

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

**РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНИХ
ПРИРОДООЩАДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ТА ЇХ КОМПЛЕКСНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ
НА ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТАХ УКРАЇНИ**

1. **СТУПНІК Микола Іванович** – доктор технічних наук, професор, Ректор Державного вищого навчального закладу «Криворізький національний університет».
2. **КОВАЛЕНКО Ігор Леонідович** – доктор технічних наук, професор кафедри неорганічної хімії Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет».
3. **КОРОЛЕНКО Михайло Костянтинівич** – Голова Правління – Генеральний директор Приватного акціонерного товариства «Запорізький залізорудний комбінат».
4. **ПОЛТОРАЩЕНКО Сергій Петрович** – Член Правління – Технічний директор Приватного акціонерного товариства «Запорізький залізорудний комбінат».
5. **КАРАПА Ігор Андрійович** – заступник технічного директора – начальник технічного відділу Приватного акціонерного товариства «Запорізький залізорудний комбінат».
6. **ШЕВЧИК Дмитро Володимирович** – Генеральний директор Приватного акціонерного товариства «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат».
7. **КІЯЩЕНКО Дмитро Володимирович** – головний інженер Товариства з обмеженою відповідальністю «Іст-Форт».
8. **НЕБОГІН Валерій Захарович** – директор Товариства з обмеженою відповідальністю «Науково-технічне товариство Технотрон»

РЕФЕРАТ

Кривий Ріг – 2019

Вступ. В Україні сконцентровано близько 20% світових запасів залізної руди, видобування й переробка якої забезпечує до 30% експортного потенціалу країни, разом з тим гірничовидобувна галузь має найбільш дестабілізуючий вплив на довкілля.

За 135 років на Криворіжжі видобуто понад 6 млрд. тонн залізорудної сировини (ЗРС), що призвело до трансформації навколишнього середовища: у відвалах накопичено близько 13 млрд. тонн гірських порід, які разом з хвостосховищами займають площу понад 63 тис. га, ще 60 тис.га знаходяться в зоні підтоплення; у



надрах сформовано сотні мільйонів кубічних метрів порожнин, що призводить до порушень денної поверхні з провалами та зонами обвалення (рис.1).

Рис. 1 Провальні зони земної поверхні (шахта «Тернівська» ПАТ КЗРК, шахта ім. Орджонікідзе ПрАТ ЦГЗК, 2010р.)

До 80% обсягу видобування ЗРС здійснюється в кар'єрах гірничо-

збагачувальних комбінатів (ГЗК), причому ресурс видобування відкритим способом може бути вичерпаний у найближчі 20-30 років.

Перспективи зменшення дестабілізуючого впливу гірництва на довкілля пов'язані з розвитком підземного видобутку корисних копалин за каскадним принципом відходності при реалізації технології закладки виробленого простору, зниження скидів високомінералізованих вод і токсичних викидів у атмосферу.

Мета роботи: Розробка й впровадження технологій підземного видобутку руд за каскадним принципом відходності, які спрямовані на відвернення негативного впливу на довкілля, розв'язують проблему утилізації відходів гірничодобувної промисловості і забезпечують раціональне використання сировинних ресурсів України.

Наукова новизна:

1. Досліджено напружено-деформований стан рудного масиву в залежності від форми очисних камер і конфігурації їх стелін. Встановлено, що величина максимальних напружень гірського масиву залежить від глибини розробки, міцності руди та кривизни стеліни. Найбільш стійкими є склепінньоподібні стеліни, радіус кривизни яких дорівнює половині ширини очисної камери.

2. За допомогою 3D-моделей та програми Ansys 16.0 здійснено розрахунок напружень та деформацій для відпрацьованих пустих та заповнених твердіючою закладкою очисних камер (рис. 2). Встановлено, що рівень напружень при заповненні відпрацьованих камер знижується на 11-16%, а просідання гірського масиву в 2,2 рази менше.

3. З урахуванням фізичних властивостей руд та бічних порід, встановлено опти-

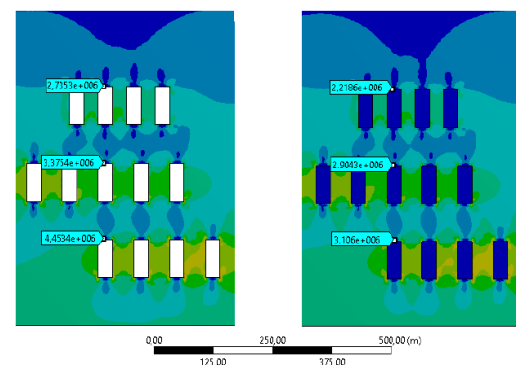


Рис. 2 Ізолії напружень центральної частини блока із зазначеними величинами в стеліні камер: а – порожні камери, б – камери із закладкою.

