

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО, КОМБІНОВАНОГО ТА БЕЗВІДХОДНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРНОГО ПІДПРИЄМСТВА

М. Табаченко¹, П. Саїк^{1*}, В. Лозинський¹, В. Фальштинський¹, Р. Дичковський¹

¹Кафедра підземної розробки родовищ, Національний гірничий університет, Дніпропетровськ, Україна

*Відповідальний автор: e-mail saik.nmu@gmail.com, тел. +380638662636

FEATURES OF SETTING UP A COMPLEX, COMBINED AND ZERO-WASTE GASIFIER PLANT

M. Tabachenko¹, P. Saik^{1*}, V. Lozynskiy¹, V. Falshtynskiy¹, R. Dychkovskiy¹

¹Underground Mining Department, National Mining University, Dnipropetrovsk, Ukraine

*Corresponding author: e-mail saik.nmu@gmail.com, tel. +380638662636

ABSTRACT

Purpose. Setting up and implementation of complex, combined and non-waste power-chemical plant based on underground coal gasification with regard to analysis of its technical and economic efficiency.

Methods. Research into the reliability of the gasifier plant components was performed by determining the sequence of processes and operations during underground coal gasification technology at all levels of the process.

Findings. It was established that high reliability of coal gasification is ensured by stability of all constituents of the technological elements of the process. The basic steps of combining power and chemical plant specializing in synthetic hydrocarbons production are described. During gasifier plant operation, upgrading of equipment at the general level of mechanization between 0.5 – 0.7 will not lead to a serious increase in productivity. Therefore, it is necessary to allocate means and efforts to completion of mechanization of all production processes.

Originality. The efficiency of mechanization and automation of processes at a gasifier plant is expressed through the formula of automatic control. We have identified dependencies describing changes in the mechanization efficiency of all technological units of the gasifier plant and productivity growth due to reducing the number of manufacturing operations.

Practical implications. Analytical research testifies that effective functioning of the gasifier plant is ensured by automation of all technological processes. Computer system conversion requires additional investments which exceed the costs of mechanization by 1.25 – 1.4 times.

Keywords: *underground coal gasification, gasifier plant, capital efficiency, energy feedstock*

1. ВСТУП

Традиційні способи видобування і переробки вугілля стають атрибутами застарілої, а головне не економічної технології, яка активно впливає на деградацію навколишнього середовища, в рамках якої методи одержання енергії з вугілля практично досягли межі свого розвитку. Спалювання органічного палива у топках електростанцій і котельнях призводить до забруднення атмосфери (Sivertsen, 2006). Наприклад, Придніпровська теплова електростанція, яка знаходиться на околиці міста Дніпропетровськ, що працює на вугіллі Західного Донбасу, щорічно викидає в атмосферу пил, сірчистий ангідрид, оксиди азоту, що у 2 – 3 рази перевищують допустимі норми. Наприклад, при роботі теплової електростанції (ТЕС) потужністю 1 млн кВт/добу спалюється близько

10 тис. т вугілля, при цьому утворюється близько 1000 т золи і шлаку (Khlorutskiy, 2014), що сприяють утворенню біля електростанції кола екологічного несприяття. Навколишні населені пункти стають заручниками свого роду газової камери. В цих умовах ліквідація негативних наслідків та повне залучення у господарський фонд відходів традиційного паливно-енергетичного комплексу і вторинних ресурсів стає важливою народногосподарською задачею.

Комплексне, комбіноване, безвідходне гірничо-хімічне підприємство забезпечує трансформацію різних традиційних підходів розвитку науково-технічного прогресу у вугільній промисловості (Li, Xu, & Chen, 2013). Це призводить до зміни пріоритетів у оцінці альтернативних варіантів оновлення виробничих процесів на основі прогресивних технологічних рішень. Замість традиційних кількісних пара-

метрів пріоритет одержують якісні фактори нетрадиційних технологій, що забезпечують максимальну ефективність використання корисних копалин за рахунок високого рівня функціонування екологічно чистих рішень.

Газифікація вугілля може стати альтернативою сучасній технології видобутку вугілля й забезпечити більш повне вилучення енергії шляхом перетворення твердого палива у газоподібні та рідкі вуглеводні (Yang, 2003). Технологія газифікації успішно вирішує технологічні та соціальні проблеми. Вона може стати екологічним санітаром навколишнього середовища від негативних наслідків впливу традиційного паливно-енергетичного комплексу (Kapusta, Stańczyk, Wiatowski, & Čećko, 2013). На разі, технологічний процес газифікації дозволяє ліквідувати утворення кислотних дощів і знизити парниковий ефект (Dubiniński & Turek, 2015; Yang, Zhang, & Liu, 2009). У даному контексті також необхідно відмітити, що

технологія свердловинної підземної газифікації вугілля (СПГВ) також дозволяє вигазовувати вугілля у складних гірничо-геологічних умовах (Lozynskiy, Dychkovskiy, Falshtynskiy, & Saik, 2015).

2. СХЕМНЕ РІШЕННЯ КОМБІНОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА СИНТЕТИЧНИХ ВУГЛЕВОДНІВ

У всіх промислово розвинутих країнах світу активувались пошуки нових джерел енергії, які здатні змінити сучасний стан паливно-енергетичного комплексу. В Національному гірничому університеті (м. Дніпропетровськ) виконані науково-дослідні та експериментальні розробки зі створення принципово нових технологій газифікації вугільних пластів (Falshtynskiy, Dychkovskiy, Lozynskiy, & Saik, 2015). Принципова технологічна схема комбінованого виробництва синтетичних вуглеводнів на базі СПГВ наведена на Рисунку 1.

