

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Навчально-науковий механічний інститут

Кафедра розробки родовищ та видобування корисних копалин

Кваліфікаційна робота

бакалавр

(освітній ступінь)

на тему Проект розробки калійних солей Калуш-Голинського родовища»

Виконав: здобувач 4 курсу, групи ГР-41
освітньої програми (спеціальності)

184 «Гірництво»

(код і повна назва спеціальності)

Парфенюк Б.Л.

(прізвище та ініціали)

Керівник ст. викладач Семенюк В.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент: д.т.н., проф. Корнієнко В.Я.

(прізвище та ініціали)

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Навчально-науковий інститут механічний
Кафедра розробки родовищ та видобування корисних копалин
Освітній ступінь бакалавр
Спеціальність 184 «Гірництво»
(код і назва)

З А В Д А Н Н Я
ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧА

Парфенюку Богдану Леонідовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проект розробки калійних солей Калуш-Голинського родовища
керівник роботи старший викладач Семенюк Василь Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом університету від « 24 » квітня 2026 року С № 465

2. Строк подання студентом роботи «17» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи) Відомості про функціонування Калуш-Голинського
родовища калійних солей

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Загальна характеристика родовища. 2. Технологія видобутку калійних солей. 3. Пропозиції по удосконаленню технології. 4. Економічна ефективність прийнятих рішень. 5. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних літературних джерел

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Мультимедійна презентація з висвітленням основних положень роботи

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОДОВИЩА	6
1.1. Географічно-історична довідка Калуш-Голинського родовища	6
1.2. Шахтні поля Калуського гірничо-промислового району	10
1.2.1. Рудник «Калуш»	10
1.2.2. Рудник «Ново-Голинь»	11
1.2.3. Рудник «Голинь»	12
1.3. Домбровський кар'єр	12
1.4. Аналіз дослідницьких праць з технології видобутку калійних солей	14
РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ВИДОБУТКУ КАЛІЙНИХ СОЛЕЙ	17
2.1. Фізико-хімічні основи процесу розчинення кам'яної і калійної солі.....	17
2.2. Способи видобутку розсолів	21
2.2.1. Некероване підземне розчинення солей.	21
2.2.2. Кероване підземне розчинення солей.	25
2.3. Суцільна система розробки	29
2.4. Струминний спосіб розчинення солі	29
2.5. Світовий досвід застосування підземне розчинення калійних солей	31
РОЗДІЛ 3. ПРОПОЗИЦІЇ ПО УДОСКОНАЛЕННЮ ТЕХНОЛОГІЇ	34
3.1. Застосування ультразвукових коливань для прискорення процесів в рідких середовищах	34
3.2. Застосування ультразвуку в гірництві	36
3.3. Ультразвуковий свердловинний випромінювач	37
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ	40
4.1. Економічна ефективність пропонованого методу	40
4.2. Економічна доцільність пропонованого технологічного рішення	45
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	48
5.1. Система організації охорони праці на підприємстві	48
5.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	49

ВИСНОВКИ	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	52

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогоднішній день видобувні роботи на Калуш-Голинському родовищі калійних солей призупинені. На завершальних етапах його активного освоєння застосовувалися як кар'єрний (відкритий), так і шахтний (підземний) методи. З огляду на масштабність соляних запасів цього родовища та гостру потребу вітчизняного промислового сектору в калійній сировині, критично важливим кроком є визначення оптимальної технології для відновлення виробничого процесу.

У зв'язку з цим, упровадження технології свердловинного підземного вилуговування (розчинення) є високоактуальним завданням, розв'язання якого забезпечить максимальну продуктивність та рентабельність видобутку. За умови сприятливого поєднання глибини розміщення соляних пластів та їхньої товщини, метод підземного розчинення через свердловини наразі визнано найбільш раціональним.

Практична реалізація цього підходу дозволяє успішно розв'язати низку ключових проблем, зокрема:

- мінімізувати капіталовкладення в інженерну підготовку родовища до розробки;
- знизити фінансові витрати на будівництво об'єктів розсолопромислу та скоротити терміни їхнього введення в дію;
- суттєво зменшити кінцеву собівартість отриманого концентрату.

Це має вирішальне значення в умовах фінансово-економічної кризи, яку наразі переживає підприємство-надрокористувач.