мальне співвідношення компонентів для забезпечення необхідної міцності закладки при зростанні глибини видобутку (рис. 3). Доведена ефективність утилізації гірських порід відвалу й високомінералізованих шахтних вод ЗЗРК та промислових відходів металургійного виробництва у складі твердіючої закладки виробленого простору.

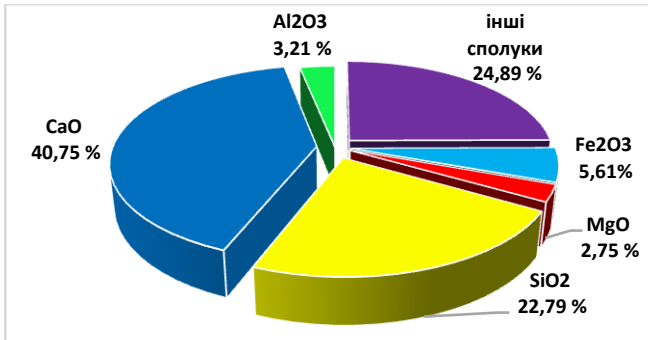


Рис. 3 Діаграма розподілу хімічних сполук складу закладочної суміші, що застосовується в технологічному циклі ПрАТ «ЗЗРК».

4. Науково обґрунтовані технологічні схеми широкого застосування комбінованої відкрито-підземної розробки залізних руд Криворізького басейну на значних глибинах, що дозволяє:

- на 40% знизити обсяги відкритих гірничих робіт;
- виключити втрати руди в міжкамерних ціликах;
- використати як закладку твердіючі суміші, які в стані об'ємного стиснення забезпечують високу несучу здатність і

мають мінімальний вміст в'язучого.

5. Розроблено фізико-хімічні основи технологій емульсійних і гранульованих енергоконденсованих систем (ЕКС), що не містять вибухових компонентів:

5.1 Вперше доведено каталітичний вплив NO₂ як ініціатора циклічного самоприскорюваного процесу теплового вибуху NH₄NO₃ в інтервалі 250-270°C за механізмом автокаталізу. Показано, що введення NO₂ в систему знижує характеристичну температуру термодеструкції на 40-50 градусів.

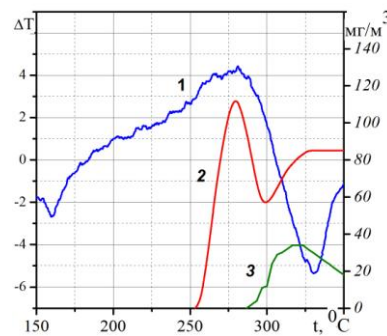


Рис. 4 Виділення газів при термічному розкладі NH₄NO₃ (неізотермічний режим)
1 – ДТА-крива; 2 – NO₂, мг/м³;
3 – NH₃, мг/м³.

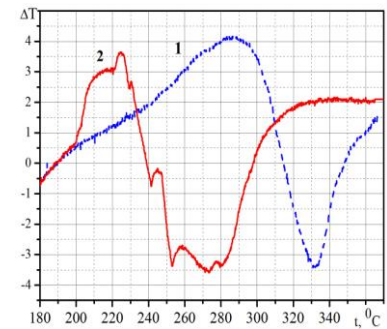


Рис. 5 Термограми NH₄NO₃ в атмосфері (2 л/годину):
1 – повітря; 2 – комбінована подача: до 200 °С- повітря, 200-350 °С - NO₂.

5.2 Запропонований механізм каталітичної дії FeCl₃ на екзотермічний розклад енергоконденсованих систем «NH₄NO₃-вуглеводні», що полягає в утворенні в плаві аміачної селітри Fe(NO₃)₃ та його інтенсивному розкладі в інтервалі 120-150°C із виділенням NO₂, який ініціює автокаталітичний механізм термодеструкції системи при температурах 180-220°C.

5.3 Визначені закономірності модифікації аграрної аміачної селітри (АС) з одержанням гранул підвищеної пористості (6,0-7,5 % за паливом) та оптимальної міцності (7,0-9,0 Н/гран). Встановлено, що оброблення гранул поризуючими розчинами FeCl₃ або Na₃PO₄ з подальшим видаленням внесеної вологи (50-70°C, P = 7-12 кПа) забезпечує реалізацію поліморфного перетворення IV ↔ III NH₄NO₃ та зміцнення гранул за механізмом жорсткого каркасу. Одержані гранули за структурою наближені до кращих світових зразків пористої аміачної селітри - «Grand Poroise», Франція (рис.6), здатні утримувати до 7,5% рідкого палива, мають

оптимальну для застосування міцність.