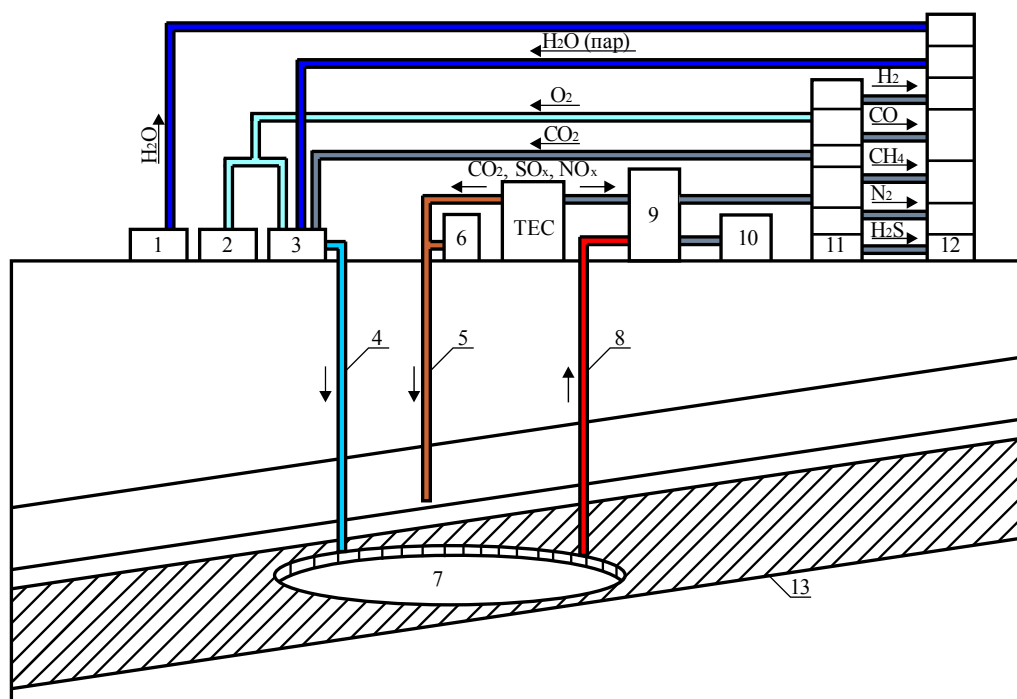


Рисунок 1. Технологічна схема комбінованого термохімічного виробництва синтетичних вуглеводнів: 1 – станція подачі води; 2 – компресорний цех; 3 – блок змішення дуття; 4 – дуттьова свердловина; 5 – свердловина для подачі закладного матеріалу і рециркуляційних газів; 6 – пневматичний закладний комплекс; 7 – підземний газогенератор; 8 – газовідвідна свердловина; 9 – установка для очистки від пилу; 10 – парогазова турбіна; 11 – мембранний газорозподільник; 12 – комплекс із хімічної переробки газів; 13 – вугільний пласт

Суть роботи технологічної схеми, наведеної на Рисунку 1, полягає у наступному. У підземний газогенератор 7 по дуттьовій свердловині 4 подають комбіновану дуттьову суміш, що дозволяє перетворювати вугілля пласта 13 у газоподібне паливо і вуглеводневу сировину. Частина утвореного газу поступає на ТЕС і парогазову турбину 10 для виробництва електроенергії. Другу частину направляють у мембранний газорозподільник 11 для селекції продуктів підземної газифікації на окремі компоненти, які потім поступають на комплекс з хімічної переробки газів 12.

Принципово новим у запропонованих технологічних рішеннях є перехід на безвідходне виробництво,

що передбачає утилізацію вуглекислого газу й кисню у підземному газогенераторі, які поступають у змішувач дуття 3 від мембранного газорозподільника 11. Частику пару, що одержують від охолодження теплоти реакцій у комплексі з хімічної переробки газів, направляють на інтенсифікацію процесу газифікації пластів у газогенератор 7, а іншу для виробництва електроенергії на парогазовій турбіні 10.

При впровадженні даної технологічної схеми газифікації вугілля димові вугільні гази, які складені з діоксиду вуглецю (CO_2), оксидів азоту (NO_x) та сірки (SO_x) з електростанції назад поступають у підземний газогенератор.

3. ЕТАПИ ЗАПРОВАДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО, КОМБІНОВАНОГО ТА БЕЗВІДХОДНОГО ВИРОБНИЦТВА ШТУЧНИХ ЕНЕРГОНОСІЇВ

Комбіноване та безвідходне виробництво – один із головних напрямків організації термохімічного виробництва синтетичних вуглеводнів, що дозволяє сформулювати окремі безвідходні укрупнені підприємства на базі:

- комплексів із виробництва штучного газу – енергоносія та синтез-газу на основі СПГВ з утилізацією у підземному газогенераторі відходів традиційного енерготехнологічного виробництва (золашлаків, шлаків вуглезбагачення, шахтних порід, металургійного й коксохімічного виробництв, димових викидів, твердих і токсичних відходів міст тощо), за допомогою якого можна підігрівати дуття для підземного газогенератора з метою інтенсифікації процесу;

- комплексів із органічного синтезу моторних палив, заміника природного газу, вилучення сірки й азоту;

- паро-, газотурбінних установок із виробництва електричної та теплової енергії;

- комплексів використання нових принципів утилізації викидної низько потенціальної теплоти, кооперації енергоносіїв;

- використання теплоносних систем для одержання теплоти підземних вод, геотермальної енергії, систем сонячного і породного електропостачання, біогазу, біомаси, вітрової енергії, тепла природних гірничих відвалів, водневої енергетики тощо.

Комбінування енергохімічного виробництва можна налагодити поступово в декілька етапів. На першому етапі створюється комбіноване підприємство у складі газогенераторного підприємства та теплової електростанції з повною утилізацією відходів ТЕС, гірничих, металургійних і коксохімічних заводів.

На другому етапі ТЕС повністю переводять на вугільний газ з утилізацією димових відходів. Пізніше встановлюють парогазові турбіни для додаткового виробництва електроенергії. Пар для турбін на цьому етапі одержують у теплообмінниках на теплових трубах чи з економайзера при когенерації енергії за рахунок використання вільнопоршневих двигунів (Kolokolov, Tabachenko, & Eishynskyi, 2000).

