

© П.Б. Саїк<sup>1</sup>, В.Г. Лозинський<sup>1</sup>, В.С. Фальштинський<sup>1</sup>, М.С. Демидов<sup>1</sup>, К.А. Ганушевич<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛЬНО-ТЕПЛОВИХ ПОКАЗНИКІВ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

© P. Saik<sup>1</sup>, V. Lozynskyi<sup>1</sup>, V. Falshtynskyi<sup>1</sup>, M. Demydov<sup>1</sup>, K. Hanushevych<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## RESEARCH INTO HEAT AND MASS INDICATORS OF COAL GASIFICATION PROCESS

**Мета.** На основі проведених аналітичних та експериментальних досліджень встановити параметри матеріально-теплого та енергетичних балансів газифікації вугілля.

**Методика досліджень.** Для досягнення поставленої мети в роботі використано комплексний підхід, що включає проведення аналітичних та експериментальних досліджень. Аналітичні дослідження проводились за допомогою програмного продукту «МТБ СПГВ», а експериментальні – на установці, спроектованій та запатентованій на кафедрі підземної розробки НТУ «ДП», яка обладнана відповідною контрольно-вимірювальною апаратурою.

**Результати дослідження.** Розглянута можливість заміщення природних видів палива альтернативним енергоносієм – генераторним газом. Оцінено його теплотехнічні характеристики в порівнянні з природним газом. Висвітлено перебіг протікання матеріально-теплого та енергетичного балансів газифікації вугілля. За основу складання матеріально-теплого балансу беруть стехіометричні (за хімічними рівняннями) і термохімічні розрахунки. Проведення аналітичних досліджень дозволяє наочно відтворити ступінь теоретичної кількості використаних речовин та полегшує аналіз цифрових даних. Проведення експериментальних досліджень дозволяє враховувати зональність розповсюдження теплових полів навколо підземного газогенератора, що впливають та стабільність протікання реакцій в ньому і вихід горючих газів.

**Наукова новизна.** Встановлено розподіл виходу генераторних газів та хімічних продуктів при аналітичних та експериментальних дослідженнях, що дає можливість визначити ефективність ведення процесу газифікації вугілля з подальшою можливістю балансування дуттьових сумішей у підземному газогенераторі.

**Практичне значення.** Визначено хімічний та термічний ККД, що дозволить отримувати технічний або енергетичний направлено-якісний продукт з подальшим синтезом хімічних речовин, забезпечить високий ступінь збалансованості протікання фізичних та хімічних процесів у підземному газогенераторі.

**Ключові слова:** підземна газифікація, генераторний газ, матеріально-тепловий баланс, енергетичний баланс, хімічний та термічний ККД

**Вступ.** Генераторний газ отриманий при свердловинній підземній газифікації (СПГВ) за своїми теплотехнічними якостями може використовуватися на низці енергогенеруючих установках (котельні, ТЕС, когенераційні установки) для заміни традиційних енергоносіїв (вугілля, природний газ) [1-3]. Аналіз досвіду газифікації вугілля показав, що при комбінуванні подачі дуттьових сумішей у підземний газогенератор, можна отримати генераторний газ із стійким складом

горючих газів при середній їх теплоті згоряння від 3,5 до 13,0 МДж/м<sup>3</sup> [4-5]. Відображення чіткої картини основних енергетичних показників генераторного газу порівняно з іншими видами палива рис.1. дає нам загальне уявлення про генераторний газ як заміник природного палива [6].