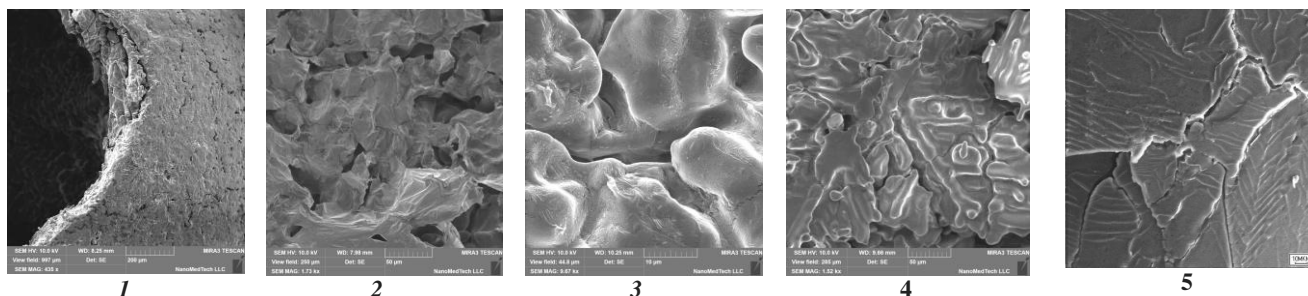


Рис. 6 Електронні фотографії: модифікованих гранул аграрної АС (1–5) та гранули високопористої «Grand Poroise», Франція

5.4 Розроблена та впроваджена інноваційна технологія гранульованих ЕКС, яка полягає в послідовній модифікації аграрної АС в спеціально сконструйованих апаратах комбінованої вакуумної сушки з подальшим просоченням комплексною паливною фазою на основі продуктів переробки жирів рослинного походження при одночасному охолодженні. Одержані високостабільні (понад 3 місяці) збалансовані ВР марки Україніт-АНФО не містять токсичних компонентів та нафтопродуктів і спеціально призначені для безпечного пневматичного заряджання в підземних рудниках на заміну тротилівим ВР.

5.5 Вперше для моделювання хіміко-технологічних процесів застосовано проектування штучних математичних нейронних мереж, впровадження яких на виробництві дозволило оптимізувати технологічні параметри одержання ЕКС.

5.6 Розвинені уявлення про механізм і кінетику взаємодії аміачної селітри з сірчанним колчеданом (мінеральним піритом). Визначено фактори самочинної деструкції нітратних емульсійних енергоконденсованих систем при контакті з мінеральним піритом – температура понад 40°C, рН=2,0-4,5, присутність NaNO_2 та гранульованої аміачної селітри.

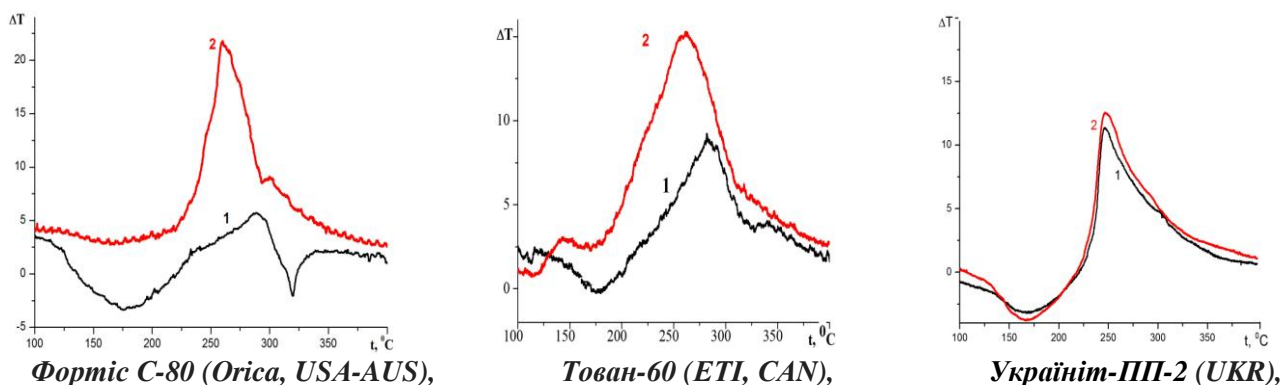
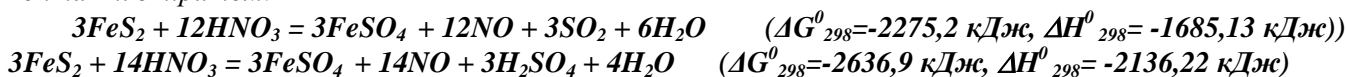