На третьому етапі впроваджується виробництво синтетичного моторного палива, заміника природного газу, сучасні когенераційні генеруючі виробництва електричної та теплової енергії з акумулюючими теплоносіями для зберігання.

На останньому (четвертому) етапі включається альтернативна енергетика із вторинних відновлювальних джерел енергії теплонасосних систем для утилізації низько потенціальної викидної теплоти. Забезпеченість комбінованого термохімічного виробництва синтетичних вуглеводнів штучним газом досягається впровадженням необхідної кількості підземних газогенераторів. Впровадження такої системи отримання штучних енергоносіїв забезпечує ідеальний варіант функціонування газогенераторного підприємства. Система, що характеризується забрудненням навколишнього середовища, перетворюється в оптимальну систему, яка запобігає деградації середовища життєдіяльності.

Ідеальний кінцевий результат досягається при наявності функції утилізації відходів ТЕС, але вона відсутня у структурному ланцюгу системи і, разом з тим, ця функція виконується у підземному газогенераторі при використанні цих відходів у якості сировини, яка передбачена технологічним процесом газифікації вугілля.

Таким чином, нова система комплексного, комбінованого та безвідходного виробництва штучних енергоносіїв уявляється ідеальною, оскільки в ній відсутня структурна ланка з утилізації відходів – її функцію “за сумісництвом” виконує підземний газогенератор.

Позитивним чинником при впровадженні безвідходного і “бездимного” енергохімічного виробництва штучних вуглеводнів на основі СПГВ є унеможливлення викидів вуглекислого газу, що вирішує, в деякій мірі, проблеми глобального парникового ефекту, який виникає внаслідок зростання концентрації діоксиду вуглецю в атмосфері через викиди диму вугільних електростанцій та котельень. Створення комбінованих підприємств термохімічної енергетики дозволяє перевести нафту і природний газ у категорію сировини для хімічного виробництва, а звільнені нафто-, газопроводи і розподільчі системи можуть бути використані для транспортування синтетичних рідких і газоподібних продуктів.

Не менш важливим аспектом є соціальна ефективність підземної газифікації: ліквідація важкої й небезпечної праці шахтарів, очищення від відходів навколишнього середовища, зниження захворюваності населення та ін. Тому, враховуючи постійне зростання теплоспоживання й збільшення димових викидів від теплоенергетичних об’єктів, для радикального зменшення задимленості атмосфери і, відповідно, зниження кислотних дощів і теплового забруднення, необхідний перехід на комбіноване безвідходне виробництво енергоносіїв (Zhong-Xian & Yi, 1986).

Широке промислове запровадження замкнутої безвідходної технології СПГВ дозволить очистити поверхню землі від відвалів породи, золашлаків, твердих побутових і токсичних відходів міст, ліквідувати викиди в атмосферу пилу, діоксиду вуглецю, оксидів сірки, азоту та інших шкідливих хімічних елементів (Falshtynskyi, Dychkovskyi, Lozynskyi, & Saik, 2013). Це прообраз одного із можливих варіантів безвідходної технології майбутнього, при цьому газогенераторне підприємство СПГВ є активним екологічним санітаром.

Отже, на деякому етапі розвитку цивілізації застосування термохімічної енергетики на базі СПГВ стає просто необхідним. В Україні запаси природного газу фактично вичерпані, тоді як запаси вугілля ще мають значний потенціал (Anishin, Piriashvili, & Chirkin, 2013). Така ситуація вимагає створення у регіонах сітки великомасштабних екологічно безпечних підприємств термохімічної енергетики у комплексі з установками пілотного типу для одержання рідких палив та інших хімічних продуктів. Практично перед нами постає питання про створення нової галузі на основі комбінованих і безвідходних екологічно безпечних енергохімічних комплексів.

Важливо відзначити, що переведення ТЕС на природний газ з екологічної точки зору також є небезпечним. Шкідливі димові викиди не зменшуються, зростає парниковий ефект, а транспортування газу з інших країн призведе до подорожання кінцевої продукції. Такий шлях вирішення екологічних проблем є ілюзією, яка не дозволяє знизити концентрації домішок шкідливих речовин в атмосфері.

Самостійним, цікавим і навіть символічним підсумком вищенаведених технічних рішень є факт того, що відпадає необхідність у високих димових трубах ТЕС і котельнях. Запропоновані технологічні рішення є значним кроком вперед на шляху екологічно безпечного технічного прогресу. Теплова електростанція і газогенераторне підприємство СПГВ можуть працювати як надійні партнери, одночасно оберігаючи природу від деградації. Це дозволить самим активним чином перетворювати відходи у доходи.

Вищенаведена енергетика представляє собою якісний стрибок у розвитку виробничих сил, яка дозволяє блокувати сировинну та екологічну кризи, що насуваються, і ввести корінний перелом у розвиток енергетики, хімії й видобувної промисловості.

Таким чином, реалізація системи комбінованого енергохімічного виробництва неминуче пов'язана із концепцією безвідходного виробництва. Це принципово новий чинник в економіці України.

4. ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО, КОМБІНОВАНОГО ТА БЕЗВІДХОДНОГО ЕНЕРГОХІМІЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА НА БАЗІ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

Прогресивні форми організації енергохімічного підприємства передбачають трансформацію традиційних підходів до планування технічного переозброєння виробничих процесів. Розвиток науково-технічного прогресу у вугільній промисловості передбачає зміну пріоритетів в оцінці альтернативних варіантів оновлення виробничих процесів на основі прогресивних технологій. Замість традиційних кількісних параметрів пріоритет одержують якісні чинники нетрадиційного виробництва, що забезпечують максимальну ефективність використання вугільних родовищ за рахунок високого рівня функціонування безвідходних технологічних схем з урахуванням взаємозв'язку ресурсного та екологічного факторів розвитку виробництва.

