату менша, ніж щільність зрідженого газу, а значній об'єм гідрату займає вода, і що через це виникає необхідність у виділенні більшої площі під зберігання гідратів на транспортному судні, капітальні витрати на технологічну лінію транспортування газу в газогідратному стані зменшуються до 25% у порівнянні з технологією зрідження.

Оскільки Україна має суттєві запаси метану, що знаходиться у вугільних пластах, пропластках та оточуючих гірських породах, який може стати цінним енергоресурсом та використовуватися у якості палива шляхом переведення в газогідратний стан, розробка методу отримання газогідратів з шахтної метано-повітряної суміші та технологія їх транспортування надзвичайно актуальні та економічно доцільні. Комплексний підхід дозволить об'єднати технологію видобутку вугілля та метану в єдину систему.

Перелік посилань

1. Chernov, A.A., Pil'nik, A.A., Elistratov, D.S., Mezentsev, I.V., Meleshkin, A.V., Bartashevich, M.V., & Vlasenko, M.G. (2017). New hydrate formation methods in a liquid-gas medium. *Scientific Reports*, 7, 40809. doi: 10.1038/srep40809
2. Kanda, H. (2006). Economic study on natural gas transportation with natural gas hydrate (NGH) pellets. In *23rd World Gas Conference*. Amsterdam.

УДК 622.278

Демидов М.С., с.н.с. кафедри підземної розробки месторождений
(Государственное ВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепр, Украина)

К ВОПРОСУ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВЫЕМКИ УГЛЯ

Сегодняшние мировые энергетические реалии приводят к обострению отношений на энергетическом рынке. Украина по разведанным запасам угля в мире занимает седьмое место – 34,2 млрд т, общие запасы оцениваются в 117 млрд т, при этом запасы нефти и газа составляют 2,4 %.

Следует отметить, что количество угля, расположенного в пластах мощностью до 1,3 м, составляет 95 % всех запасов угля в Украине. Средняя динамическая мощность составляет 1,05 м. По мере исчерпания запасов этот показатель постоянно снижается. Причем глубина разработки увеличивается и в отдельных случаях достигает 1380 м. Снижение мощности пластов требуют качественного изменения технологии добычи угля. Этому также способствует необходимость разработки пластов, опасных по геодинамическим явлениям и горным ударам. В то же время широко распространилась концепция развития топливно-энергетического сектора. Уголь и другие ископаемые виды топлива с каждым годом все меньше влияют на энергетическую безопасность развивающихся стран в связи с использованием альтернативных технологий генерации электроэнергии [1].

Как отмечают авторы работы [2], использование традиционных методов добычи углей является неэффективным, морально устаревшим и экономически нецелесообразным. Поэтому стремительное развитие научно-технического прогресса способствует внедрению новых технологических решений выемки угля. К таким решением относится технология подземной газификации угля (ПГУ).

ПГУ – это технология, создающаяся на новом эргономичном и технико-экономическом уровне с исключением загрязнения окружающей среды при добыче и комплексной переработке угольных пластов на месте их залегания с получением высокотехнологичных продуктов в виде электрической и тепловой энергий, а также химического сырья [3].

Подземная газификация обеспечит возможность ликвидировать тяжелый труд шахтеров, вовлечь в использование запасы угля, сконцентрированные в некондиционных пластах, а также пластах, залегающих в сложных горно-геологических условиях, разработка которых невозможна или неэффективна. Отсутствие терриконов и золоотвалов позволит использовать поверхности подземных газогенераторов для сельскохозяйственных нужд.

Газификация угольных пластов требует меньших капитальных и эксплуатационных затрат по сравнению с подземным и открытым способами добычи топливного сырья и наземной газификацией угля, дает возможность получения более дешевого топливного газа, химического сырья и энергии.

Основным энергетическим сырьем при подземной газификации угля является генераторный газ. Широкий диапазон применения в дутьевых смесях различных газов в сочетании с повышенным наличием в дутье кислорода (O_2) обеспечивает селективность получения продуктов ПГВ и стабильность процесса газификации угольных пластов с учетом горно-геологических, техногенных и технических условий эксплуатации подземных газогенераторов [4, 5].

Освоение забалансовых и балансовых запасов шахт, которые ликвидируются или заканчивают свой срок существования, требует внедрения малозатратных, мобильных, комплексных и экологизированных технологий разработки, базирующихся на процессах скважинной подземной газификации угля, объединяющей добычу угля и энергохимическое его использование. Поэтому предлагаемые технологические решения направлены на создание нового направления угледобычи и переработки –

энергохимического комплекса со щадящей, замкнутой и экологически управляемой технологической системой, что позволит осуществлять эксплуатацию мобильных топливно-энергетических комплексов, основанных на прогрессивной комбинированной, экологически чистой, безотходной технологии.

Энергохимический комплекс на базе ПГУ – мобильно-модульное предприятие, обеспечивающее интенсивное наращивание продуктивности, качества и разнообразия органического топлива, как продукта газификации, что дает возможность динамичной и безущербной переориентации в выпуске конечного продукта в виде тепловой и электрической энергий, химических веществ за счет гибкоменяющихся технологических параметров с учетом условий динамического изменения горно-геотехнической обстановки [6-8].