Рис.7 Термограми ЕВР (кр.1) та їх взаємодія з 5% мас. піриту(кр.2)

Табл.1– Результати взаємодії емульсійних ВР з піритом (40 °С)

Емульсійні ВР	Тип сенсibilізації	рН емульсії	Вміст гранульованої АС або АНФО, % мас.	Кількість газів, мг/ кг ВР		
				NO	NO ₂	H ₂ S
Фортіс-С-80	нітритна	2,0-3,0	20	95,75	10,06	19,94
Тован-60	мікросфери	4,0-5,5	40	153,53	129,91	7,68
Україніт-ПП-2	пероксидна	7,2-8,5	0	5,94	0	1,01

Реакції, що можуть спричинити саморозігрів та несанкціонований вибух аміачноселітрянних ВР при контакті з піритом:



5.7 Розроблені загальні принципи створення нітратних емульсійних енергоконденсованих систем, безпечних відносно ендogenous піриту гірських порід. Доведена ефективність деактивації поверхні піриту (рис. 7, табл.1) при пероксидній сенсibiliзації слабколужних емульсійних ЕКС (сумісна дія депресорів та пероксосполук).

5.8 Розроблено апроксимаційну математичну модель, яка враховує зв'язок основних параметрів нітратних емульсійних енергоконденсованих систем (теплота вибуху, тиск і швидкість продуктів реакції в детонаційній хвилі) з хімічним та кількісним складом, реологічними властивостями і щільністю емульсій. Модель детонації емульсійних систем базується на тому, що «запалення» енергоконденсованих систем під дією детонаційної хвилі починається з термодеструкції нанорозмірних часток аміачної селітри, що присутні в дисперсній фазі емульсії.

Табл. 2 – Критичний діаметр детонації ($d_{кр}$) ЕВР на базі: монорозчину NH_4NO_3 та бінарних розчинів $NH_4NO_3/NaNO_3$ і $NH_4NO_3/Ca(NO_3)_2$ (розмір газових включень полідисперсний)

Поруватість	$d_{кр}$, мм		
	NH_4NO_3	$NH_4NO_3/NaNO_3$	$NH_4NO_3/Ca(NO_3)_2$
0,20	51,7	52,1	15,6
0,25	38,1	38,5	12,0

5.9 Доведені переваги застосування систем $NH_4NO_3-Ca(NO_3)_2-H_2O$ як дисперсної фази зворотніх емульсій при вмісті води 8-17 % мас., що забезпечують: високі параметри детонації і чутливості (тиск – 7,43-7,44 ГПа, швидкість – до 5,2-5,3 км/с, зниження критичного діаметру – до 3 разів) за рахунок збільшення теплового ефекту вибухового перетворення компонентів на 420-640 кДж/кг.

6. Розроблено науково-обґрунтовані принципи визначення раціональних параметрів буропідричних робіт при застосуванні розроблених емульсійних ВР у підземних рудниках з урахуванням ступеня завершеності реакції вибухового перетворення. Реалізація методу дозволяє зменшити обсяги буріння і витрати вибухових матеріалів на 10-12% порівняно з тротильовими ВР.

Основні науково-технічні результати та їх практична значимість

1. Комплексне впровадження розроблених екологоорієнтованих технологій здійснено на Запорізькому залізорудному комбінаті (ЗЗРК) шляхом:

- постійного вдосконалення технології закладки виробленого простору;
- максимального використання природних процесів, в яких біота здатна розвиватися в рамках самовідновлення;
- впровадження понад 140 одиниць сучасної енергоощадної бурової, зарядної та допоміжної техніки;
- масштабного застосування безпечних безтротильових ВР з мінімальними викидами токсичних газів;
- розроблення та реалізації оптимальних проектів підричних робіт з урахуванням напружено-деформованого стану масиву.

2. Розроблено новітню технологію одержання емульсійних ЕКС з керованими властивостями з використанням високопродуктивних (до 20 т/год) міксерів статичного типу. Визначені закономірності зміни реологічних параметрів емульсійних

ЕКС дозволили створити емульсії для заряджання висхідних та крутопохилих свердловин.