Цілком зрозуміло, що природне господарство України вже не може орієнтуватись на розвиток традиційного ресурсного потенціалу тими темпами, що спостерігались раніше. Це передбачає принципово новий перехід до стратегії соціально-економічного розвитку. Збалансований пропорційний розвиток економіки тепер пов'язаний із переведенням народного господарства на безвідходний тип виробництва, який базується на комбінованому, комплексному використанні природно-сировинних ресурсів, утилізації відходів та якості першочергового джерела сировини і матеріалів.

Під безвідходною технологією необхідно слід розуміти метод функціонування виробництва з мінімальними витратами ресурсів, які забезпечують ком-

плексну переробку вихідної сировини й максимальну утилізацію утворених відходів (Ribbing, 2007). Перехід від екстенсивних форм експлуатації природних ресурсів до інтенсивних корінним чином змінює ступінь технологічного впливу виробництва на навколишнє середовище.

Ознакою безвідходного виробництва є його мінімальна природоємність, що дозволяє за рахунок скорочення споживання природних ресурсів суттєво зменшити кількість утворених відходів, мінімізуючи таким самим вплив на навколишнє середовище. Утворені відходи необхідно розглядати не як забруднювач навколишнього середовища, а як постачальник вторинних ресурсів для їх повторного використання у технологічному процесі. Наприклад, при підземній газифікації вугілля димові викиди газової турбіни можуть направлятися у підземний газогенератор для одержання горючого газу – монооксиду вуглецю за реакцією $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$.

Реалізація цієї задачі пов'язана із здійсненням широкомасштабного економічного маневру, який ґрунтується у переорієнтації структурної й інтенсивної політики у напрямку зміни пропорцій між традиційними виробництвами на основі пріоритетного розвитку безвідходних комбінованих систем.

Багатопрофільні джерела одержання енергоносіїв є основою розвитку комбінованого виробництва, а його економічними чинниками – високий рівень концентрації у нетрадиційних технологічних процесах на базі досягнень науки і техніки в області утилізації відходів, більш повного застосування сировини.

Як було раніше відзначено, СПГВ дозволяє застосувати такі комбінації виробництва:

- СПГВ-виробництво енергетичного та технологічного газу;
- СПГВ-газова і парова турбіни із виробництва електричної та теплової енергії;
- СПГВ-виробництво біогазу для подальшого змішування його з газом СПГВ і підвищення споживчих властивостей вугільного газу (Bondarenko, Lozynskyi, Sai, & Anikushyna, 2015);
- СПГВ-хімічний комплекс із виробництва моторних палив, метанолу, аміаку й інших хімічних продуктів;
- СПГВ-утилізаційний комплекс із трансформації низькопотенціальної теплової енергії вихідних газів СПГВ (одержання гарячої води, повітря, утилізації теплової енергії димових газів турбін, компресорних установок, електродвигунів, теплоти землі, сонця та ін.).

Димові викиди ТЕС (CO_2 , SO_x , NO_x), які розташовані недалеко від газогенераторного підприємства СПГВ, викидаються не в атмосферу, а направляються у підземний газогенератор. Діоксид вуглецю переходить у монооксид вуглецю, а оксиди сірки й газу переходять у нетоксичний стан. Стічні води і конденсат від хіміко-переробного комплексу також направляються у підземний газогенератор. У запропонованих технічних рішеннях змінена сама концепція боротьби з відходами: замість нейтралізації відходів передбачається їх запобігання й утилізація в замкнутому екологічному циклі.

5. ОЦІНКА РІВНЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЗОГЕНЕРАТОРНОГО ВИРОБНИЦТВА

Технологічний процес СПГВ можна поділити на комплекс основних та допоміжних робіт. До першого відноситься переведення вугілля у процесі газифікації в газоподібне паливо і транспортування його від вогневого вибою на поверхню й далі до споживача. Комплекс допоміжних робіт забезпечує виконання технічного процесу. До складу допоміжних робіт входять такі важливі операції як підготовка дуттьових потоків, управління процесом газифікації, очищення генераторного газу від пилу, підготовка матеріалів для закладання теплової енергії газу, підготовка матеріалів для закладання вигазованого простору. Без допоміжних робіт не може існувати газогенераторне виробництво. Вони забезпечують існування підприємства та нормальний режим його роботи, а також ефективне виконання основного процесу. Отже, зі зміною основного процесу змінюються вимоги до допоміжних робіт.

Необхідно відзначити, що основний процес СПГВ складається з трьох основних операцій. Перша – термохімічний метод утворення газу; друга – пересування й реверсуванням гнучких довгомірних трубопроводів для реалізації направленої подачі дуття; третя – проведення робіт, пов’язаних із закладкою вигазованого простору. В цьому випадку, при порівнянні з традиційним багатоопераційним видобутком вугілля, що включає проведення і кріплення розкриваючих і підготовчих виробок, монтаж – демонтаж підземного обладнання, вентиляцію, водовідлив, електропостачання, зарубку комбайна, відбійку, навантаження й доставку вугілля, ці операції здійснюються

за малоопераційною технологією при підземній газифікації вугілля.

Дуття у підземний газогенератор подається з поверхні механізованим способом – компресорами; а опускання та підйом гнучких довгомірних трубопроводів – за допомогою спеціальних підйомних установок (Falshtynskyy, Dychkovskyy, Lozynskyy, & Saik, 2012).

При об’єднанні процесів виймання і транспортування необхідність у підготовці фронту для подальших операцій непотрібна. Малоопераційний процес газифікації по суті безперервний, тому фронт вогневих робіт завжди самовідтворюється.

Важливою технологічною операцією є направлена подача дуття, що забезпечує керованість процесом СПГВ та дозволяє регулювати режим і параметри газифікації. Ін’єкційне закладання вигазованого простору дрібнодисперсними матеріалами через направлені свердловини є також однією із важливих технологічних операцій. Закладний матеріал при цьому подається в обвалену зону безпосередньої покрівлі.