Рентабельность и эффективность данных предприятий на базе энергохимического комплекса очевидна, что связано с ростом цен на нефть, газ и уголь, на которые влияют затраты на добычу, транспортирование, переработку, охрану окружающей среды и истощение балансовых запасов энергетического сырья.

Перечень ссылок

1. Giuliano, G. (2014). Western Europe and the Long Energy Crisis of the 1970s. *Europe in a Globalising World*, 147-164. https://doi.org/10.5771/9783845254272_147
2. Лозинський, В. Г., Саїк, П. Б., Паваленко, О. В., & Кошка, Д. О. (2010). Аналіз сучасного стану і перспективи промислового застосування свердловинної підземної газифікації вугілля в Україні. В *Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції “Школа підземної розробки”* (pp. 351-363). Дніпропетровськ: Національний Гірничий Університет.
3. Дичковський, Р.О., Табаченко, М.М., Фальштинський, В.С., Лозинський, В.Г., & Саїк, П., (2017). *Адаптація технології свердловинної підземної газифікації вугілля*. Дніпро: Національний Гірничий Університет.
4. Саїк, П., & Лозинський, В. (2016). Генераторний газ як альтернатива природному газу. В *Матеріали II міжнародної науково-технічної конференції “Газогідратні технології у гірництві, нафтогазовій справі, геотехніці та енергетиці”* (с. 34-35). Дніпро: Національний гірничий університет.
5. Саїк, П.Б., Лозинський, В.Г., Фальштинський, В.С., & Демидов, М.С. (2017). До питання дослідження процесу газифікації вугілля. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2(41), 94-101.
6. Hamaoka, A., Su, F., Itakura, K., Takahashi, K., Kodama, J., & Deguchi, G. (2017). Effect of Injection Flow Rate on Product Gas Quality in Underground Coal Gasification (UCG) Based on Laboratory Scale Experiment: Development of Co-Axial UCG System. *Energies*, 10(2), 238. <https://doi.org/10.3390/en10020238>
7. Falshtynskiy, V., Saik, P., Lozynskiy, V., Dychkovskiy, R., & Petlovanyi, M. (2018). Innovative Aspects of Underground Coal Gasification Technology in Mine Conditions. *Mining of Mineral Deposits*, 12(2), 68-75. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.068>
8. Mocek, P., Pieszczyk, M., Świądrowski, J., Kapusta, K., Wiatowski, M., & Stańczyk, K. (2016). Pilot-scale underground coal gasification (UCG) experiment in an operating Mine “Wieczorek” in Poland. *Energy*, (111), 3130321. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.087>

УДК 622.273.217.4

Петлёваний М.В. (Государственное ВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепр, Украина)

Зубко С.А. (ПІИ «Запорожский железорудный комбинат», г. Днепрорудное, Украина)

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТВЕРДЕЮЩЕЙ ЗАКЛАДКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УКРАИНЫ

Черная металлургия является ведущей отраслью экономики страны и в составе горно-металлургического комплекса (ГМК) обеспечивает значительные валютные поступления от экспорта продукции. Первичным сырьем в функционировании ГМК является сырая железная руда, добыча которой осуществляется как подземным, так и открытым способами [1]. В Украине железные руды подземным способом добывают около 15 млн т в Криворожском (8 рудников) и Белозерском месторождениях (1 рудник). В Кривбассе железные руды извлекаются с применением камерной системы разработки (55%) и подэтажным обрушением (45%) [2], а в условиях Белозерского месторождения камерная система разработки с твердеющей закладкой выработанного пространства (100%) [3, 4].

Извлечение рудных запасов в Кривбассе по существующей технологии не предусматривает заполнения выработанного пространства, вследствие чего подземные пустоты способствуют сдвигению массива горных пород, а на поверхности формируются воронки проседания, охватывающие значительные площади. Объем образованных непогашенных пустот по разным оценкам составляет более 30 млн м³, в результате чего под угрозой проседания и обрушений земной поверхности находятся гражданские и промышленные объекты и даже села. Вследствие сдвигения массива горных пород нарушается гидрологический режим подземных вод, усложняется ведение горных работ на глубоких горизонтах, ухудшаются условия проветривания рудника из-за утечек.

В результате технологического цикла добычи руды с твердеющей закладкой при освоении богатых железных руд Белозерского месторождения (Запорожский железорудный комбинат (ЗЖРК)) полностью предотвращено проседание земной поверхности, а в условиях шахт Криворожского региона, работающих без закладки (на примере ш. Гвардейская), наблюдаются многочисленные нарушения земной поверхности, вызванные образованием подземных пустот и, как следствие, воронок проседания, что проиллюстрировано на Рис. 1.