3. Результати досліджень стали підґрунтям проектування та виготовлення нової спеціальної модульної та самохідної змішувально-зарядної техніки (понад 40 одиниць), яка забезпечила механізоване заряджання наливними емульсійними ВР, як шпурів так і віяла свердловин, у тому числі крутовисхідних свердловин великого діаметру, що не має аналогів у світовій практиці підземних робіт (рис. 8-9).

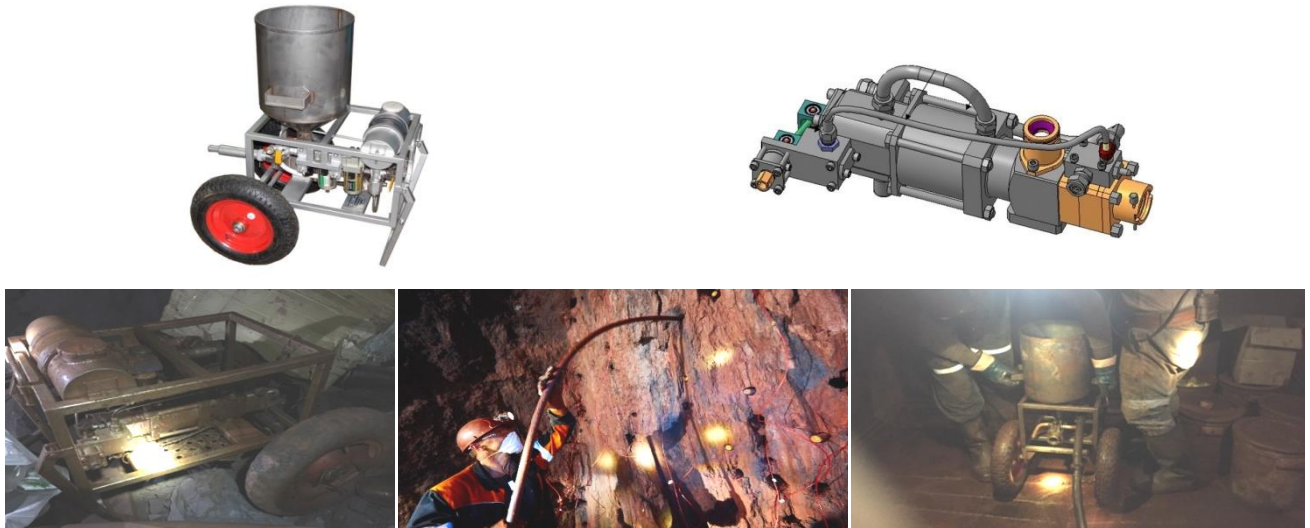


Рис. 8 Малогабаритна змішувально-зарядна техніка ЗЕП-10 для механізованого заряджання шпурів емульсійним ВР Україніт-ПП-2 (загальний вид зарядника та насоса-дозатора)



Рис. 9 Змішувально-зарядна техніка для механізованого заряджання віяла свердловин ЕВР Україніт-ПП-2 (зліва направо): самохідні RTSh-23 та ПЗМК-500 (зарядний модуль); мобільна установка УБМ-1 (для заряджання на відкотних горизонтах).

4. Вперше у світовій практиці на шахті ім. Орджонікідзе (ПАТ «Центральний ГЗК») здійснено механізоване заряджання висхідних свердловин наливною емульсійною ВР з перекачуванням емульсії на відстань до 500 м за допомогою розробленого підземного модульного комплексу ПЗМК-500.

5. Розроблена та впроваджена технологія патронованих емульсійних ВР Україніт-П, які за вибуховими характеристиками перевершують штатні патроновані ВР на основі тротилу та можуть застосовуватись як основний шпуровий заряд, як пром-детонатор та для руйнування негабаритів.

6. Створено 4 нові виробництва з компонентів енергоконденсованих систем та безтритилових ВР на їх основі (Україніт-ПП-2, Україніт-П, Україніт-АНФО):



Рис. 10 Виробництво Україніт-АНФО (ПрАТ «Промвибух» (м. Запоріжжя))