Мета та завдання кваліфікаційної роботи. Головною метою дослідження є обґрунтування та вибір конкретної технології підземного вилуговування, яка б максимально відповідала гірничо-геологічним характеристикам залягання соляного масиву.

Для реалізації сформульованої мети було визначено такі дослідницькі завдання:

1. Систематизувати історичні дані та проаналізувати геологічну будову Калуш-Голинського родовища калійних солей.

2. Вивчити фізико-хімічні та кінетичні закономірності процесу розчинення соляних порід.

3. Провести порівняльний аналіз чинних технологій підземного вилуговування солей та визначити найефективніший метод для специфічних умов досліджуваного родовища.

4. Сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо інтенсифікації кінетики розчинення.

Об'єкт дослідження: технологічний процес видобування калійних солей у межах Калуш-Голинського родовища.

Предмет дослідження: свердловинні методи підземного розчинення (вилуговування) соляних покладів.

Методи дослідження Для виконання запланованих завдань було застосовано системний комплексний підхід. Він базується на методах аналізу, теоретичного синтезу, а також математичного й фізичного моделювання процесів розчинення з подальшим компаративним аналізом ефективності технологічних схем. Окрім цього, з метою забезпечення наукової новизни роботи, у процесі дослідження було використано гіпотетико-дедуктивний метод.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОДОВИЩА

1.1. Географічно-історична довідка Калуш-Голинського родовища

Калуш-Голинське родовище калійних солей тривалий час було сировинною базою для виробництва мінеральних добрив, металічного магнію, технічної та харчової солей, отрутохімікатів, рідкого хлору, каустичної соди, соляної кислоти, хлорвінілу, поліхлорвінілових і карбонідних смол. Це родовище знаходиться у Калуському районі Івано-Франківської області, у внутрішній зоні Передкарпатського прогину (рисунок 1.1) [1].

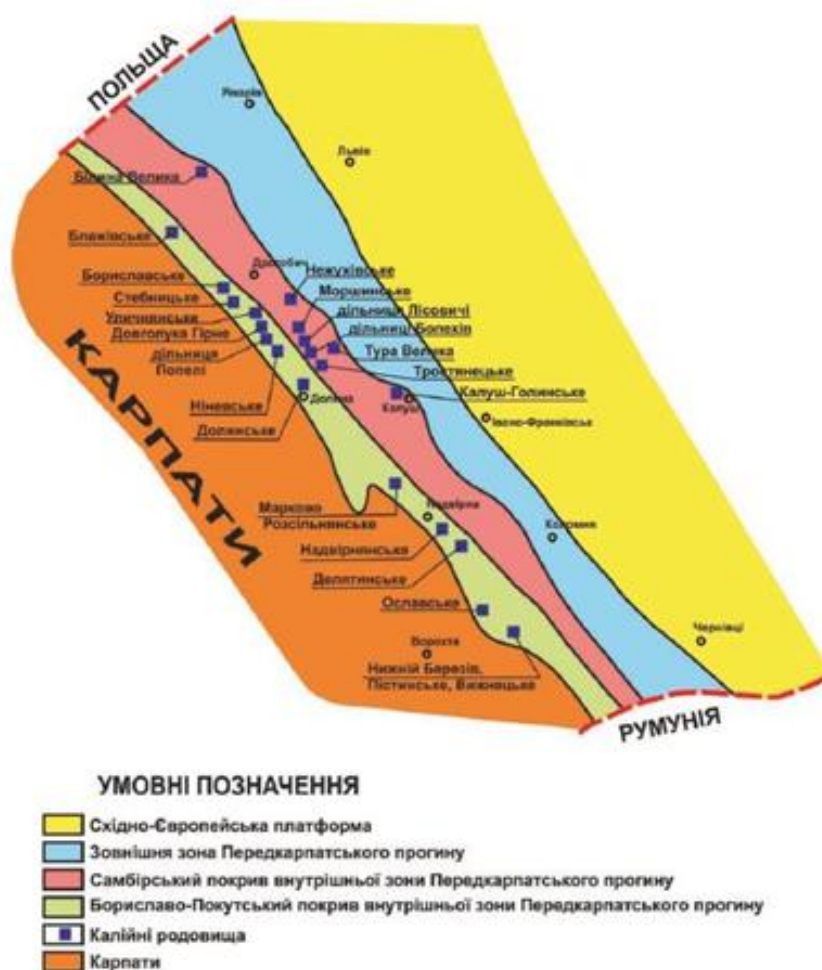


Рис. 1.1. Схема розміщення Калуш-Голинського родовища

Загальна площа Калуш-Голинського родовища охоплює орієнтовно 80 км². Освоєння його покладів кам'яної солі має практично двохсотлітню історію, яка