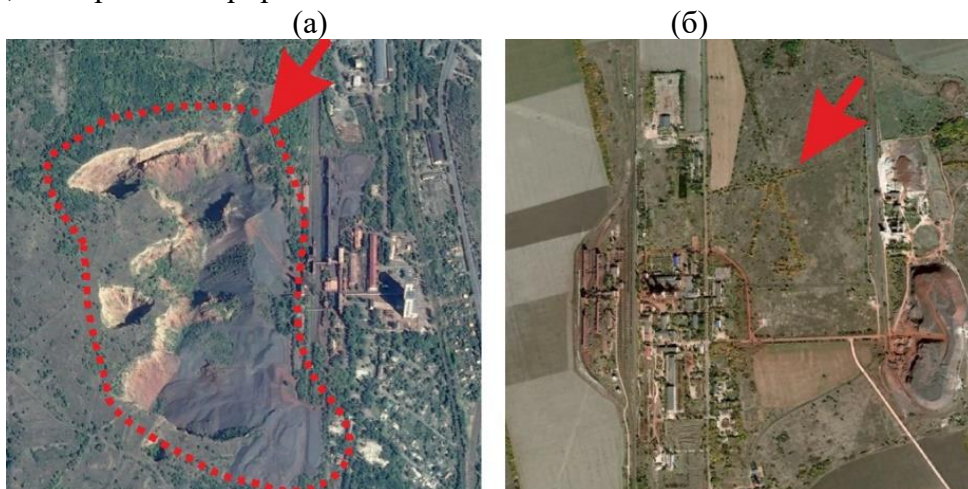


Рисунок 1. Состояние земной поверхности в пределах горного отвода железорудных шахт: (а) добыча руды без закладки (ш. Гвардейская, Кривбасс); (б) добыча руды с твердеющей закладкой (ЗЖРК, Белозерское месторождение)

В составе закладочных смесей утилизируются крупные объемы металлургических шлаков и отвальных пород, которые в результате физико-химической реакции образуют в подземном пространстве прочный монолитный массив [5, 6]. Внедрение системы разработки с твердеющей закладкой позволило достичь при разработке Белозерского месторождения более качественных показателей извлечения, чем при разработке железных руд Криворожья без закладки. Показатели потерь и разубоживания руды меньше в 2–2,3 раза [2, 7]. Учитывая опыт отработки Белозерского месторождения с закладкой, значительные запасы железных руд, залегающих под Криворожской агломерацией, и существенные объемы накопления промышленных отходов, представляется актуальным проведение научных исследований в области возможного применения различных видов закладки выработанного пространства в Криворожском регионе [8].

Таким образом, применение закладки выработанного пространства твердеющими смесями при разработке запасов железных руд Белозерского месторождения позволило достичь ряд технологических и экологических преимуществ, а именно:

- предотвратить проседания земной поверхности и обеспечить устойчивое состояние всего рудного массива и безопасность горных выработок;
- уменьшить вертикальные смещения рудопородного массива и замедлить развитие вторичной трещиноватости всего массива;
- сохранить целостность водоносных горизонтов и ограничить водоприток в горные выработки;
- снизить проектные и эксплуатационные потери, а также и разубоживание руды, вероятность обрушений пород лежачего и висячего бока залежи;
- утилизировать промышленные техногенные отходы в подземном пространстве;
- повысить герметичность шахтной вентиляционной сети.

Перечень ссылок

1. Ступник, Н.И., & Письменный, С.В. (2012). Перспективные технологические варианты дальнейшей отработки железорудных месторождений системами с массовым обрушением руды. *Вісник Криворізького Національного Університету*, (30), 3-6.
2. Четверик, М.С. (2012). Перспективные направления добычи руд в глубоких карьерах и шахтах Кривбасса. *Геотехнічна Механіка*, (104), 51-60.
3. Кузьменко, А.М., Петлёваный, М.В., & Усатый, В.Ю. (2015). *Твердеющая закладка при отработке рудных крутых залежей в сложных горно-геологических условиях*. Днепропетровск: Национальный горный университет.
4. Chistyakov, E., Ruskih, V., & Zubko, S. (2012). Investigation of the Geomechanical Processes while Mining Thick Ore Deposits by Room Systems with Backfill of Worked-Out Area. *Geomechanical Processes During Underground Mining – Proceedings of the School of Underground Mining*, 127-132. <https://doi.org/10.1201/b13157-23>
5. Петлёваный, М.В. (2010). Рациональное использование материалов при производстве закладочных работ на рудниках. *Геотехнічна Механіка*, (89), 131-140.
6. Петлёваный, М.В. (2012). Управление структурой твердеющей закладки при подземной добыче железных руд. *Горный Вестник*, 1(95-1), 198-202.
7. Кузьменко, А.М., & Петлёваный, М.В. (2014). Влияние структуры горного массива и порядка отработки камерных запасов на разубоживание руды. *Геотехнічна Механіка*, (118), 37-45.
8. Кузьменко, А.М., & Петлёваный, М.В. (2013). Состояние и перспективы развития закладочных работ на подземных рудниках Украины. *Геотехнічна Механіка*, (110), 89-97.