З розвитком багатоопераційного процесу видобутку вугілля традиційним (шахтним) способом з’явилась протилежна тенденція при газифікації – створення нетрадиційних малоопераційних методів видобування корисних копалин. СПГВ характеризується тим, що у надрах Землі відбуваються теплові, хімічні, масообмінні та гідродинамічні процеси, при яких засобом праці виступає вже не машина, а робочі реагенти (повітря, пара, діоксид вуглецю, кисень та їх комбінації).

Шахтний видобуток вугілля із багаточисельними операціями і процесами можна замінити технологією переведення вугілля на місці його залягання методом газифікації. Послідовність процесів при шахтному видобутку та при процесах отримання газоподібного палива наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1. Послідовність процесів і операцій при шахтному вийманні та підземній газифікації вугілля

№ з/п	Послідовність процесів і операцій		Надійність елементів	
	шахтне виймання	СПГВ	шахтної системи	системи СПГВ
1	відбійка, виймання вугілля	розпалювання вугільного пласта	0.60	0.95
2	кріплення вибою і керування покрівлею	нагнітання дуття й газифікація вугілля	0.80	0.99
3	транспортування вугілля у шахті	закладання вигазованого простору	0.90	0.96
4	підйом на поверхню	видача газу на поверхню	0.90	0.99
5	транспортування на поверхні	очищення та охолодження газу	0.90	0.99
6	збагачення на фабриці	подача газу споживачу	0.70	0.99
	Загальна надійність системи		0.24	0.95

З аналізу даних Таблиці 1 очевидним є те, що надійність кожної системи з різноманітними технологічними процесами визначається як перемноження коефіцієнтів надійності складових її елементів, а при дотриманні такої послідовності процесів і операцій при шахтному вийманні надійність роботи вугільного підприємства є збитковою. Достатньо висока надійність процесу СПГВ забезпечується надійністю та стійкістю всіх елементів процесу газифікації, що призводять до зростання продуктивності праці в десятки разів. Узагальнюючим показником економічної ефективності є закон продуктивності праці (Bondarenko & Tabachenko, 1988):

$$B = \alpha \sqrt{P\Phi}, \tag{1}$$

де:

B – продуктивність праці або річний виробіток, грн/людину;

α – коефіцієнт, який враховує гірничо-геологічні та геомеханічні умови розробки родовищ і організаційні фактори, які характерні для даної галузі;

P – рівень знань, який необхідний для створення прогресивної технології, грн/людину;

Φ – фондовіддача (відношення кількості продукції в натуральному чи вартісному виразі до об’єму основних виробничих фондів підприємства).

Залежність продуктивності праці на газогенераторному підприємстві від його технологічного рівня пов'язана за такою залежністю:

$$P = \frac{1}{T}, \quad (2)$$

де:

P – продуктивність праці робітника з виробництва газу (кількість вигазованого вугілля) на газогенераторному підприємстві, т/міс;

T – трудомісткість (витрати праці робітника за зміну на газифікацію 1 т вугілля).

Питомі капіталовкладення на будівництво підприємства, віднесені на 1 т вугілля, що виготовується, визначається із залежності:

$$K_y = \frac{1}{\phi}. \quad (3)$$

Фондоозброєність (капітальні витрати, що входять у фонди підприємства, а інколи і всі капітальні витрати, що приходяться на одного робітника):

$$\phi = K_y \cdot P. \quad (4)$$

Залежність зростання продуктивності праці від ефективності капіталовкладень описується формулою:

$$P = f(K_y). \quad (5)$$

Виходячи із закону продуктивності праці (1) і логічного припущення про те, що механізація кожної операції технічного процесу вимагає визначених капітальних вкладень, і при цьому знижується трудомісткість даної операції при випуску того ж об'єму продукції, допускаємо, що для кожної технологічної ланки і кожного технічного рівня (P) існує лінійна залежність трудомісткості від капітальних витрат. Тоді:

$$T = T_1 - PK_y, \quad (6)$$

де:

T_1 – початкова трудомісткість по підприємству в цілому до механізації.

Ефективність завершеної механізації E_M , тобто використання механізації даного технічного рівня на всіх технологічних ланках, визначається за формулою:

$$E_M = \frac{T_1}{T_2}, \quad (7)$$

де:

T_2 – величина трудомісткості при закінченні механізації, звідки:

$$T_2 = \frac{T_1}{E_M} = T_1 - PK_y^{\max}, \quad (8)$$

де:

K_y^{\max} – визначається по умовам завершення механізації всіх технологічних ланок газогенераторного підприємства. Отже:

$$RK_y^{\max} = T_1 - \frac{T_1}{E_M}, \quad (9)$$

або

$$P = \frac{T_1}{K_y^{\max}} \left(1 - \frac{1}{E_M} \right). \quad (10)$$

Загальний вираз залежності трудомісткості від капіталовкладень матиме вигляд:

$$T = T_1 - \frac{T_1}{K_y^{\max}} \left(1 - \frac{1}{E_M} \right) K_y; \quad (11)$$

або

$$T = T_1 \left[1 - \frac{K_y}{K_y^{\max}} \left(1 - \frac{1}{E_M} \right) \right]. \quad (12)$$

Приведемо цей вираз до безрозмірного вигляду при $\frac{T}{T_1} = \tau$:

$$\tau = 1 - \frac{K_y}{K_y^{\max}} \left(1 - \frac{1}{E_M} \right). \quad (13)$$

Показники росту продуктивності праці при різних рівнях механізації наведено на Рисунку 2.