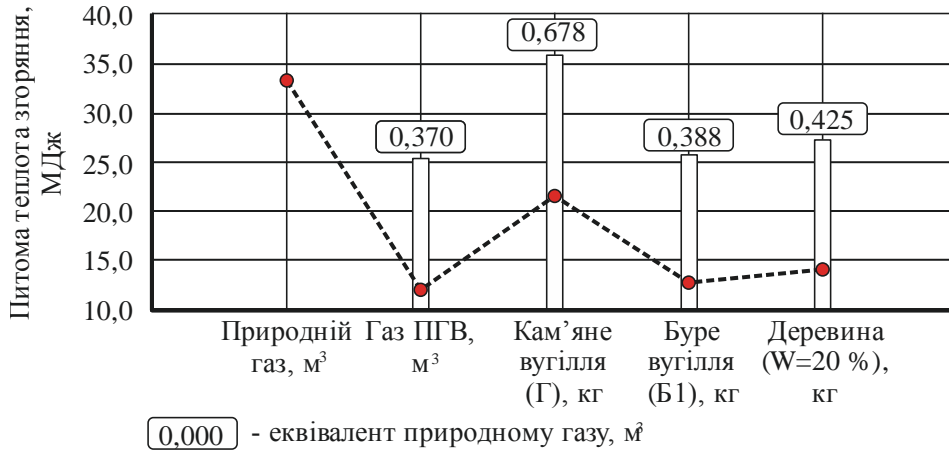


Рис.1. Графік енергетичної характеристики деяких видів палива

Як ми бачимо з аналізу графіків (рис.1), середня теплота згоряння газу ПГВ є найнижчою – 12,1 МДж/м<sup>3</sup>, що еквівалентно відповідає 0,370 м<sup>3</sup> природному газу. При використанні газів для виробництва електроенергії їх теплота згоряння в розглянутих межах 3,5 і 33,5 МДж/м<sup>3</sup> не є показником, який визначає ККД електростанції. Це пов'язано з тим, що в енергоустановках спалюється газ разом з повітрям, і чим вище теплота згоряння газу, тим більше витрачається повітря. Тому теплота згоряння горючих сумішей різної калорійності не відрізняється значно від теплоти згоряння газів. Наприклад, для суміші газу ПГВ з повітрям вона складе 2,1 МДж/м<sup>3</sup>, а для природного газу – 3,0 МДж/м<sup>3</sup>. [7, 8]. При тому при газифікації з одного кг кам'яного вугілля в середньому отримуємо 2,5 м<sup>3</sup> газу. Відповідно до еквівалента за природним газом один кг вугілля – 0,678 м<sup>3</sup> природного газу, а 2,5 м<sup>3</sup> газу ПГВ – 0,925 м<sup>3</sup> природного газу. Це дає нам можливість стверджувати, що за середньою теплоотою згоряння генераторний газ з врахуванням об'ємних показників не поступається природному.

**Постановка проблеми.** Одними із основних критеріїв, що характеризують ефективність отримання ресурсів ПГВ, є параметри матеріально-теплового та енергетичного балансів процесу газифікації. Тому необхідними є дослідження щодо визначення якісного та кількісного складу генераторного газу, а також отримання супутньої хімічної сировини. Це дозволить, залежно від гірничо-геологічних умов залягання вугілля, здійснювати оперативний аналіз ефективності газифікації вугільних площ на основі визначення енергетичних показників отриманого генераторного газу.

**Методика проведення досліджень.** Для моделювання розрахунку матеріального балансу використовується програма «Матеріально-тепловий баланс підземної газифікації вугілля» («МТБ ПГВ»), розроблена співробітниками кафедр підземної розробки родовищ та хімії Національного гірничого університету. Як

стверджує автор роботи [9], комп'ютерне моделювання фізико-хімічних процесів, що відбуваються в підземному газогенераторі, спрямовано на визначення: складу, теплотворної здатності та питомого виходу генераторного газу й інших продуктів газифікації, а також питомих витрат дуття, матеріального та теплового балансів газифікації.

У ній передбачено алгоритм розрахунку параметрів процесу свердловинної підземної газифікації вугілля, що пов'язані з термохімічними перетвореннями твердого палива в газоподібний стан і конденсат в умовах елементарного складу вугільного пласта, зовнішнього водоприпливу та теплового балансу підземного газогенератора.

Програма розрахунку параметрів матеріального-теплового балансу ПГВ враховує такі умови процесу: зміну техногенної ситуації в породовугільній товщі, що вміщує підземний газогенератор, з урахуванням гірничо-геологічних умов і технологічних параметрів процесу; зміну складу дуттьових сумішей та їх вплив на процес газифікації вугілля; зміну якісних і кількісних показників генераторного газу від якісного складу, структури вугільного пласта, вміщуючих порід і дуттьової суміші; вплив геометричних параметрів окислювальної і відновної зон реакційного каналу газогенератора на баланс показників кінетики хімічних реакцій і фізичних швидкостей; вплив на тепловий баланс інтенсивності вигазування вугільного пласта; вплив баластних газів процесу газифікації на якісні показники підземного газогенератора; обґрунтування параметрів балансу для прогнозу керованості показниками продукції станцій ПГВ. Отримавши цифрові значення, здійснюють їх аналіз і встановлюють організаційні та технічні рішення щодо управління процесом ПГВ; проводять очікувану економічну оцінку.

Дослідження якісного та кількісного складу генераторного газу здійснювалось на стендовій експериментальній установці [10]. Контроль за якісним складом генераторного газу проводився за допомогою газоаналізаторів ВХ-170, Casboard-3200L. Дані газоаналізатори призначені для оперативного вимірювання вмісту газів в атмосфері закритих приміщень, замкнених об'ємах, газових магістралях і т.д. Витрата дуттьової суміші та вихід кількості генераторного газу контролювався за допомогою витратомірів ІРВІС-К300, що обладнані перетворювачами сигналу. Принцип їх дії ґрунтується на вимірюванні частоти утворення вихів, які виникають в потоці дуттьової або вихідної сумішей при обтіканні нерухомого тіла.

Після отримання аналітичних та експериментальних даних проводилась їх порівняльна характеристика, що дала можливість оцінити збіжність отриманих результатів.

**Виклад основного матеріалу.** У матеріальному балансі кількість залучених у технологічний процес матеріалів (речовин) повинна дорівнювати кількості отриманих основних і проміжних речовин та відходів виробництва. При складанні матеріально-теплового балансу, використовують стехіометричні (за хімічними рівняннями) і термохімічні розрахунки. Складання балансів відбувається в дві стадії. Спочатку складають матеріальний, а потім на його основі – тепловий баланс.