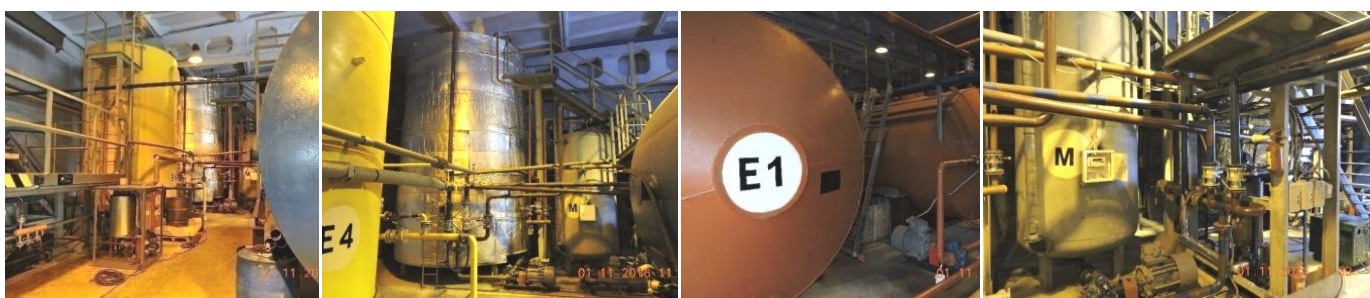


Рис. 11 Виробництво компонентів ЕВР Україніт: промислових емульгаторів та ГГД (ТОВ «Антрацит», Дніпропетровська обл.)

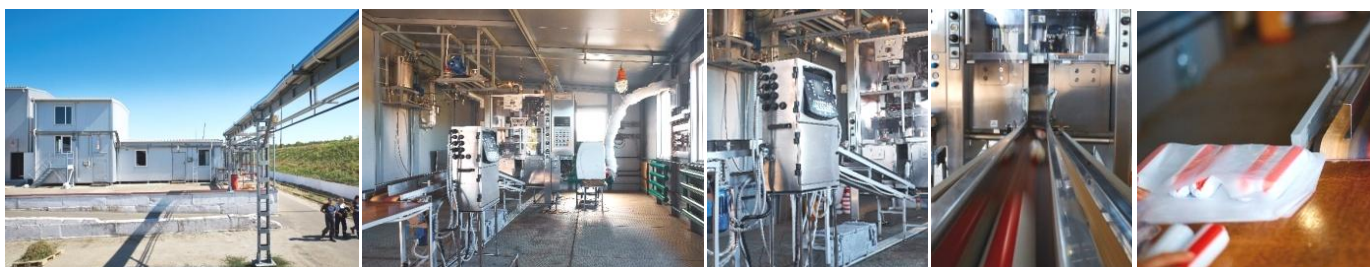


Рис. 12 Виробництво патронованих ЕВР марки Україніт-П (ПрАТ «Промвибух» (м. Запоріжжя))



*Рис. 13 Виробництво шахтної наливної емульсійної композиції ЕК на підприємствах:
- комплекс «Інгулецький» (КФ ТОВ «УВТ»)
- ПрАТ «Промвибух»*

7. Розроблену методику визначення стійкості очисних камер при видобутку багатих залізних руд на великих глибинах впроваджено на шахтах ПрАТ «Суша Балка» та «Родіна» (ПрАТ «Кривбасзалізрудком»), що дозволило на 6-7% знизити втрати глибоких свердловин у стелинах.

8. Запропоновано технологічні схеми комбінованого відпрацювання рудних покладів Криворіжжя, які дозволяють підвищити показники вилучення магнетитових кварцитів при їх підземному видобутку, зменшити собівартість закладки виробленого простору та здійснити утилізацію відходів гірничого виробництва, зокрема хвостів збагачення, в підземних пустотах. Це дає змогу:

- запобігти просіданню земної поверхні і забезпечити стійкість рудного масиву;
- зберегти цілісність водоносних горизонтів, обмежити водоприплив в гірничі виробки;
- знизити ймовірність обвалень порід лежачого та висячого боків покладів;
- підвищити герметичність шахтної вентиляційної мережі;

9. Створені технології безпечних емульсійних (наливні та патроновані) і гранульованих ВР марки Україніт в комплексі з новою технікою та технологією заряджання і розробленою логістикою доставки ЕКС та ВР дозволяють вирішити загальнодержавну проблему повної відмови від цивільного застосування токсичного тротилу і тротилвмісних ВР та знизити обсяг викидів в атмосферу отруйних газів вибуху в 2,5-3,0 рази.