розпочалася ще у 1826 році. На початкових етапах видобуток базувався на викачуванні природних підземних розсолів, після чого було впроваджено технологію підземних камер вилуговування. Згодом промисловий інтерес змістився в бік полімінеральних калійно-магнієвих солей, що залягають у товщі галіту. Ближче до кінця 1980-х років обсяг розвіданих промислових запасів солі на глибинах до 600 метрів оцінювався у 475 млн т. Продуктивні пласти та лінзи мають протяжність від 2,5 до 3 км, товщину (потужність) — переважно 10–40 метрів (окремі ділянки сягають 60 метрів), а глибина їхнього залягання варіюється в діапазоні від 15 до 1000 метрів.

Протягом останнього періоду активної експлуатації видобувні роботи велися на базі трьох шахт («Калуш», «Голинь» і «Ново-Голинь»), а також на унікальному для світової гірничої практики об'єкті — Домбровському кар'єрі, де застосовувався відкритий спосіб розробки. Сировина надходила на подальше перероблення до хіміко-металургійного комбінату та калійного заводу. Останній функціонував із 1966–1968 років і був зупинений у 2001 році. Проектна потужність цього підприємства, що займає територію площею 1063,5 га, становила 499,2 тис. тонн готової продукції на рік [1;2].

На рудниках «Калуш», «Голинь» та «Ново-Голинь» вилучення солі відбувалося в межах семи шахтних полів із застосуванням камерної системи розробки. Для забезпечення стійкості гірничих виробок залишалися переважно стрічкові міжкамерні цілики.

На сьогоднішній день стан цих підземних об'єктів є таким:

- 3 шахтні поля повністю заповнені сумішшю розсолів із пульпою;
- 2 поля затоплені насиченими соляними розчинами;
- 2 поля перебувають у режимі «сухої консервації».

Сукупність таких об'єктів, як рудники «Калуш», «Голинь», «Ново-Голинь», Домбровський кар'єр, а також наземна інфраструктура (два відвали засолених ґрунтів, два хвостосховища та фабричний шламонакопичувач), формують зону підвищеної техногенно-екологічної небезпеки. Деструктивні процеси на цих територіях можуть спровокувати:

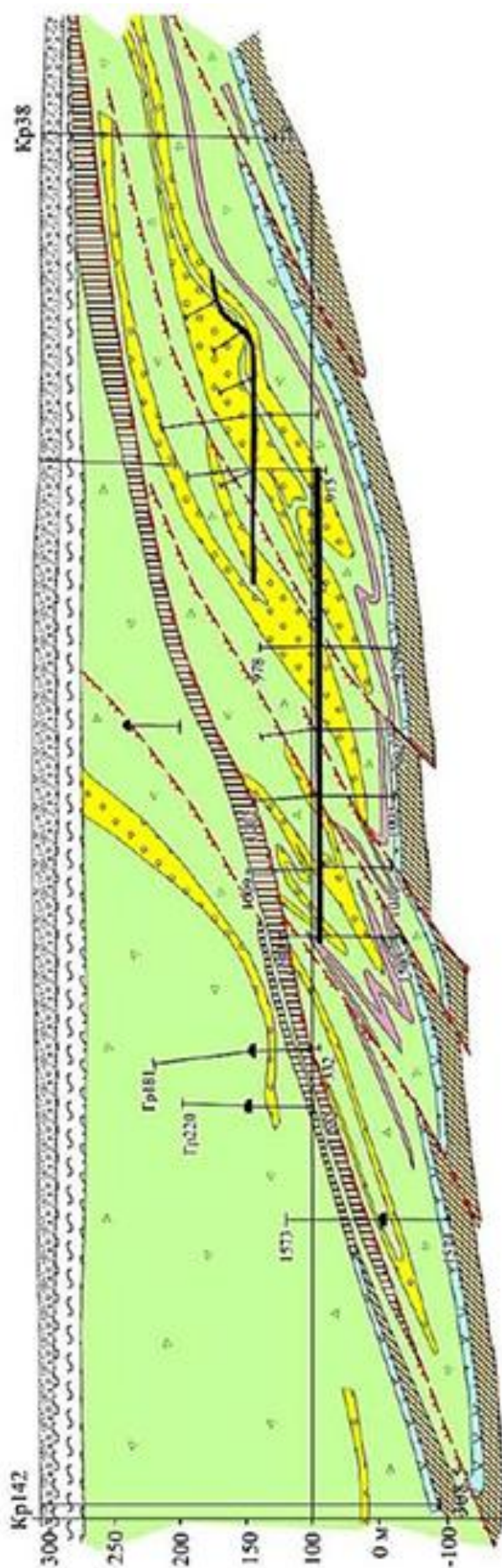
- деформацію та осідання денної поверхні;
- формування карстових порожнин, провалів і глибоких лійок;
- активізацію зсувних процесів;
- масштабне засолення й забруднення прилеглих земельних ресурсів