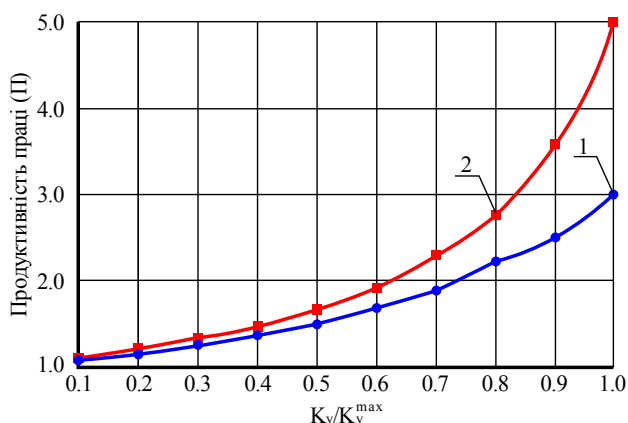


Рисунок 2. Залежності росту продуктивності праці від рівня механізації: (1) при $E_M = 3$; (2) при $E_M = 5$

З аналізу даних, наведених на Рисунку 2, встановлено, що при $\frac{K_y}{K_y^{\max}} \geq 0.5$ різниця у зростанні продуктивності праці для умов $E_M = 3$ і $E_M = 5$ незначна.

Найбільше зростання продуктивності спостерігається при $\frac{K_y}{K_y^{\max}} \geq 0.8$. Отже, найбільший ефект дає закін-

чення механізації, а модернізація обладнання при загальному рівні механізації 0.5 – 0.7 не призведе до серйозного збільшення продуктивності праці. Тому варто направляти засоби і зусилля на закінчення механізації усіх виробничих процесів на газогенераторному підприємстві.

Аналогічний ефект проявляється при автоматизації процесів на підприємстві. Автоматизація підвищує продуктивність кожної операції, що вже пройш-

ла стадію механізації. Підсумкова ефективність механізації E_M і автоматизації E_a виражаються формулою автоматичного керування:

$$E_{Ma} = E_M \cdot E_a. \quad (14)$$

Слід враховувати, що для освоєння систем автоматизації необхідні допоміжні капіталовкладення у розмірах, приблизно в 1.25 – 1.3 рази більші, що перевищують витрати на механізацію процесів, тобто:

$$E_{Ma} = K_y^{\max} \cdot q. \quad (15)$$

Виходячи із цього значення E_{Ma} отримуємо:

$$\tau = 1 - \frac{1}{1 - \frac{K_y}{K_y^{\max}} \cdot \frac{1}{q} \left(1 - \frac{1}{E_M \cdot E_a} \right)}; \quad (16)$$

$$\Pi = \frac{1}{1 - \frac{K_y}{K_y^{\max}} \cdot \frac{1}{q} \left(1 - \frac{1}{E_M \cdot E_a} \right)}. \quad (17)$$

Приймаємо $E_M = 5$ і $E_a = 3$, тоді $E_{Ma} = 5 \cdot 3 = 15$. Показники підсумкової ефективності механізації та автоматизації отримані із залежності (17) й наведені на Рисунку 3.

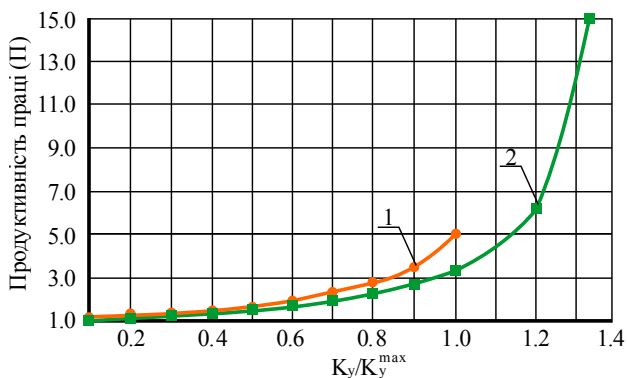


Рисунок 3. Залежності росту продуктивності праці від рівня механізації та автоматизації: (1) при $E_M = 5$; (2) при $E_{Ma} = 15$

Отримані дані (Рис. 3) показують, що при одному рівні капіталовкладень рівень продуктивності праці при одночасній механізації й автоматизації буде меншим, ніж тільки при механізації до значення:

$$K_y = K_y^{\max} = 1.2. \quad (18)$$

Крута частина кривої на Рисунку 3 при значенні $\frac{K_y}{K_y^{\max}}$ наближається до 1 і підтверджує те, що системи рішення, тобто закінчення процесів механізації та автоматизації, дає найбільший ефект – ефективність капіталовкладень зростає нелінійно. Якщо прийняти капіталовкладення для однієї нової операції такими ж як для однієї старої, то загальні питомі капіталовкладення будуть меншими у тій мірі, в якій скоротилося число операцій в новому процесі.

Максимальні питомі капіталовкладення малооперативного процесу (K_y^{\max}) визначаються за наступною формулою:

$$K_y^{1\max} = \frac{K_y^{\max} n'}{n_m}, \quad (19)$$

де:

n' – число операцій в новому технологічному процесі;

n_m – число операцій у традиційному процесі.

Зменшення операційності можна співставити відповідному збільшенню ефективності механізації, тобто:

$$E_{M'} = \frac{E_M n_m}{n'}. \quad (20)$$

Тоді з урахуванням малооперативної технології:

$$\tau = 1 - \frac{K_y}{K_y^{\max}} \cdot \frac{n_t}{n'} \left(1 - \frac{1}{E_M n_t / n'} \right). \quad (21)$$

Враховуючи, що $n_t/n' = q'$ отримаємо наступну залежність:

$$\tau = 1 - \frac{K_y}{K_y^{\max}} \cdot q' \left(1 - \frac{1}{E_M q'} \right); \quad (22)$$

$$\Pi = \frac{1}{1 - \frac{K_y}{K_y^{\max}} \cdot q' \left(1 - \frac{1}{E_M q'} \right)}. \quad (23)$$

При малооперативному процесі з високою підсумковою ефективністю $E_M q'$ крива зростання продуктивності праці (Рис. 4) порівняно крутіша, а тому питання про надійність і стійкість показників кожного технологічного процесу набуває великого значення. Якщо прийняти $E_M = 5$ і $q' = 2$, то одержимо наступні показники ефективності (Рис. 4).

