

А.В. Панасюк, к.т.н., доц.
І.В. Давидова, к.с.-г.н., доц.
В.В. Мамрай, к.т.н., доц.
В.М. Бондарчук, ст. викладач

Державний університет «Житомирська політехніка»

Перспективи підземної розробки родовищ корисних копалин в Україні

У статті проаналізовано сучасний стан та перспективи підземної розробки родовищ корисних копалин в Україні в контексті євроінтеграційних процесів та викликів гірничодобувної галузі. Розглянуто гірничо-геологічні та техніко-економічні особливості підземного видобутку в основних мінерально-сировинних регіонах країни, враховуючи Донецький, Дніпропетровський, Криворізький та інші басейни, з урахуванням специфіки геологічної будови та умов залягання корисних копалин. Систематизовано основні проблеми розвитку гірничодобувної галузі, серед яких критична необхідність технічного переоснащення багатьох добувних підприємств із застарілим обладнанням, забезпечення належного рівня промислової безпеки відповідно до міжнародних стандартів, дотримання екологічних норм та активне впровадження інноваційних технологій видобування. Особливу увагу приділено аналізу аспектів модернізації гірничих підприємств та пошуку оптимальних механізмів розвитку підземних гірничих підприємств. Розглянуто перспективи цифрової трансформації гірничих підприємств, враховуючи впровадження систем Індустрії 4.0, застосування автоматизованих систем для оптимізації процесів видобутку та моніторингу стану обладнання та безпеки праці, а також перспективи впровадження роботизованих систем. Проаналізовано можливості раціонального використання відпрацьованого простору підземних гірничих виробок для створення підземних сховищ, геотермальних станцій та інших альтернативних способів використання. На основі проведеного дослідження розроблено рекомендації щодо стратегічних напрямів інтеграції української гірничодобувної промисловості у європейську систему сталого розвитку гірничодобувного сектору.

Ключові слова: підземна розробка; гірничі роботи; мінерально-сировинна база України; Донбас; Кривбас; шахти; сталый розвиток; Smart Mine.

Актуальність теми. Мінерально-сировинний потенціал України налічує понад 20 тисяч родовищ і проявів корисних копалин, серед яких стратегічне значення для національної економіки мають вугільні, залізні та марганцеві поклади, калійні та кам'яно-соляні родовища, уранові руди, а також родовища рідкісних та рідкісноземельних металів [6, 7], значна частина яких розробляється підземним способом, що обумовлено як геологічними особливостями залягання корисних копалин, так і мінімізацією техногенного впливу на природні екосистеми.

Україна займає провідні позиції у світовому видобутку мінеральної сировини, а видобування підземним способом забезпечує близько 40 % від загального обсягу видобутку в державі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасний етап розвитку гірничодобувної промисловості України характеризується дією низки взаємопов'язаних чинників. Серед яких варто виокремити виснаження легкодоступних запасів корисних копалин, що призводить до необхідності освоєння більш глибоких та технічно складних родовищ і посилення вимоги до екологічної безпеки гірничого виробництва на ряду з підвищенням його ефективності [8, 13]. Це своєю чергою викликає актуальність комплексного дослідження перспектив підземної розробки як одного з елементів мінерально-сировинного сектору розвитку держави.

Глобальні тенденції розвитку гірничодобувної промисловості демонструють необхідність переходу до технологій сталого розвитку, широкого впровадження цифрових рішень [2] та забезпечення відповідальності гірничих підприємств [10], що призводить до необхідності модернізації гірничої галузі відповідно до міжнародних стандартів та технологічних вимог [5].

Метою дослідження є системний аналіз існуючого стану та перспектив розвитку підземного видобування корисних копалин в Україні з урахуванням геолого-технічних особливостей, технологічних рішень та тенденцій розвитку гірничодобувної промисловості.

Викладення основного матеріалу. Сучасний стан підземної розробки в Україні вимагає розгляду кожного окремого регіону залежно від виду корисних копалин, що там видобуваються, його гірничо-геологічних умов. Також необхідно звернути увагу на вплив та наслідки воєнних дій в окремих регіонах.

Донецький вугільний басейн все ще залишається одним з центральних у системі вуглевидобувної промисловості України, незважаючи на значні втрати виробничих потужностей внаслідок воєнних дій.

На підконтрольній Україні території функціонує багато шахт різних форм власності, що забезпечують видобуток енергетичного та коксівного вугілля [9].