Табл. 3 – Порівняльні характеристики ВР марки Україніт зі штатними ВР

ВР	Теплота вибуху, кДж/кг	Об'єм газів вибуху, л/кг	Швидкість детонації, м/с	Критичний діаметр, мм	Безпека в сульфідних породах
штатні тротилвмісні ВР					
Грамоніт 79/21,	4291	895	3200-3600	50-70	ні
Амоніт №6 ЖВ	4312	895	3600-4800	10-13	ні
<i>штатна гранульована ВР для пневмозаряджання (містить алюмінієвий порошок)</i>					
Грануліт АС-4	4522	847	3000-3600	80-100	ні
безтротиліві ВР марки Україніт					
Наливна ЕВР Україніт-ПП-2	3000-3100	760-840	5100-5400	30-35	так
Патронована ЕВР Україніт П-СА	3900-4300	820-830	4900-5100	20-23	так
Гранульований Україніт-АНФО(КМ-1)	3760-3820	980-990	3200-3800	40-45	ні

Табл. 4 Порівняння газової шкідливості ВР марки Україніт зі штатними ВР

ВР	NOx, л/кг	CO, л/кг	Сумарна кількість шкідливих газів (у перерахунку на умовне CO, л/кг)
штатні тротилвмісні ВР			
Грамоніт 79/21	9,8	28	91,8
Амоніт №6 ЖВ	4,0-4,6 20,5-22,8	34-35 30-35	60-65 (167-189) у картонній оболонці
<i>штатна гранульована ВР для пневмозаряджання (містить алюмінієвий порошок)</i>			
Грануліт АС-4	40,2	35	296
безтротиліві ВР марки Україніт			
Наливна ЕВР Україніт-ПП-2	до 0,1 до 0,2	14,4 27,1	до 15 (до 33) у картонній оболонці
Патронована ЕВР Україніт П-СА	до 0,1	24,4	до 25
Гранульований Україніт-АНФО(КМ-1)	до 0,2	23,5-28,4	27-38

Значимість та ефективність впровадження роботи

Для реалізації мети були успішно розв'язані такі науково-технічні завдання:

- створено наукові засади розробки потужних рудних покладів з урахуванням напружено-деформованого стану геомасиву;
- розроблено наукові основи створення безпечних енергоконденсованих систем (ЕКС) та відповідних вибухових речовин (ВР) на основі досліджень механізмів і кінетики взаємодії нітратних солей із відновниками органічної та неорганічної природи; створені безтротилові ВР за вибуховими характеристиками не поступаються кращим світовим зразкам провідних фірм США, Канади, Австралії, а за безпечністю застосування не мають аналогів;
- створений комплекс екологоорієнтованих технологій буропідривноїх робіт (БПР) з використанням безпечних ЕКС на заміну тротилових ВР. Створені нові виробництва новітніх безпечних ЕКС з оптимізацією технологічних процесів за допомогою нейронних мереж;
- сконструйовано та впроваджено новітню вітчизняну самохідну і модульну змішувально-зарядну техніку з високим рівнем автоматизації, що в сукупності із застосуванням сучасної бурової техніки мінімізує негативний вплив на працівників і забезпечує дистанційне керування БВР за допомогою цифрової інфраструктури;
- досліджено фізико-хімічні процеси, які реалізуються в твердіючих закладках виробленого простору на основі відходів гірничо-металургійного виробництва;
- успішно впроваджено технології з каскадним принципом відходності, що забезпечило стійкий стан рудного масиву, збереження цілісності водоносних горизонтів, утилізацію техногенних відходів у підземному просторі.

1. Комплексне впровадження розроблених екологоорієнтованих технологій на Запорізькому залізорудному комбінаті за останні 10 років забезпечило:

- **виключення просідання земної поверхні завдяки реалізації технології видобування за каскадним принципом відходності – щорічно у складі закладних сумішей виробленого простору утилізується понад 4,4 млн. тонн промислових відходів металургійного виробництва, гірських порід відвалу комбінату, вторинних ресурсів гірничовидобувної промисловості і системи осушення родовища. За весь період реалізації технології утилізовано у виробленому просторі близько 50 млн. тонн відходів та порід відвалу;**
- **виключення скидів високомінералізованих шахтних вод у відкриті водотоки прісних вод;**
- **зменшення втрат та засмічення руди, введення в експлуатацію нових горизонтів з запасами руди 60 млн. т. Середньорічна продуктивність 1 гірника на ЗЗРК у 1,45 рази вище, ніж на шахтах Кривбасу, рентабельність більша у 4,6 рази.**

2. Розроблені технології за показником інтегрального екологічного впливу в 11 разів безпечніші, у порівнянні з традиційними технологіями Кривбасу. Розрахований **екологічний ефект від впровадження на ЗЗРК комплексу інноваційних природоошадних технологій як вартісний показник відвернутої шкоди (реабілітації пошкоджених земель) складає у 2018 році понад 304,5 млн. грн,** що за період 2009-2018 рр. (за попередньою оцінкою) становить **близько 1,92 млрд. грн.**

3. **Створено 4 нових виробництва** з виготовлення енергоконденсованих систем та безтротилових ВР марки Україніт та їх компонентів. **Проектні потужності ство-**

рених виробництв здатні повністю задовольнити потреби підземних рудників України в безтритилових ВР.