та водоносних горизонтів.

Геологічний розріз Калуш-Голинського родовища представлений на рисунку 1.2 [2].

Земельний фонд України налічує понад 40 млн гектарів угідь сільськогосподарського призначення. Задля недопущення виснаження ґрунтів та підтримки їхньої високої родючості виникає щорічна потреба у внесенні мінеральних добрив обсягом щонайменше 2 млн т у перерахунку на чистий оксид калію K_2O . Якщо врахувати додатковий попит з боку медицини, хімічної індустрії та житлово-комунального сектору, сумарний щорічний обсяг внутрішнього споживання K_2O сягає 2,2 млн т.

Щоб повністю задовольнити цей попит на внутрішньому ринку за рахунок власного видобутку, промислові підприємства мають щорічно забезпечувати генерацію щонайменше 25 млн т товарного концентрату. Наведені розрахунки підтверджують гостру стратегічну та економічну необхідність відновлення розробки зазначеного калійного родовища.



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Рисунок 1.2. Геологічний розріз Калуш-Голінського родовища

1 – підсолеві теригенні відклади; 2 – ангідритовий горизонт; 3 – соленосна брекчія; 4 – калійний пласт сульфатного складу; 5 – калійний пласт хлоридного складу; 6 – гіпсо-глиниста шапка;

7 – валунно-гравійно-гальковий горизонт; 8 – гірничі виробки;

9 – свердловини; 10 – розривні порушення

1.2. Шахтні поля Калуського гірничо-промислового району

1.2.1. Рудник «Калуш»

Промислова експлуатація рудника «Калуш» тривала понад століття — з 1867 по 1978 рік. Вилучення каїнітових і сильвінітових мінеральних комплексів здійснювалося із застосуванням камерної системи розробки, стійкість якої забезпечувалася формуванням міжкамерних ціликів. Просторове розмежування видобувних робіт дозволило виділити в межах рудника чотири ключові структури:

- Північне сильвінітове поле;
- Північне каїнітове поле;
- Центральне каїнітове поле;
- Хотінське сильвінітове поле.

Північне сильвінітове поле: Активна фаза очисних робіт на цій ділянці припала на 1943–1962 роки в інтервалі глибин 160–400 м, при цьому сумарний обсяг вилученої гірничої маси сягнув 1890 тис. м³. У період з 1957 по 1960 рік тут зафіксували масштабну деформацію денної поверхні. Пікова швидкість вертикальних зсувів була зареєстрована у 1961 році й становила 450 мм/рік.

Внаслідок утворення мульди осідання на поверхні сформувався водосм, дзеркало якого наразі займає площу 30 га. Оскільки природний водозахисний шар (стелина) зберіг свою герметичність та монолітність, підземні мінералізовані розсоли не потрапили у верхні горизонти. Це дозволило акумульованим у мульді поверхневим водам утворити екологічно чисте прісне озеро.

Північне каїнітове поле: Освоєння пластів відбувалося у два етапи (1940–1943 рр. та 1956–1975 рр.) на глибинах від 100 до 260 м; загальний видобуток склав 1326 тис. м³ (*прим.: уточнено розмірність відповідно до загального контексту об'ємів*) руди. Для стабілізації гірничого масиву з березня 1988 по липень 1990 року підземні порожнини штучно затоплювали розсолами.