Математичний процес газифікації описується системою рівнянь, що містять у собі рівняння збереження маси й енергії в газовій фазі, енергії в вугільній стіnce, рух газового потоку, стан ідеального газу, рівняння хімічних реакцій та їх кінетичні характеристики [11]. Протікання фізико-хімічних реакцій при підземній газифікації вугілля наведено в роботах вітчизняних та зарубіжних науковців [12-14].

Матеріальний баланс є кількісним вираженням закону збереження маси. Маса речовини, яка надійшла на технологічну операцію (прихід), дорівнює масі отриманих речовин (витрата) на виході з генератора. Матеріальний баланс складають за рівнянням сумарної хімічної реакції з урахуванням паралельних і побічних реакцій. В більшості випадків визначення маси речовини, що надійшла на переробку, розраховується окремо для твердої, рідкої та газоподібної фаз [15]:

$$M_m = M'_m, M_p = M'_p, M_z = M'_z, \text{ кг}$$

де  $M_m, M_p, M_z$  – відповідно маси твердих, рідких та газоподібних продуктів, що поступили на переробку, кг;  $M'_m, M'_p, M'_z$  – маси, отримані в результаті хімічного перетворення, кг.

Для практичних розрахунків враховують всі три фази (тверду, рідку, газоподібну) і частину продуктів, що не прореагувала. В такому випадку матеріальний баланс виражають рівнянням загального вигляду:

$$M_m + M_p + M_z = M'_m + M'_p + M'_z + M''_m + M''_p + M''_z, \text{ м}$$

де  $M''_m, M''_p, M''_z$  – маси непрореагованих продуктів, кг.

Рівняння матеріального балансу отримують з перерахунку на одиницю готової продукції, одиницю маси сировини або одиницю часу.

Для складання матеріального балансу необхідно знати хімічний склад, фізичні та фізико-хімічні властивості початкової сировини, відходів, основних і побічних продуктів [16]. Після проведення розрахунків, для яких використовують техніко-хімічні дані, результати обчислень оформляють у вигляді таблиці, яка складається з двох частин: отриманої та витратної. У кожній з них всі статті балансу викладають не тільки у вагових або об'ємних одиницях, але й у відсотках. Це дозволяє наочно відтворити ступінь теоретичної кількості використаних речовин та полегшує аналіз цифрових даних.

Тепловий баланс є кількісним виразом закону збереження енергії. Щодо теплових процесів хімічної переробки цей закон формулюється таким чином: кількість теплової енергії, принесеної в зону взаємодії речовин, дорівнює кількості енергії, яка винесена речовинами з цієї зони. Рівність приходу і витрати виражають рівнянням загального вигляду [17]:

$$Q_f + Q_e + Q_z = Q'_f + Q_n, \text{ МДж}$$

де  $Q_f$  – фізична теплота, яка впроваджується в технологічний процес з початковими речовинами;  $Q_e$  – теплота екзотермічних і фізичних переходів з одного агрегатного стану в іншій (наприклад, газифікація, плавлення, конденсація, розчинення, кристалізація, випаровування тощо).

Якщо тепловий ефект взаємодії негативний, то в законі збереження матерії й енергії величину  $Q_e$  переносять у витратну частину балансу;  $Q_3$  – теплота, яка введена в процес ззовні не бере участі в хімічних реакціях (наприклад, з паливом, паром);  $Q'_\phi$  – фізична теплота, яка виведена з процесу з продуктами реакції;  $Q_n$  – втрати теплоти в навколишнє середовище.

Складові теплового балансу розраховують за загальновідомими формулами. Фізичну теплоту  $Q'_\phi$  розраховують за виразом:

$$Q_\phi = Mct, \text{ МДж}$$

де  $M$  – маса початкової речовини, кг;  $c$  – середня теплоємність речовин при температурі їх вступу до реакції, МДж/кг·°С;  $t$  – температура початкових речовин, °С.

Теплота екзотермічних реакцій і фізичних переходів речовин з одного агрегатного стану в іншій береться з експериментальних даних або визначається термохімічним розрахунком.

Втрати теплоти в навколишнє середовище  $Q_n$ , зумовлені теплопровідністю порід навколо підземного газогенератора та конвекцією, розраховують за основними розрахунковими залежностями теплопередачі або отримують на основі практичних даних. Якщо це неможливо, то теплові втрати визначають за різницею між сумою приходу і втрат.

Теплова потужність підземного газогенератора регулюється подачею кисню ( $O_2$ ) в зону газифікації, при умові, що весь кисень бере участь у підземній газифікації. Ця умова не завжди виконується. Верхня межа теплової потужності підземного газогенератора обмежується законами кінетики процесу газифікації. За цими межами збільшення витрат кисню не дає бажаного ефекту, оскільки залишки кисню будуть проходити через зону газифікації, не встигаючи взяти участь у реакціях. Стаціонарний режим газифікації утвориться у випадку збалансованого тепловиділення  $Q_t$  і теплових втрат  $Q_n$  в зоні газифікації. Якщо  $Q_t > Q_n$ , то температура в зоні підземного газогенератора збільшується, а при  $Q_t < Q_n$  температура буде поступово знижуватись, що призведе до затухання підземного газогенератора. Вогневий вибій переміщається з двох основних причин – внаслідок конвективного переносу тепла, при нагріванні порід гарячими продуктами газифікації, та при вигорянні вугільного пласта.