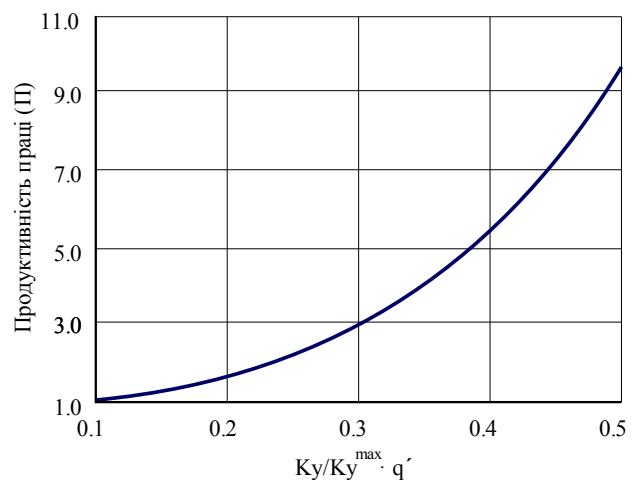


Рисунок 4. Залежність росту продуктивності праці від скорочення числа операцій

Порівнюючи залежність (Рис. 4), отриману із виразу (23) і (Рис. 2), можна зробити висновок, що ефективність капіталовкладень змінюється за експоненціальною залежністю: $\Pi = 0.58e^{5.47(K_y/K_y^{\max})}q'$, $R^2 = 0.95$.

З цього слідує висновок, що сучасне досягнення науки дозволяє створювати малоопераційні процеси, які характеризуються високою продуктивністю праці й відносно малою питомою капіталоємкістю.

Ріст високих капіталовкладень говорить про те, що фактично проходить реалізація нових конструкторських рішень технології свердловинної газифікації вугільних пластів з традиційним видобутком вугілля. Іншими словами, малоопераційність забезпечує законмірне абсолютне підвищення продуктивності праці, а останнє характеризує зниження всіх інших витрат при впровадженні технології газифікації вугілля, що є основним критерієм ефективності виробництва.

6. ВИСНОВКИ

Технологічна система газифікації вугілля забезпечує безшахтну, безлюдну технологію газоутворення, що забезпечує безпечність ведення робіт і покращення умов праці робітників на газогенераторному підприємстві з високим зростанням продуктивності праці.

В трудомісткості робіт на газогенераторному підприємстві роботи на поверхні землі займають всю частину і отже, заслуговують значної уваги до питань їх удосконалення. На поверхні виконуються роботи, пов'язані з бурінням й оснащенням свердловин, забезпеченням робочими реагентами (дуттям), очищенням й переробкою газу, ремонтом обладнання та ін. Для більшості з указаних робіт, поряд з їх механізацією і автоматизацією, важливе значення має виробнича потужність газогенераторного підприємства, із зростанням якої одночасно падає їх трудомісткість. Прогнозні дослідження з удосконалення технології СПГВ виходять із сучасних принципів організації технологічного процесу й передбачають поетапне впровадження технологій та конструкторських рішень з виробництва генераторного газу та хімічної сировини.

ВДЯЧНІСТЬ

Дана робота виконана в рамках проведення комплексного наукового проекту між Державним ВНЗ "Національний гірничий університет" та ТНПУ ім. В. Гнатюка "Наукові засади переробки органічних палив комплексними енергетичними підприємствами" при підтримці Міністерства освіти і науки України, № держреєстрації 0115U002293.

REFERENCES

Anishin, A.S., Piriashvili, B.Z., & Chirkin, B.P. (2013). Trends and Prospects of Ensuring Energy Resources in Ukraine. *Studies on Russian Economic Development*, 24(1), 84-98. <http://dx.doi.org/10.1134/s1075700713010036>

Bondarenko, V., & Tabachenko, M. (1988). *Zakony ta zakonmirnosti hirnychoi nauky*. Dnipropetrovsk: Nationalna Hirnycha Akademia.

Bondarenko, V., Lozynskiy, V., Sai, K., & Anikushyna, K. (2015). An Overview and Prospectives of Practical Application of the Biomass Gasification Technology in Ukraine. *Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 27-32. <http://dx.doi.org/10.1201/b19901-6>

Dubiński, J., & Turek, M. (2015). Basic Aspects Of Productivity Of Underground Coal Gasification Process. *Archives of Mining Sciences*, 60(2), 443-453. <http://dx.doi.org/10.1515/amsc-2015-0029>

Falshtynskyy, V., Dychkovskyy, R., Lozynskyy, V., & Saik, P. (2012). New Method for Justification the Technological Parameters of Coal Gasification in the Test Setting. *Geomechanical Processes during Underground Mining: School of Underground Mining 2012*, 201-208. <http://dx.doi.org/10.1201/b13157-35>

Falshtynskiy, V.S., Dychkovskiy, R.O., Lozynskiy, V.G., & Saik, P.B. (2013). Determination of the Technological Parameters of Borehole Underground Coal Gasification for Thin Coal Seams. *Journal of Sustainable Mining*, 12(3), 8-16. <http://dx.doi.org/10.7424/jsm130302>

Falshtynskiy, V., Dychkovskiy, R., Lozynskiy, V., & Saik, P. (2015). Analytical, Laboratory and Bench Test Researches of Underground Coal Gasification Technology in National Mining University. *Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 97-106. <http://dx.doi.org/10.1201/b19901-19>

Kapusta, K., Stańczyk, K., Wiatowski, M., & Čećko, J. (2013). Environmental Aspects of a Field-Scale Underground Coal Gasification Trial in a Shallow Coal Seam at the Experimental Mine Barbara in Poland. *Fuel*, (113), 196-208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.015>

Khlopytskyi, O. (2014). State, Problems and Prospects of Ash-Slag Waste Recycling of Ukrainian Thermal Power Stations. *ScienceRise*, 4(2(4)), 23-28. <http://dx.doi.org/10.15587/2313-8416.2014.28511>

Kolokolov, O., Tabachenko, M., & Eishynskiy, O. (2000). *Teoriia i praktyka termokhimichnoi tekhnologii vydobutku ta pererobky vuhillia*. Dnipropetrovsk: Natsionalnyi Hirnychi Universytet.