Геологічні умови басейну характеризуються розробкою вугільних пластів на глибинах від 600 до 1200 м, а в окремих випадках понад 1500 м. Основними геотехнічними особливостями є складна тектонічна будова масиву, висока метановість вугільних пластів (досягає 25–30 м³/т), схильність вугілля до самозаймання та формування вибухонебезпечних газових сумішей [3], що створює низку технологічних проблем, враховуючи необхідність ефективної дегазації пластів, підтримання стабільних параметрів шахтної атмосфери та застосування спеціальних заходів роботи на пластах, схильних до самозаймання.

Збільшення глибини ведення гірничих робіт призводить до зростання гірського тиску масиву, що ускладнює умови підтримання гірничих виробок, високий рівень метанонасиченості пластів вимагає комплексних заходів дегазації. Експлуатаційні витрати, обумовлені складними гірничо-геологічними умовами, впливають на економічну ефективність видобутку. Зношення технологічного обладнання потребує значних інвестицій у модернізацію виробничих потужностей.

Перспективними напрямками технологічного розвитку галузі є впровадження автоматизованих систем дегазації та постійного контролю газового режиму, застосування дистанційного управління очисним обладнанням, використання інтелектуальних систем управління шахтною вентиляцією та розробка ефективних методів утилізації шахтного метану для подальших потреб регіону.

Криворізький залізорудний басейн є одним з найбільших світових центрів видобутку залізної руди, забезпечуючи більше половини національного видобутку. Значна частина рудних покладів розробляється підземним способом на глибинах понад 1500 м, хоча окремі гірничі підприємства досягли позначки 1800–2000 м. У геологічній будові басейну переважають потужні поклади високоякісної залізної руди з високим вмістом заліза. Разом з тим численні геологічні порушення, наявність обводнених зон та високий гірничий тиск на великих глибинах створюють значні технологічні проблеми для їх підземної розробки.

Технологічні умови експлуатації ускладнюються прогресуючим зростанням геомеханічних напружень у масиві, підвищенням ризиком гірських ударів та випадань породи у вироблений простір, а також ускладненою видачею рудної маси на поверхню. Водночас багато підприємств регіону впроваджує прогресивні системи розробки, технології керованого обвалення та комплексну автоматизацію основних виробничих процесів [4]. Застосування автоматизованих бурових комплексів та роботизованих транспортних систем тим самим знижують собівартість видобутку та підвищують рівень безпеки. Активно впроваджуються інноваційні технологічні рішення, зокрема автоматизовані системи керування підйомними комплексами, дистанційний моніторинг стану гірського масиву та енергоефективне обладнання для вентиляції та водовідливу.

Львівсько-Волинський вугільний басейн характеризується відносно сприятливими гірничо-геологічними умовами (глибина розробки до 700–800 м та знижена метановість вугільних пластів). Вугілля басейну вирізняється високою якістю та може використовуватися як для енергетичних цілей, так і для коксування. Проте економічні труднощі призвели до зниження завантаження значної частини підприємств або їх тимчасової зупинки. Також особливостями басейну є логістичні переваги близькості до європейських ринків збуту.

Порівняльний аналіз технологічних показників свідчить про значне відставання гірничодобувної галузі нашої держави від європейських у ключових аспектах розвитку (рис. 1).

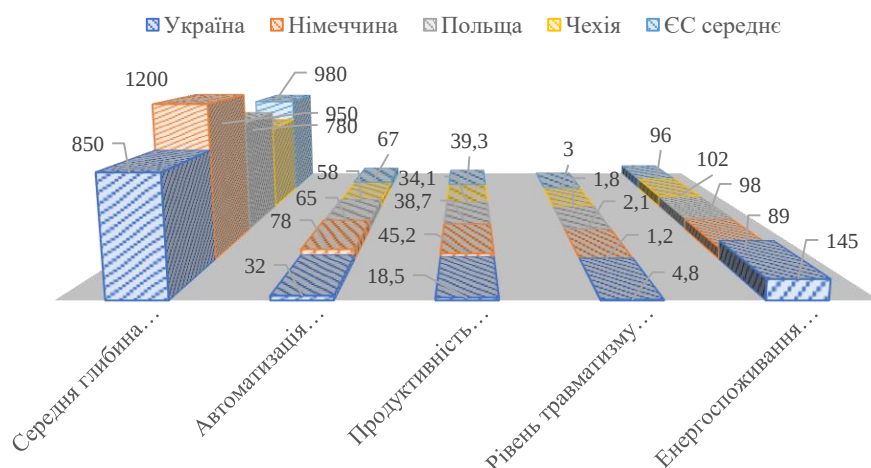


Рис. 1. Технологічні показники українських та європейських підприємств

Вказані дані свідчать, що українські підприємства працюють на менших глибинах, але демонструють критично низький рівень автоматизації процесів – лише 32 % проти 67 % у середньому по ЄС. Продуктивність праці в Україні становить менше половини від європейського рівня, що пов'язано з застарілим обладнанням та низьким рівнем технологічного розвитку. Особливо тривожним є високий рівень травматизму – майже втричі вищий за європейські стандарти.