Енергетичний баланс процесу газифікації виражає кількісну відповідність між витратою та надходженням енергії в окислювальну ( $E_{ок}$ ) та відновну ( $E_{від}$ ) зони підземного газогенератора і включає зміну запасів енергетичних ресурсів. В загальному вигляді сумарна енергія окислювальної зони визначається за формулою:

$$E_{ок} = E_{ок}^1 - E_{ок}^2 - E_{ок}^3 - E_{ок}^4, \text{ МДж},$$

де  $E_{ок}^1$  – енергія згоряння вугілля в окислювальній зоні, МДж;  $E_{ок}^2$  – енергія, що витрачається на випаровування води, МДж;  $E_{ок}^3$  – енергія, що витрачається на нагрів повітря, МДж;  $E_{ок}^4$  – енергія, що розсіюється у породах, МДж.

Вищенаведені параметри енергії, що є складовими показниками сумарної енергії окислювальної зони підземного газогенератора, визначаються за такими формулами:

$$E_{ок}^1 = Ql_{ок}b_{ок}m\gamma, \text{ МДж},$$

де  $Q$  – теплота згоряння вугілля, МДж/кг;  $l_{ок} = (0,27 \dots 0,32)l_{р.к.}$  – довжина окислювальної зони підземного газогенератора, м ( $l_{р.к.}$  – довжина реакційного каналу підземного газогенератора);  $b_{ок}$  – ширина окислювальної зони підземного газогенератора, м;  $\gamma$  – густина вугілля, кг/м<sup>3</sup>.

$$E_{ок}^2 = qM_{ок}^{H_2O}, \text{ МДж,}$$

де  $q$  – питома теплота пароутворення води, МДж/кг;  $M_{ок}^{H_2O}$  – кількість води в окислювальній зоні підземного газогенератора, кг.

$$E_{ок}^3 = Vl_{ок}b_{ок}m\gamma Q_{нов}^{м^3}, \text{ МДж,}$$

де  $V$  – об'єм повітряного дуття, що подається в підземний газогенератор, м<sup>3</sup>;  $Q_{нов}^{м^3}$  – кількість енергії необхідної для нагріву 1 м<sup>3</sup> повітря, МДж.

$$E_{ок}^4 = \frac{E_{ок}^1 Q_{np}}{100}, \text{ МДж,}$$

де  $Q_{np}$  – кількість енергії, що розсіюється в породи, %.

Сумарна енергія відновної зони підземного газогенератора визначається таким чином:

$$E_{від} = -(E_{від}^1 + E_{від}^2) + E_{від}^3 + E_{від}^4 + E_{від}^5, \text{ МДж}$$

де  $E_{від}^1$  – енергія відновлення  $CO_2$ , МДж;  $E_{від}^2$ ,  $E_{від}^3$ ,  $E_{від}^4$ ,  $E_{від}^5$  – відповідно енергії, що необхідні для реакцій водяної пари та вуглецю,  $CO$  та  $H_2$ ,  $CO$  та  $H_2O$ ,  $S$  та  $O_2$ , МДж.

Для визначення вищезазначених параметрів енергії, що є складовими показниками сумарної енергії відновної зони, необхідно враховувати добуток між кількістю речовини вираженої у грамах, що чисельно дорівнює її молекулярній масі та енергії, що витрачається на утворення одного моля цієї речовини.

Якщо при проведенні розрахунків  $E_{ок} > E_{від}$ , то це означає, що енергії окислювальної зони достатньо для ефективного проведення процесу газифікації, крім цього для покращення складу продуктів ПГВ в дуттьову суміш можна додавати  $CO_2$ ,  $O_2$  та водяний пар.

Елементний та технічний склад вугілля, що враховувався при проведенні аналітичних досліджень наведено у табл.1.

Таблиця 1

Елементний та технічний склад вугілля

W <sup>r</sup> , %	W <sup>a</sup> , %	A <sup>c</sup> , %	S <sup>d</sup> , %	V <sup>daf</sup> , %	C <sup>daf</sup> , %	H <sup>daf</sup> , %
5,8	6,9	12	1,6	42,2	80,3	5,5
O <sup>daf</sup> , %	N <sup>r</sup> , %	Q <sup>r</sup> , МДж/кг	Y, г/см <sup>3</sup>	Довжина реакційного каналу, м	Потужність пласта, м	Водоприплив, м <sup>3</sup> /т
7,2	5,0	23,4	1,24	30	1,0	3

Формування породовугільного масиву на стендовій експериментальній установці проводилось у два етапи. На першому етапі відбувалось моделювання вугільного пласта, на другому – надвугільної товщі. Як еквівалентний матеріал використовувались куски вугілля розміром  $200 \times 150 \times 100$  мм, що за якісним складом відповідали досліджуваній ділянці; вугільний пил; вода та цемент марки 400. У пласті залишався простір для імітації нагнітальної та газовідвідної свердловин та каналу газифікації. Реакційний канал формувался із кусків вугілля фракцією 2,5 – 6,8 см, імітуючи гідророзрив пласта між експлуатаційними свердловинами.