Li, L., Xu, L.J., & Chen, D.M. (2013). Connotation and Technology System of Green Mining of Manganese Resources. *Advanced Materials Research*, (734-737), 540-545. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.734-737.540>

Lozynskiy, V.H., Dychkovskiy, R.O., Falshtynskiy, V.S., & Saik, P.B. (2015). Revisiting Possibility to Cross Disjunctive Geological Faults by Underground Gasifier. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 22-27.

Ribbing, C. (2007). Environmentally Friendly Use of Non-Coal Ashes in Sweden. *Waste Management*, 27(10), 1428-1435. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.012>

Sivertsen, B. (2006). Air Pollution Impacts from Open Air Burning. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, (92), 449-458. <http://dx.doi.org/10.2495/wm060471>

Yang, L. (2003). Clean Coal Technology – Study on the Pilot Project Experiment of Underground Coal Gasification. *Energy*, 28(14), 1445-1460. [http://dx.doi.org/10.1016/s0360-5442\(03\)00125-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0360-5442(03)00125-7)

Yang, L.H., Zhang, X., & Liu, S. (2009). Underground Coal Gasification Using Oxygen and Steam. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(20), 1883-1892. <http://dx.doi.org/10.1080/15567030802462531>

Zhong-Xian, Z., & Yi, Q. (1986). Development of Non-Waste Technology and Production in the People's Republic of China. *International journal for Development Technology*, 4(1), 49-56.

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Формування та впровадження комплексного, комбінованого та безвідходного енергохімічного підприємства на базі підземної газифікації вугілля з урахуванням аналізу рівня його техніко-економічної ефективності.

Методика. Дослідження надійності роботи складових елементів газогенераторного підприємства виконувалося шляхом визначення послідовності процесів та операцій при підземній газифікації вугілля на усіх технологічних ланках даного процесу.

Результати. Встановлено, що висока надійність процесу газифікації вугілля забезпечується стійкістю всіх складових технологічних елементів даного процесу. Описано основні етапи комбінування енергохімічного підприємства з орієнтацією на отримання синтетичних вуглеводнів. При роботі газогенераторного підприємства модернізація обладнання при загальному рівні механізації 0.5 – 0.7 не призведе до серйозного збільшення продуктивності праці. Тому варто направляти засоби і зусилля на закінчення стадій механізації усіх виробничих процесів.

Наукова новизна. Встановлено, що ефективність механізації та автоматизації процесів роботи газогенераторного підприємства виражається формулою автоматичного керування. Визначено залежності зміни ефективності механізації всіх технологічних ланок газогенераторного підприємства та росту продуктивності праці від скорочення числа технологічних операцій.

Практична значимість. Ефективне функціонування газогенераторного підприємства, як показують проведені аналітичні дослідження, забезпечується автоматизацією усіх технологічних процесів на даному підприємстві. Для освоєння систем автоматизації необхідні додаткові капіталовкладення, що перевищують витрати на механізацію у 1.25 – 1.4 рази.

Ключові слова: *підземна газифікація вугілля, газогенераторне підприємство, ефективність капіталовкладень, енергетична сировина*

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Формирование и внедрение комплексного, комбинированного и безотходного энергохимического предприятия на базе газификации угля на основе анализа уровня его технико-экономической эффективности.

Методика. Исследование надежности работы составных элементов газогенераторного предприятия выполнялось путем определения последовательности процессов и операций при подземной газификации угля на всех технологических звеньях данного процесса.

Результаты. Установлено, что высокая надежность процесса газификации угля обеспечивается надежностью и устойчивостью всех составляющих технологических элементов данного процесса. Описаны основные этапы комбинирования энергохимического предприятия с ориентацией на получение синтетических углеводородов. При работе газогенераторного предприятия модернизация оборудования при общем уровне механизации 0.5 – 0.7 не приведет к серьезному увеличению производительности труда. Поэтому следует направлять средства и усилия на окончание стадий механизации всех производственных процессов.

Научная новизна. Установлено, что эффективность механизации и автоматизации процессов работы газогенераторного предприятия выражается формулой автоматического управления. Определены зависимости изменения эффективности механизации всех технологических звеньев газогенераторного предприятия и роста производительности труда от сокращения числа технологических операций.

Практическая значимость. Эффективное функционирование газогенераторного предприятия, как показывают проведенные аналитические исследования, обеспечивается автоматизацией всех технологических процессов на данном предприятии. Для освоения систем автоматизации необходимы дополнительные капиталовложения, превышающие расходы на механизацию в 1.25 – 1.4 раза.

Ключевые слова: *подземная газификация угля, газогенераторное предприятие, эффективность капиталовложений, энергетическое сырье*

ARTICLE INFO

Received: 23 April 2016

Accepted: 23 July 2016

Available online: 30 September 2016

ABOUT AUTHORS

Mykola Tabachenko, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/58, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: tabachenko@i.ua

Pavlo Saik, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/57, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: saik.nmu@gmail.com

Vasyl Lozynskiy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/61, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: lvg.nmu@gmail.com

Volodymyr Falshtynskiy, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/57, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: fvs@yahoo.com

Roman Dychkovskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Underground Mining Department, National Mining University, 19 Yavornytskoho Ave., 4/34, 49005, Dnipropetrovsk, Ukraine. E-mail: dichre@yahoo.com