Перспективними напрямками можуть стати використання відпрацьованих шахтних просторів для створення підземних газових сховищ, розробка технологій видобутку метану з вугільних пластів (CBM – Coal Bed Methane) та впровадження підземних енергогенеруючих комплексів. Технологія CBM дозволяє здійснювати видобуток метану з невідпрацьованих вугільних горизонтів, створюючи альтернативне джерело енергетичних ресурсів для західного регіону держави.

Прикарпаття та Волинь характеризуються наявністю значних родовищ калійних та кам'яних солей, що мають стратегічне значення для розвитку хімічної промисловості, а також агропромислового сектору. Калійні поклади представляють одні з найбільших запасів у Європі та здатні забезпечити потреби не лише національного ринку, але й сусідніх країн.

Основною проблемою на підприємствах цього регіону є контроль геомеханічних процесів, пов'язаних з розвитком карстових явищ, формуванням провалів та підтоплень внаслідок розчинення соляних покладів, що може призвести до серйозних екологічних наслідків. Забезпечення стабільності гірничих виробок вимагає застосування передових методів геомеханічного моделювання та прогнозування поведінки соляного масиву.

Сучасні технологічні рішення включають тривимірне геомеханічне моделювання стійкості підземних виробок, системи безперервного моніторингу деформаційних процесів у масиві та технології селективного видобутку для мінімізації втрат корисної копалини та зменшення техногенного впливу на навколишнє середовище.

Також варто зазначити, що Україна володіє значними запасами уранових руд, розробка яких здійснюється підземним способом. Видобуток урану характеризується застосуванням найсучасніших технологій забезпечення радіаційної безпеки та дотримання жорстких екологічних стандартів.

Для подолання кризових явищ у гірничій галузі, особливо під час видобування корисних копалин підземним способом, слід розглянути низку напрямів вирішення цих проблем. Серед шляхів подолання кризових явищ можна вирізнити цифрову трансформацію та автоматизацію гірничого комплексу, прогресивні методи руйнування гірських порід, мінімізацію впливу підприємств на навколишнє середовище.

Концепція автоматизованого гірничого комплексу (Smart Mine) має на меті впровадження передових цифрових технологій у процеси гірничого виробництва, що забезпечить підвищення ефективності, безпеки та екологічності видобування [2, 5]. Технологічна основа автоматизованого комплексу містить розгалужені сенсорні мережі для безперервного моніторингу параметрів рудничної атмосфери, контролю вібраційних характеристик та деформацій гірського масиву, облік переміщення персоналу та обладнання, а також автоматичного регулювання параметрів систем вентиляції.

Застосування технологій штучного інтелекту та машинного навчання дозволяє реалізувати прогнозне моделювання аварійних ситуацій, оптимізацію виробничих процесів, планування технічного обслуговування та автоматизацію прийняття оперативних рішень. Технологія обробки великих даних забезпечують збір та аналіз масивів операційної інформації, виявлення змін у функціонуванні технологічного обладнання та оптимізацію логістичних процесів.

Сучасні тенденції автоматизації гірничого виробництва враховують широке впровадження автономного технологічного обладнання [5]. Безпілотні транспортні комплекси для переміщення гірської маси, автоматизовані бурові установки з програмним та дистанційним керуванням та спеціалізовані роботи для спостереження за важкодоступними ділянками шахт забезпечують підвищення продуктивності та зниження ризиків.

Системи дистанційного керування містять управління очисним обладнанням з диспетчерських центрів, віддалений моніторинг технічного стану обладнання та його складових, а також дистанційне керування вентиляційними комплексами. Це своєю чергою дозволить мінімізувати присутність людей у небезпечних зонах та підвищити точність виконання технологічних операцій.

Традиційні вибухові методи необхідно по можливості замінювати більш безпечними та технологічно досконалими способами руйнування. Наприклад, використання гідравлічного розриву на тріщинуватих покладах вугілля, який являє собою безвибухову технологію, що забезпечує точний контроль процесу руйнування, мінімізує ризик пошкодження гірничих виробок або використання термічних технологій, які базуються на використанні високих температур для розм'якшення гірських порід та ефективно застосовуються під час видобутку солей та окремих видів рудних корисних копалин. Плазмові технології також забезпечують руйнування з мінімальними втратами корисних копалин та можуть застосовуватися для обробки особливо міцних та абразивних гірських порід. Ці інноваційні підходи сприяють підвищенню безпеки гірничих робіт та покращенню техніко- економічних показників видобутку.