Широкий діапазон застосування в дугтьових сумішах різних газів у поєднанні з підвищеною наявністю в дутті кисню ( $O_2$ ) забезпечує селективність отримання продуктів ПГВ і стабільність процесу газифікації вугільних пластів з урахуванням гірничо-геологічних, техногенних і технічних умов експлуатації підземних газогенераторів. Порівняльна характеристика із виходу горючих газів при аналітичних й експериментальних дослідженнях наведена на рис. 2.

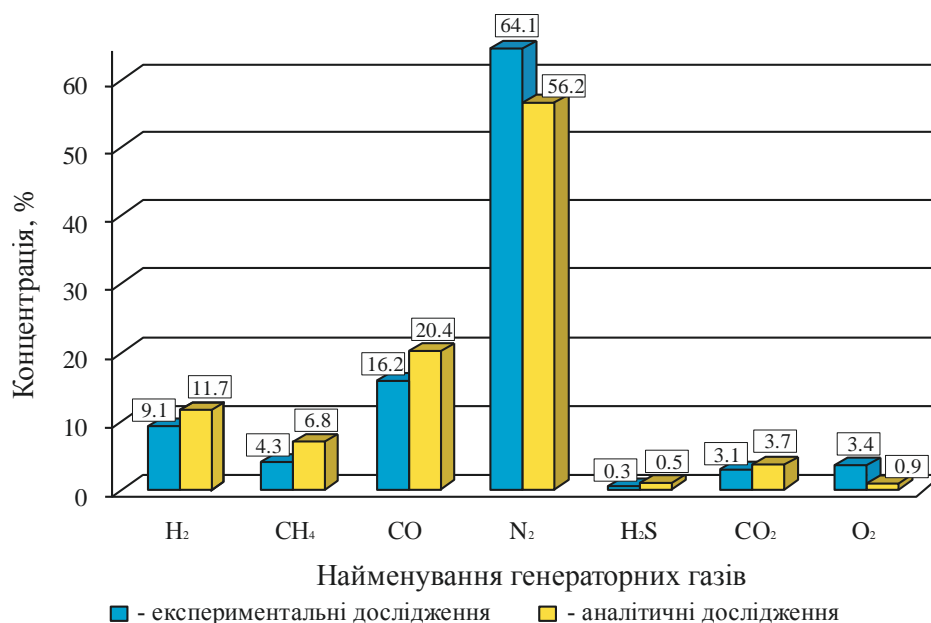


Рис. 2. Діаграма виходу генераторних газів за результатами експериментальних та аналітичних досліджень

Різниця між результатами досліджень коливається у межах 8 – 20 %. Така ситуація пов'язана з реакційними зонами (зони зональності за довжиною стовпа газифікації) [18], відображення яких аналітичними дослідженнями програмою «МТБ СПГВ» не має можливості. При цьому необхідно відмітити, що канал газифікації не тільки поділяється паралельно вогневою вибою, а й по його довжині залежно від типу хімічних реакцій [12]. В першій у газовому потоці ще міститься вільний кисень, внаслідок чого в ній переважають окислювальні реакції – окислювальна зона. Гетерогенні та гомогенні реакції в окислювальній зоні обумовлюють температуру газу на виході з неї. У другій частині вогневою вибою відбуваються відновні реакції – відновна зона. В результаті цих реакцій із органічної маси вугілля в основному утворюються чадний газ ( $CO$ ), водень ( $H_2$ ) і метан ( $CH_4$ ). Через наявність у вугіллі легких

речовин, вологи утворюються додаткові компоненти газових сумішей: сірководень ( $H_2S$ ), сірка ( $S$ ), аміак ( $NH_3$ ), бензол ( $C_6H_6$ ) тощо.

Серед чинників, що впливають на термомеханічний процес підземної газифікації, суттєве місце займають гірничо-геологічні умови [7, 12, 20, 21]:

– потужність – збільшення потужності вугільного пласта позитивно впливає на показник процесу підземної газифікації за рахунок зменшення тепловтрат на прогріву бокових порід;

– зольність – збільшення зольності вугілля зменшує теплоту спалювання ПГВ та ступінь вигазовування вугільних запасів;

– кут падіння – при похилому та крутому падінні забезпечується більш стійкий технологічний процес при достатньо високому коефіцієнті вилучення підготовлених запасів;

– структура вугільного пласта – зі зменшенням проникності погіршується процес збійки свердловин і газифікації;

– тектонічні порушення ускладнюють підготовку і ведення процесу ПГВ, збільшуються витрати дуттьової суміші та газу, знижується теплотворна властивість газу;

– величина напору підземних вод визначає тиск і режими проведення фільтраційної збійки свердловин;

– зрушення земної поверхні – при газифікації можлива розгерметизація підземного газогенератора через деформацію товщі порід над вигазованим простором.