Попри це, геодинамічні процеси зсуву надвиробкового масиву все ще перебувають в активній фазі. Перші прояви субвертикальних карстових

руйнувань було зафіксовано у 1984 році. Дотепер у межах цього поля задокументовано появу 20 провальних вирв.

Центральне каїнітове поле: Це найстаріша ділянка рудника, де видобуток стартував у 1867 і завершився у 1979 році. Гірничі роботи велися в діапазоні глибин 60–250 м, а обсяг вилученої породи становив 2116 тис. м³. До структури поля належали 11 соляних лінз та 10 камер підземного вилуговування (9 із яких повністю відпрацювали протягом 1920–1943 років) [1;2].

Виробки довоєнного періоду пройшли процес мокрої закладки: порожнечі заповнювали твердими відходами за допомогою гідравлічного транспортування з подальшим дренаванням та відкачуванням надлишкового розчину назад на поверхню. Завдяки цим заходам деформаційні процеси та просідання ґрунту над Центральним полем наразі практично затухли.

Хотінське сильвінітове поле: Відпрацювання запасів здійснювалося у 1961–1975 роках на глибинних відмітках 140–270 м. Сумарний об'єм утворених порожнин склав 947 тис. м³. Частину камер вдалося закласти породою, отриманою від прохідницьких робіт. Проте значна частина виробок Хотінського поля залишилася незаповненою через високу розчинність сильвініту та безпосередню близькість річки Лімниця [1;2].

Наразі існують підтверджені дані щодо інфільтрації вод із надсольового галькового горизонту в підземні камери. Як наслідок, над полем спостерігається небезпечна активізація деформації земної кори.

1.2.2. Рудник «Ново-Голинь»

Освоєння рудника «Ново-Голинь» тривало з 1966 по 1995 рік. Гірничотехнічні роботи велися в межах двох автономних діляниць — «Східна Голинь» та «Сівка Калуська», які залягають у межах однакового глибинного інтервалу (70–260 м). Сумарний об'єм утворених підземних порожнин на руднику досяг 12,2 млн м³.

Динаміку накопичення пустот за ділянками наведено нижче:

- Дільниця «Східна Голинь»: об'єм підземних виробок становить 6863,1 тис. м³;
- Дільниця «Сівка Калуська»: об'єм підземних виробок становить 5294,5 тис. м³.

Згідно з початковим проектом консервації, з березня 1996 року було розпочато ліквідаційне заповнення шахтних пустот. На першому етапі для цього використовували суміш розсолів із Домбровського кар'єру та мулово-солевих відходів (хвостів) збагачення полімінеральних калійних руд. Проте внаслідок повної зупинки збагачувальної фабрики технологію довелося змінити: закачування продовжили виключно рідкими розсолами, які постачалися з Домбровського кар'єру та хвостосховища № 2. На теперішній час незаповненими залишаються ще близько 0,5 млн м³ підземного простору [1;2].

Незважаючи на заходи із мокрої консервації, над обома дільницями рудника фіксуються деформації земної поверхні, які наразі перебувають на початковому етапі свого розвитку.

1.2.3. Рудник «Голинь»

Рудник «Голинь» розроблявся в період від 1931 до 1972 року на глибині 260 м, видобуто 1700 тис. м³ руди. Після закінчення експлуатації його залишили в сухій консервації. Стан підземних виробок цієї дільниці на сьогодні не відомий. Над шахтним полем утворюється мульда просідання із сумарним накопиченням просідань у центрі мульди 3000 мм [1;2].

1.3. Домбровський кар'єр

Домбровська дільниця є унікальним структурним елементом Калуш-Голинського родовища. Її специфіка зумовлена субповерхневим заляганням соленосної товщі, високою компактністю рудних тіл та значною сумарною потужністю калійно-соляних пластів. Тектонічне поперечне підняття поділяє дільницю на два сектори: північний та південний.

Через мілке розташування соляного дзеркала та безпосередню близькість напірного водоносного комплексу, локалізованого у надсольових гравійно-галькових відкладах, шахтний спосіб розробки був визнаний недоцільним. За умов підземного видобутку майже дві третини промислових запасів сировини було б безповоротно втрачено, оскільки їх довелося б залишити у вигляді охоронних ціликів та водозахисної стеліни. З огляду на це, науково обґрунтовані дослідження середина 1960-х років довели технологічну та економічну перевагу відкритого (кар'єрного) способу розробки над традиційним шахтним [1;2].