Підземна розробка родовищ корисних копалин демонструє значні екологічні переваги порівняно з відкритими гірничими роботами. Збереження природних ландшафтів досягається завдяки мінімальному відчуженню земельних ділянок на поверхні, збереженню родючого шару ґрунту та відсутності масштабних відвалів розкритих порід.

Зменшення атмосферного забруднення забезпечується локалізацією основних технологічних процесів у виробленому просторі в надрах, а також ефективною очисткою вихідного струменя повітря та контролем пилоутворення на всіх етапах видобування. Тим самим підземна розробка родовищ корисних копалин є кращою при дотриманні всіх екологічних норм і стандартів.

Перспективою екологічної оптимізації гірничого виробництва є утилізація шахтного метану для збільшення енергетичної незалежності регіонів. Дегазація вугільних пластів забезпечує промислову безпеку, а також дає можливість організувати збір метану для подальшого енергетичного використання, що сприяє зменшенню викидів парникових газів. Сучасні енергетичні установки забезпечують одночасне виробництво електричної енергії та теплової енергії, покриваючи частину енергетичних потреб гірничих підприємств та перспективи для віддачі чи продажу надлишкової енергії в енергетичну мережу. Цей підхід сприяє підвищенню енергетичної автономності підприємств та покращенню їх економічних показників.

Використання відпрацьованих шахтних виробок для геотермального опалення є перспективним напрямом використання гірничих розробок [11]. Технологічний принцип базується на використанні стабільної температури підземних вод, організації циркуляції теплоносія через шахтні виробки та застосуванні теплових насосів для підвищення енергетичної ефективності. Перевагами геотермальної енергетики є постійна доступність енергетичного ресурсу незалежно від кліматичних умов, низькі експлуатаційні витрати та екологічність технології. Цей напрям може забезпечити сталий розвиток гірничих регіонів після завершення видобування корисних копалин на підприємстві.

Відпрацьований шахтний простір становить значний потенціал для створення різноманітних підземних сховищ. Зокрема, зберігання природного газу в підземних резервуарах дозволяє створювати стратегічні енергетичні резерви, організовувати сезонне регулювання споживання, тим самим підвищувати енергетичну безпеку країни.

Геологічне зберігання діоксиду вуглецю в відпрацьованому просторі шахт дає можливість зменшити викиди парникових газів. Створення підземних дата-центрів дозволяє використовувати стабільні температурні умови підземного простору, забезпечувати високий рівень фізичної безпеки інформації та економити енергію на охолодження серверного обладнання.

Аналіз екологічних стандартів показує, що українські норми значно поступаються європейським вимогам. Допустимі викиди пилу перевищують європейські стандарти втричі, а викиди сірки діоксиду та оксидів азоту – більш ніж удвічі. Рівень утилізації відходів в Україні майже вдвічі нижчий за європейський, що свідчить про неефективне використання вторинних ресурсів та високий техногенний вплив на довкілля (рис. 2).

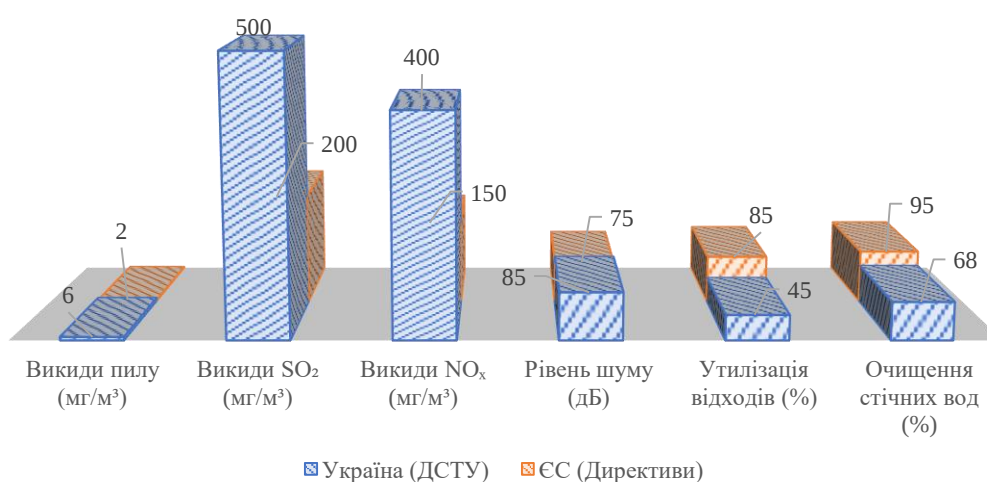


Рис. 2. Екологічні стандарти та їх дотримання

Модернізація гірничої галузі потребує значних фінансових ресурсів. Державне фінансування повинно включати програми підтримки стратегічних підприємств, інвестиції в науково-дослідні розробки та