Автори роботи [19] відзначили, що зміна температури горіння вугільного пласта в межах можливих значень від 900 до 1500°C призводить до збільшення розміру високотемпературної зони ( $T \geq 300^\circ C$ ) з 3,3 до 5,8 м, що дозволило встановити технологічний показник утилізації теплової енергії. При цьому температурний режим підземного газогенератора є одним із важливих чинників, що впливає на процес ПГВ, і є критерієм придатності вугільного пласта для процесу підземної газифікації вугілля. Вони зазначають: якщо в процесі газифікації плавиться покрівля та/або підшва вугільного пласта, то це може призвести до значних перевитрат реагентів, зменшення об'єму зони синтезу горючих газів, неможливості контакту вугілля з реагентами, закупоренні прохідних каналів і, врешті-решт, до повного загасання процесу ПГВ.

Одночасно з виробництвом енергетичного та технологічного газів можливе отримання великої кількості цінних хімічних продуктів, що можуть знайти застосування у хімічній промисловості. Серед різних хімічних сполук, що містяться в газовому конденсаті, необхідно, перш за все, відзначити групу фенолів та сполук аміаку, що дозволяє використовувати конденсат як азотне добриво.

Хімічні речовини, отримані з конденсату газу ПГВ, можуть відпускатися хімічним підприємствам як сировина (кам'яновугільна смола, бензол, аміачна вода, феноли, олефіни, ацетилен, піридинові основи тощо) або перероблятися на місці в кінцевий товарний продукт (сірка, технічні гіпосульфїти, поверхнево-активні речовини, розчинники, сажі, фарбники, полімери, нафталін тощо).



Під час проведення стендових досліджень було отримано також рідку фракцію конденсату. Проба була рідиною, забарвленою в ясно-зелений колір з наявністю твердих речовин з дьогтьовим запахом. При тривалому контакті з навколишнім середовищем вона набула темного кольору. Якісний склад показав відсутність іонів сульфїду, карбонату, родану, рН – 4,2. Кількісний склад хїмічних продуктів наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Кількісний склад хїмічних продуктів

№ п/п	Найменування речовини	Кількість хїмічних продуктів з 1 т вугїлля, кг
1	Феноли	0,92
2	Сїрководень	1,462
3	Аміак леткий	0,380
4	Аміак зв'язаний	0,316
5	Смолянисті речовини	0,668
6	Ароматичні з'єднання	0,012
7	Амонїй тїосульфату	13,76
8	Амонїй сульфату	3,316
Всього		20,834

Визначення кількісного складу основних хїмічних продуктів можливе при розрахунку матеріально-теплового балансу процесу підземної газифїкації. Порівняльна характеристика виходу хїмічних продуктів при експериментальних дослідженнях та комп'ютерному моделюванні наведена на рис. 3.

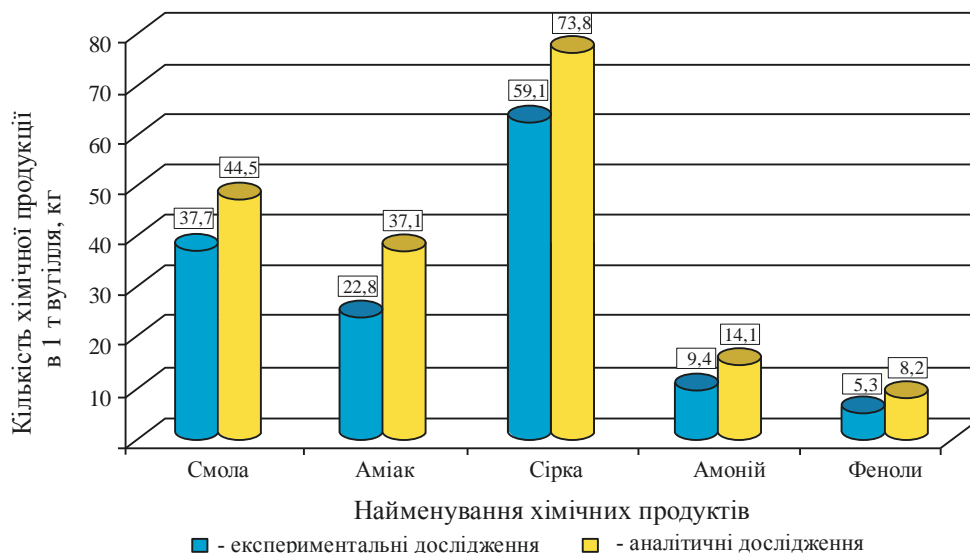


Рис.3. Дїаграма виходу хїмічних продуктів за результатами експериментальних та аналітичних досліджень

Процес газифікації ведеться з варіюванням дуттьовими сумішами, тому розбіжність між результатами стендових експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання склала до 20 %.