4. **Безтритилові ВР марки Україніт** (Україніт ПП-2, Україніт-П та Україніт-АНФО) допущені до постійного виробництва й застосування («Перелік вибухових матеріалів промислового призначення...», затверджений наказом Міністерства соціалітики України №1762 від 23.11.2018р. і постановою Кабінету Міністрів України №1137 від 23.12.2015р), **не містять вибухових та токсичних компонентів, а розроблені технології нітратних ЕКС, склад і збалансованість компонентів забезпечують утворення під час вибуху мінімальної кількості шкідливих викидів, що надзвичайно важливо у підземних умовах із ускладненою вентиляцією.**

5. **Масштабне впровадження розроблених технологій** із застосуванням створених ВР здійснено на Запорізькому ЗРК. Починаючи з 2009 року використано близько 11 тис. тонн безтритилових вибухових матеріалів, **частка яких у загальному обсязі ВР досягла 78%**. З 2013 року розроблені технології широко впроваджуються в Кривбасі: на шахтах ПАТ «Кривбасзалізрудком» застосовано понад 8,7 тис. тонн безтритилових ВР; на шахтах ПрАТ «Суша Балка» - понад 10,3 тис. тонн.

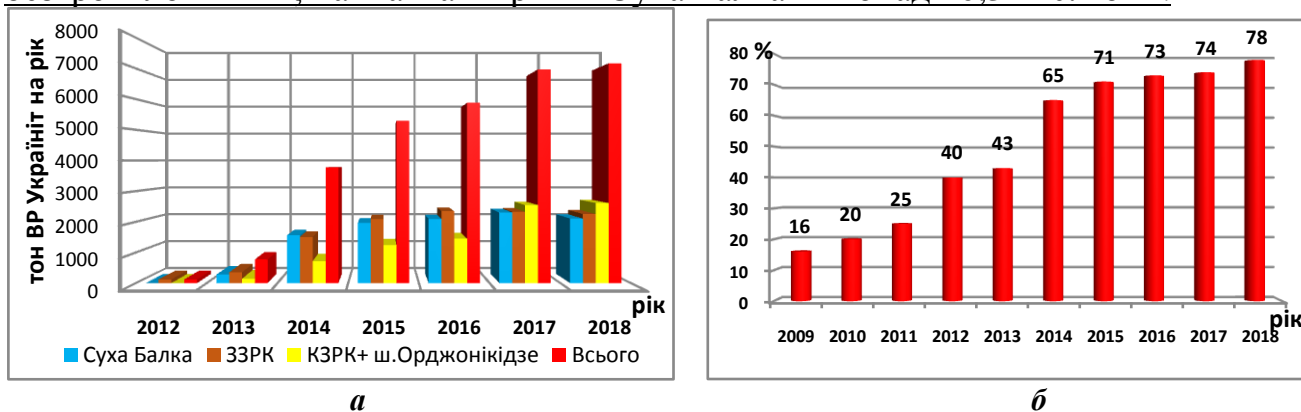


Рис. 14 Споживання безтритилових ВР Україніт на залізрудних шахтах України (а) та динаміка переходу ПрАТ «ЗЗРК» на застосування безтритилових ВР (% від загальної кількості ВР) (б)

6. **Загальний економічний ефект впровадження екологоорієнтованих технологій** на шахтах Кривого Рогу та ПрАТ «ЗЗРК» **склав понад 416 млн.грн.**

Кількість публікацій по роботі: 249, зокрема 5 монографій, 1 посібник, 149 статей (35 – у зарубіжних виданнях). Згідно з базою даних Scopus загальна кількість посилань на публікації авторів, представлені в роботі, складає 54, h-індекс (по роботі) = 4; згідно з базою даних Google Scholar загальна кількість посилань - складає 236, h-індекс (по роботі) = 9. Новизну та конкурентоспроможність технічних рішень захищено 18 патентами України на винахід та 40 на корисну модель. За даною тематикою захищено 2 докторські та 4 кандидатські дисертації.

автори: Ступнік М.І.

Коваленко І.Л.

Короленко М.К.

Полторащенко С.П.

Карапа І.А.

Шевчик Д.В.

Кіященко Д.В.

Небогін В.З.