створення сприятливого середовища. Залучення приватних інвестицій передбачає співпрацю з міжнародними інвесторами.

Міжнародна інтеграція та стандартизація також є важливим процесом на шляху до входження України до ЄС, тому необхідною є адаптація національної гірничодобувної галузі до європейських стандартів. Екологічні вимоги включають дотримання Директиви ЄС про промислові викиди, встановлення стандартів якості атмосферного повітря та водних ресурсів, а також впровадження європейських вимог щодо поводження з промисловими відходами. Стандарти промислової безпеки передбачають впровадження європейських норм охорони праці, стандартів промислової безпеки та обов'язкову сертифікацію технологічного обладнання відповідно до європейських регламентів.

Участь у міжнародних дослідницьких програмах включає інтеграцію в рамкову програму Horizon Europe та інші наукові ініціативи ЄС, розвиток двостороннього співробітництва з провідними гірничими країнами світу, а також активний обмін технологіями та передовим досвідом. Міжнародні освітні програми передбачають академічну мобільність студентів та викладачів, розробку спільних освітніх програм з європейськими технічними університетами та організацію міжнародних наукових конференцій і семінарів у сфері гірничої справи.

Серед перспектив розвитку можна виокремити такі три напрями: короткострокова (1–3 роки), середньострокова (3–7 років) та довгострокова (7–20 років) модернізації.

Короткострокова модернізація враховує оновлення систем вентиляції та електропостачання відповідно до технічних стандартів, впровадження автоматизованих систем контролю газового режиму та модернізацію шахтного транспорту. Підвищення професійної кваліфікації персоналу передбачає реалізацію програм перенавчання працівників відповідно до нових технологій, впровадження оновлених стандартів промислової безпеки та створення спеціалізованих тренувальних центрів для підготовки кваліфікованих кадрів.

Середньострокові заходи модернізації – це процес цифровізації гірничого виробництва, що передбачає поетапне впровадження автоматизованого гірничого комплексу, комплексну автоматизацію основних технологічних процесів та створення цифрових шахт-двійників. Також сюди варто зарахувати реалізацію проєктів геотермальної енергетики, створення підземних сховищ різного призначення.

Довгострокова модернізація являє собою інтеграцію в європейську енергетичну систему, що вимагає досягнення повної відповідності всім стандартам ЄС, участі в спільних європейських енергетичних проєктах та розвитку експортного потенціалу технологій і досвіду. А також формування дослідницьких інститутів світового рівня, розвиток інноваційних технологічних кластерів та експорт освітніх і консультативних послуг на міжнародні ринки.

Також варто зазначити, що розробка науково-обґрунтованої моделі оцінки ефективності підземної розробки родовищ корисних копалин є критично важливою для системного аналізу стану галузі та формування стратегій її розвитку. Ця модель призначена для комплексної оцінки та прогнозування ефективності гірничих підприємств з урахуванням техніко-економічних, екологічних та соціальних факторів. Теоретичною основою моделі є теорія систем, яка розглядає гірниче підприємство як складну систему взаємопов'язаних елементів, теорія сталого розвитку з концепцією балансу економіки, екології та соціальної відповідальності, а також інновацій з використанням рівнів технологічної готовності для оцінки інноваційного потенціалу.

Центральним елементом моделі є загальна функція ефективності, яка інтегрує чотири ключові компоненти: техніко-економічну ефективність, екологічну ефективність, соціальну ефективність та інноваційну ефективність. Математично це виражається як зважена сума нормованих індексів, де вагові коефіцієнти визначаються методом експертних оцінок та емпіричної верифікації, і може бути описана у вигляді виразу:

$$E(t) = \alpha_1 ET(t) + \alpha_2 EE(t) + \alpha_3 ES(t) + \alpha_4 EI(t), \quad (1)$$

де $E(t)$ – інтегральна ефективність у момент часу t ;

$ET(t)$ – техніко-економічна ефективність;

$EE(t)$ – екологічна ефективність;

$ES(t)$ – соціальна ефективність;

$EI(t)$ – інноваційна ефективність;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ – вагові коефіцієнти ($\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$).