Для повнофакторної оцінки якості генераторного газу необхідно враховувати хімічний ( $\eta_x$ ) та термічний ( $\eta_t$ ) ККД процесу газифікації, що розраховується за формулами [20]:

$$\eta_x = \frac{Q_x^{gaz.}}{Q_{\phi}^{вуг.} + Q_x^{вуг.} + Q_{\phi}^{нов.}} \cdot 100 \%,$$

де  $Q_x^{gaz.}$ ,  $Q_x^{вуг.}$  – хімічне тепло відповідно отриманого генераторного газу та вугілля, МДж/кг;  $Q_{\phi}^{вуг.}$ ,  $Q_{\phi}^{нов.}$  – фізичне тепло вугілля та повітря необхідного для газифікації 1 кг вугілля, МДж/кг.

$$\eta_t = \frac{Q_{\phi}^{gaz.} + Q_x^{gaz.}}{Q_{\phi}^{вуг.} + Q_x^{вуг.} + Q_{\phi}^{нов.}} \cdot 100 \%$$

де  $Q_x^{gaz.}$  – фізичне тепло генераторного газу, МДж/кг.

З наведених вище формул встановлено, що показники хімічного ККД процесу газифікації дорівнюють 54,2 – 72,2 %, а термічного – 55,7 – 73,3 %. Це дозволить отримувати технічний або енергетичний направлено-якісний продукт з подальшим синтезом хімічних речовин, забезпечить високий ступінь збалансованості протікання фізичних та хімічних процесів у підземному газогенераторі.

**Висновки.** Перспективним напрямком власного енергоозброєння є дослідження в галузі підземної газифікації вугілля. Важливими складовими дослідженнями протікання процесу підземної газифікації є вивчення збалансованості фізико-хімічних реакцій та енергетичних показників. Дані дослідження дають можливість визначити раціональні параметри та режими процесу ПГВ, забезпечити високу енергоефективність та технологічність підземних газогенераторів залежно від зміни гірничо-геологічних умов, хімічного й якісного складу вугілля, а також конструктивних особливостей підземного газогенератора.

**Вдячність.** Представлені результати отримані у рамках виконання науково-дослідної роботи ГП-500 «Синтез, оптимізація та параметризація інноваційних технологій освоєння ресурсів газовугільних родовищ».

#### Перелік посилань

1. Saik, P., Petlovanyi, M., Lozynskiy, V., Sai, K., & Merzlikin, A. (2018). Innovative approach to the integrated use of energy resources of underground coal gasification. *Solid State Phenomena*, (277), 221-231.  
doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.277.221
2. Eissa, M. M. (Ed.). (2015). *Energy Efficiency Improvements in Smart Grid Components*.  
doi:10.5772/58493
3. 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.  
doi:10.3390/en10020238

4. 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. *Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції “Школа підземної розробки”*, 351-363
5. Saik, P., Falshtynskyi, V., Dychkovskyi, R., & Lozynskyi, V. (2015). Revisiting the preservation of uniformity advance of combustible face. *Mining of Mineral Deposits*, 9(4), 487–492. doi:10.15407/mining09.04.487
6. Альфа Інвест (2019). Retrieved from <https://a-invest.com.ua/aktualno/tabliitsa-teplotvornosti>
7. Колоколов, О.В. (2000). *Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля*. Днепропетровск: НГА Украины.
8. 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”* 34-35.
9. Жишкаріани, Т.С., & Бжалава, Н.П. (2005). Компьютерное моделирование расчета процессов газификации ископаемых углей. *Энергия*, 3(35), 24-28.
10. Фальштинський, В.С., Дичковський, Р.О., Руських, В.В., Саїк, П.Б., & Лозинський, В.Г. (2016) Стенд для дослідження процесів газифікації пластів твердого палива. *Патент №112375 на винахід*, Україна. Retrieved from <http://uapatents.com/5-112375-stend-dlya-doslidzhennya-procesiv-gazifikaci-plastiv-tverdogo-paliva.html>
11. Луценко, Ю.В., Шаршанов, А.Я., & Яровий, Е.А. (2008). Математическая модель образования горючих газов при подземной газификации угля. *Проблемы пожарной безопасности*, (28), 105-115.
12. Крейнин, Е.В. (2004). *Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье*. Москва: Недра.
13. Крейнин, Е.В. (1982). *Подземная газификация углей*. Москва: Недра.
14. Гайко, Г.И., Заев, В.В. & Шульгин, П.Н. (2012). *Утилизация тепловой энергии при подземной термохимической переработке угольных пластов*. Алчевск: ДонГТУ.
15. Бондаренко, В.И. (2011). *Обоснование критериев пригодности и параметров газификации угольных пластов Соленовского месторождения и пластов шахт МПО «Кузбасс»*. Отчет о НИР. Днепропетровск: Национальный горный университет.
16. Фальштинський, В.С., Дичковський, Р.О., & Станьчик, К. (2009). Обґрунтування параметрів матеріального і теплового балансу шахтного експериментального підземного і теплового балансу шахтного експериментального підземного газогенератора. *Форум гірників*, 77-83.
17. Lozynskyi, V., Dychkovskyi, R., Saik, P., & Falshtynskyi, V. (2018). Coal Seam Gasification in Faulting Zones (Heat and Mass Balance Study). *Solid State Phenomena*, (277), 66-79. doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.277.66
18. Lozynskyi, V., Saik, P., Petlovanyi, M., Sai, K., Malanchuk Z., & Malanchyk, Ye. (2018). Substantiation into mass and heat balance for underground coal gasification in faulting zones. *Inzynieria Mineralna*, 19(2), 289-300. doi:10.29227/IM-2018-02-36
19. Гайко, Г.И., Шульгин, П.Н., & Заев, В.В. (2012). Моделирование тепловых процессов в подземном газогенераторе методом конечных элементов. *Сборник научных трудов ДонГТУ*, (36), 61-70.
20. Дичковський, Р.О. (2013). *Наукові засади синтезу технологій видобування вугілля у слабометаморфізованих породах*, Д.: Національний гірничий університет.
21. Дичковський, Р.О., Табаченко, М.М., Фальштинський, В.С., Лозинський, В.Г., & Саїк, П.Б. (2017). *Адаптація технології свердловинної підземної газифікації вугілля*. Дніпро: Державний ВНЗ «Національний гірничий університет» Retrieved from <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/152333>

## АННОТАЦИЯ

**Цель.** На основе проведенных аналитических и экспериментальных исследований установить параметры материально-теплового и энергетических балансов газификации угля.

**Методика исследований.** Для достижения поставленной цели в работе использован комплексный подход, включающий проведение аналитических и экспериментальных исследований. Аналитические исследования проводились с помощью программного продукта «МТБ СПГУ», а экспериментальные – на установке, спроектированной и запатентованной на кафедре подземной разработки НТУ «ДП», которая оборудована соответствующей контрольно-измерительной аппаратурой.

**Результаты исследования.** Рассмотрена возможность замещения природных видов топлива альтернативным энергоносителем – генераторным газом. Оценены его теплотехнические характеристики по сравнению с природным газом. Освещены вопросы протекания материально-теплового и энергетического балансов газификации угля. За основу составления материально-теплового баланса, используют стехиометрические (по химическим уравнениям) и термохимические расчеты. Проведение аналитических исследований позволяет наглядно воссоздать степень теоретического количества использованных веществ и облегчает анализ цифровых данных. Проведение экспериментальных исследований позволяет учитывать зональность распространения тепловых полей вокруг подземного газогенератора, влияющих на стабильность протекания реакций в нем и выход горючих газов..

**Научная новизна.** Установленное распределение выхода генераторных газов и химических продуктов при аналитических и экспериментальных исследованиях дает возможность определить эффективность ведения процесса газификации угля с последующей возможностью балансировки дутьевых смесей в подземном газогенераторе.

**Практическое значение.** Определены химический и термический КПД, что позволит получать технический или энергетический направленно-качественный продукт с последующим синтезом химических веществ, обеспечит высокую степень сбалансированности протекания физических и химических процессов в подземном газогенераторе.

**Ключевые слова:** *подземная газификация, генераторный газ, материально-тепловой баланс, энергетический баланс, химический та термический КПД*

## ABSTRACT

**Purpose.** On the basis of conducted analytical and experimental researches, to establish the parameters of the heat and mass balance as well as energy balance of coal gasification.

**Methods.** In order to achieve this purpose, an integrated approach has been used, including analytical and experimental research. Analytical researches were carried out using the software product "MTB SPGV", and experimental ones – on an installation, designed and patented at the department of underground mining of Dnipro University of Technology which is equipped with the appropriate control and measuring equipment.

**Findings.** Findings. The possibility of replacing natural types of fuel with an alternative energy one – generator gas is considered. Evaluated its thermal characteristics compared to natural gas. The course of heat and mass, as well as the energy balances of coal gasification, is covered. The basis of making the heat and mass balance was used stoichiometric (by chemical equations) and thermochemical calculations. Conducting analytical studies allows us to visualize the degree of the theoretical amount of used substances and facilitates the analysis of digital data. The conduction of experimental

studies allows taking into account the zonality of the thermal field's distribution around the underground gasifier, which influences the stability of the reaction in it and the output of combustible gases.

**Originality.** The distribution of the output of generator gases and chemical products in the analytical and experimental studies is established, which makes it possible to determine the efficiency of conducting the process of coal gasification with the subsequent possibility of balancing the blowing mixtures in the underground gasifier.

**Practical implications.** The chemical and thermal efficiency, which will allow to receive a technical or energy directional-quality product with further synthesis of chemical substances, will provide a high degree of balance of the physical and chemical processes in the underground gasifier.

**Keywords:** *underground gasification, generator gas, heat and mass balance, energy balance, chemical and thermal efficiency*