Техніко-економічна ефективність включає відношення прибутку до витрат, співвідношення фактичного та планового видобутку, індекс автоматизації виробничих процесів та індекс промислової безпеки. Екологічна ефективність враховує зменшення викидів відносно базового рівня, ефективність використання водних ресурсів, частку переробки промислових відходів та індекс рекультивації порушених земель.

Соціальна ефективність формується на основі зниження травматизму відносно базового рівня, співвідношення заробітної плати до середньої по галузі, індексу зайнятості населення регіону та індексу кваліфікації персоналу. Інноваційна ефективність визначається рівнем технологічної готовності, часткою

витрат на дослідження та розробки у доходах підприємства, індексом патентної активності та рівнем цифровізації виробничих процесів.

Аналіз необхідних інвестицій у гірничодобувну промисловість для досягнення європейських стандартів в технологіях і безпеці свідчить про значне недофінансування (рис. 3).

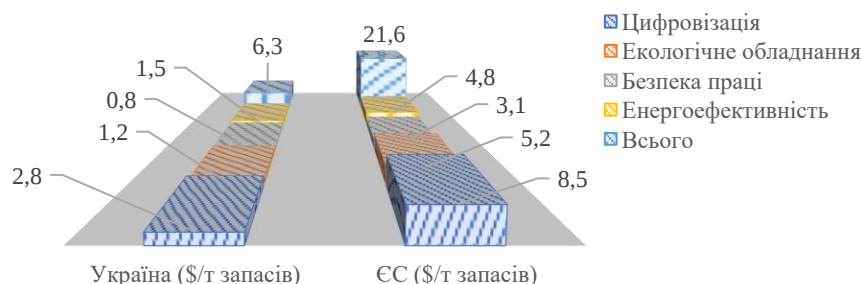


Рис. 3. Аналіз інвестиційних потреб для модернізації

Висновки. Підземна розробка родовищ корисних копалин зберігає стратегічне значення для розвитку гірничодобувної промисловості України, незважаючи на комплекс сучасних викликів і складнощів. Проведений аналіз демонструє значний потенціал галузі для технологічної модернізації та інноваційного розвитку за умови реалізації системного підходу.

Технологічна модернізація є критично важливим для забезпечення конкурентоспроможності української гірничодобувної промисловості на міжнародній гірничій арені. Впровадження цифрових технологій, комплексна автоматизація виробничих процесів здатні значно підвищити ефективність та безпеку гірничого виробництва. Ці рішення дозволяють не лише покращити техніко-економічні показники підприємств, але й забезпечити повну відповідність міжнародним стандартам.

Інтеграція у європейські екологічні стандарти створює можливості для доступу до нових ринків збуту продукції та може стати джерелом конкурентних переваг.

Міжнародна інтеграція та співробітництво є необхідною умовою для успішного розвитку галузі в подальшому. Адаптація до європейських стандартів, участь у міжнародних дослідницьких програмах та активний обмін технологіями сприятимуть підвищенню конкурентоспроможності українських гірничих підприємств. Розвиток академічної мобільності та міжнародного науково-технічного співробітництва забезпечуватиме доступ до передових технологій та кращих практик галузі.

Людський капітал залишається ключовим чинником успішної трансформації галузі. Інвестиції в професійну освіту, підвищення кваліфікації персоналу та створення безпечних умов праці є критично важливими для забезпечення сталого розвитку гірничодобувної промисловості. Формування фахівців, здатних працювати з інноваційними технологіями, буде визначати конкурентоспроможність галузі.

Реалізація перерахованих перспектив потребує координації зусиль державних інституцій, приватного сектору та наукової спільноти. Комплексний системний підхід, який включає технологічні інновації та екологічну відповідальність, дозволить Україні посилити свої позиції на світовому ринку мінеральної сировини. Одночасно це забезпечить розвиток промислових регіонів та створить передумови для їх економічного розвитку.

Подальші наукові дослідження варто направити на розробку технологічних рішень для специфічних умов родовищ, економічного обґрунтування інвестиційних проєктів, модернізації та створення ефективних механізмів для фінансування трансформації галузі. Особливу увагу слід приділити адаптації міжнародних технологій до геологічних та економічних умов України, а також розробці національних стандартів для можливості розвитку гірничодобувної промисловості України.

Список використаної літератури:

1. Institutional determinants of implementation of the smart specialisation concept : case for old industrial coal-mining regions in Ukraine / O.Amosha, O.Lyakh, M.Soldak, D.Cherevatskyi. – 2018. DOI: 10.35774/jee2018.03.305
2. Денисюк О.Г. Цифровізація гірничих підприємств в умовах розвитку Індустрії 4.0. / О.Г. Денисюк, А.В. Панасюк. – 2023. DOI: 10.32702/2306-6814.2023.4.64
3. Mine Field Preparation and Coal Mining in Western Donbas: Energy Security of Ukraine—A Case Study / O.Haidai, V.Ruskykh, N.Ulanova and others // Energies. – 2022. DOI: 10.3390/en15134653
4. Petlovanyi M. Problems of the Earth's Surface Disturbances by Mining Operations in the Conditions of the Kryvyi Rih Iron-ore Basin / M.Petlovanyi, K.Sai. DOI: 10.30525/978-9934-26-309-5-11

5. Автоматизація технологічних процесів підземних гірничих робіт : підручник / А.В. Бубліков, М.В. Козарь, С.М. Проценко та ін. ; за ред. В.В. Ткачова. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2012. – 304 с.
6. Губіна В.Г. Стан і перспективи залізорудної галузі України / В.Г. Губіна, С.С. Чорноног // *Геохімія техногенезу*. – 2024. – № 10. – С. 20–27.
7. Коваленко М.О. Стан і перспективи розвитку гірничої промисловості України / М.О. Коваленко // *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія : Економічні науки* – 2017. – Вип. 22. – Ч. 2. – С. 170–172.
8. Колосов В.О. Стан та перспективи розвитку гірничодобувної промисловості України / В.О. Колосов, М.І. Ступнік, В.О. Калініченко // *Розробка родовищ : Збірник наукових праць*. – 2014. – Т. 8. – С. 193–197.
9. Сталій розвиток територій у зоні видобутку корисних копалин (на прикладі шахт Західного Донбасу / Ю.О. Заболотна, О.О. Лозунова, О.З. Прокудін, Є.В. Тимошенко. – Дніпро, 2017.
10. Проблеми розвитку гірничо-промислових районів: матеріали I міжнародної науково-практичної конференції / за ред. С.В. Подкопаєва. – Покровськ : ДВНЗ «ДонНТУ», 2018.
11. Рудаков Д.В. Аналіз ризиків та можливостей безпечного використання геотермального ресурсу затоплених шахт / Д.В. Рудаков, Я.Сунь, О.В. Інкін // *Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва*. – 2023. – Вип. 25. – С. 92–107.
12. Хоменко О.Є. Технологія підземної розробки рудних родовищ : підручник / О.Є. Хоменко, М.М. Кононенко, М.В. Савченко. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2018.
13. Шепель О.Л. Актуальний стан проблеми переходу з видобутку корисних копалин відкритим способом на технології комбінованого відкрито-підземного та підземного видобутку залізорудної сировини / О.Л. Шепель // *Гірничий вісник*. – 2024. – В.(112). – С. 105–110.

References:

1. Amosha, O., Lyakh, O., Soldak, M. and Cherevatskyi, D. (2018), «Institutional determinants of implementation of the smart specialisation concept: case for old industrial coal-mining regions in Ukraine», doi: 10.35774/jee2018.03.305.
2. Denysiuk, O.H. and Panasiuk, A.V. (2023), «Tsyfrovizatsiia hirnychkykh pidpriemstv v umovakh rozvytku Industrii 4.0.», doi: 10.32702/2306-6814.2023.4.64.
3. Haidai, O., Ruskykh, V., Ulanova, N. et al. (2022), «Mine Field Preparation and Coal Mining in Western Donbas: Energy Security of Ukraine—A Case Study», *Energies*, doi: 10.3390/en15134653.
4. Petlovanyi, M. and Sai, K.. «Problems of the Earth's Surface Disturbances by Mining Operations in the Conditions of the Kryvyi Rih Iron-ore Basin», doi: 10.30525/978-9934-26-309-5-11.
5. Bublikov, A.V., Kozar, M.V. and Protchenko, S.M. (2012), *Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv pidzemnykh hirnychkykh robot, pidruchnyk*, in Tkachova, V.V.(ed.), *Natsionalnyi hirnychy universytet, Dnipropetrovsk*, 304 p.
6. Hubina, V.H. and Chornonoh, S.S. (2024), «Stan i perspektyvy zalizorudnoi haluzi Ukrainy», *Heokhimiia tekhnogenezu*, No. 10, pp. 20–27.
7. Kovalenko, M.O. (2017), «Stan i perspektyvy rozvytku hirnychoi promyslovosti Ukrainy», *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. Ser. Ekonomichni nauky*, Issue 22, Part 2, pp. 170–172.
8. Kolosov, V.O., Stupnik, M.I. and Kalinichenko, V.O. (2014), «Stan ta perspektyvy rozvytku hirnychodobuvnoi promyslovosti Ukrainy», *Rozrobka rodovysch, zbirnyk naukovykh prats*, Vol. 8, pp. 193–197.
9. Zabolotna, Yu.O., Lohunova, O.O., Prokudin, O.Z. and Tymoshenko, Ye.V. (2017), «Stalyi rozvytok terytorii u zoni vydobutku korysnykh kopalyn na prykladi shakht Zakhidnoho Donbasu», *Dnipro*.
10. Podkopaiev, S.V. (ed.) (2018), *Problemy rozvytku hirnycho-promyslovykh raioniv, materialy I mizhnarodnoi nauково-praktychnoi konferentsii*, Pokrovsk, DVNZ, «DonNTU».
11. Rudakov, D.V., Sun, Ya. and Inkin, O.V. (2023), «Analiz ryzykiv ta mozhlyvosti bezpechnoho vykorystannia heotermalnogo resursu zatoplenykh shakht», *Fyzyko-tekhnichni problemy hirnychoho vyrobnytstva*, Issue 25, pp. 92–107.
12. Khomenko, O.Ye., Kononenko, M.M. and Savchenko, M.V. (2018), *Tekhnolohiia pidzemnoi rozrobky rudnykh rodovysch, pidruchnyk*, NTU «Dniprovskia politeknika, Dnipro.
13. Shepel, O.L. (2024), «Aktualnyi stan problemy perekhodu z vydobutku korysnykh kopalyn vidkrytym sposobom na tekhnolohii kombinovanoho vidkryto-pidzemnoho ta pidzemnoho vydobutku zalizorudnoi syrovyny», *Hirnychy visnyk*, Issue (112), pp. 105–110.

Панасюк Андрій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-7468-2022>.

Наукові інтереси:

- маркшейдерія;
- дистанційне зондування землі;
- математичне моделювання;
- підземні гірничі роботи;
- оцінка ресурсів.

Давидова Ірина Володимирівна – кандидат сільськогосподарських наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0001-6535-3948>.

Наукові інтереси:

- промислова екологія;
- екологія гірничого виробництва;
- картографічні методи в екології;
- радіоекологія;
- ресурсо- та енергозбереження.

Мамрай Василь Васильович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0003-1801-7049>.

Наукові інтереси:

- технології ВГР;
- сучасні технології в маркшейдерії;
- гірниче право;
- земельне право маркшейдерія.

Бондарчук Василь Миколайович – старший викладач кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації імені проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0003-2793-8720>.

Наукові інтереси:

- математичні методи та моделі;
- математичні методи аналізу;
- багатофакторний аналіз.

Panasjuk A.V., Davydova I.V., Mamrai V.V., Bondarchuk V.M.

Prospects for underground mining of mineral deposits in Ukraine

The article analyzes the current state and prospects of underground mining of mineral deposits in Ukraine in the context of European integration processes and mining industry challenges. The mining-geological and technical-economic features of underground mining in the main mineral-raw material regions of the country are examined, including Donetsk, Dnipropetrovsk, Kryvyi Rih, and other basins, taking into account the specifics of geological structure and conditions of mineral deposit occurrence. The main problems of mining industry development are systematized, among which are the critical need for technical re-equipment of many mining enterprises with outdated equipment, ensuring an appropriate level of industrial safety in accordance with international standards, compliance with environmental standards, and active implementation of innovative mining technologies. Particular attention is paid to analyzing aspects of mining enterprise modernization and searching for optimal mechanisms for the development of underground mining enterprises. The prospects of digital transformation of mining enterprises are considered, including implementing Industry 4.0 systems, application of automated systems for optimization of mining processes and monitoring of equipment condition and work safety, and prospects for implementing robotic systems. The possibilities of rational use of the worked-out space of underground mining workings for creating underground storage facilities, geothermal stations, and other alternative ways of utilization are analyzed. Based on the conducted research, recommendations have been developed regarding strategic directions for integrating the Ukrainian mining industry into the European system of sustainable development of the mining sector.

Keywords: underground mining; mining operations; mineral resource base of Ukraine; Donbas; Kryvbas; mines; sustainable development; Smart Mine.

Стаття надійшла до редакції 28.08.2025.