Головною умовою безаварійної експлуатації кар'єру за таких гідрогеологічних умов є надійна ізоляція видобувної зони від проникнення підземних та поверхневих вод. Початковий інженерний проєкт передбачав комплекс заходів:

- перехоплення динамічного притоку з надсольового водоносного горизонту;
- гідроізоляційний захист оголених соляних масивів;
- оперативний дренаж та відведення атмосферних опадів із нерозкритих площ.

Попри певні конструктивні недоліки, створена система тривалий час забезпечувала відносно стабільний перебіг гірничих робіт. Однак у процесі поглиблення кар'єру гідрогеологічна ситуація на кар'єрному полі та прилеглих територіях безперервно змінювалася. Ці трансформації не бралися до уваги: інженерні споруди водовідведення не модернізувалися, що призвело до їхньої поступової руйнації та фактично повної ліквідації на сьогоднішній день.

Варто наголосити, що з огляду на високі екологічні ризики, комплекс водовідведення та гідрозахисту кар'єру потребує постійної модернізації та підтримання у працездатному стані навіть під час довготривалого призупинення видобувних робіт.

Промислове освоєння Домбровського кар'єру як головної сировинної бази місцевого калійного виробництва стартувало у 1966 році й тривало до повної зупинки заводу в жовтні 2001 року. За цей період об'єм вилученої руди склав 14,7

млн м³, а залишковий потенціал надр оцінюється у 32 млн тонн неперероблених полімінеральних солей. Відпрацювання велося двома автономними кар'єрними заглибленнями: південним (до відмітки 125 м від поверхні) та північним (до відмітки 70 м) [1;2].

На сучасному етапі на об'єкті спостерігається неконтрольоване затоплення з прогресуючим збільшенням об'єму та рівня дзеркала високомінералізованих розчинів. Так, у часовому інтервалі 2008–2010 років середньорічний приплив рідкої фази досягав 3,0 млн м³. Станом на початок літа 2010 року загальна кумуляція розсолів у виробленому просторі кар'єру досягла близько 12 млн м³.

Для розширення сировинної бази та інтенсифікації виробництва пропонується впровадження геотехнологічних (свердловинних) методів. Дана технологія передбачає пропускання слабкомінералізованих або поверхневих вод через залишковий соляний масив кар'єру (обсягом 32 млн т) та інтеграцію додаткових об'ємів розчинів, що утворюються внаслідок змиву солевідвалів та хвостосховищ. Це дозволить штучно нарощувати обсяги кондиційного високомінералізованого розсолу для промислового перероблення.

1.4. Аналіз дослідницьких праць з технології видобутку калійних солей

Оскільки використані для розробки калійних солей Калуш-Голинського родовища методи спричинили складну екологічну ситуацію в районі його розташування і є ресурсо- та енергозатратними я пропоную застосовувати геотехнологічний метод підземного розчинення калійних солей через свердловини.

Видобування солі через свердловини відомо з XII століття. У 1927 р. П.І. Преображенський висловив ідею розробки родовищ калійних солей підземним розчиненням через свердловини. Технологічний процес ПРС був розроблений у США у 1933 р. Е. Тремпом У СРСР цей спосіб також мав широке поширення, чому сприяли наукові розробки П.А. Кулле, П.С. Бобка, П.М. Дудка, В.С. Романова, Б.П. Каратигіна, Ф.І. Березіна, В.Ж. Аренса, Р.С. Пермякова, В.М. Глоби та інших радянських учених [3-5].

Теоретичне та практичне обґрунтування можливості освоєння глибоко залягаючих калійних пластів за допомогою безшахтних технологій досліджувала плеяда провідних науковців, серед яких вагомий внесок зробили П. І. Преображенський, А. Е. Риковський, І. З. Успенський, І. З. Розенкранц, Е. І. Ахумов, Янеке, Фюрер та інші.

Еволюція світового досвіду перших спроб застосування технології підземного вилуговування на калійних родовищах характеризується такими етапами:

- 1915 рік (Німеччина): Професори Янеке та Фюрер здійснили перші в історії експерименти з підземного розчинення калійних покладів.
- Кінець 1940-х років (США): Аналогічні дослідно-промислові випробування було розгорнуто в Карлсбаді (штат Нью-Мексико).
- 1950 рік (Великобританія та Канада): Проведення аналогічних експериментів з метою безшахтного вилучення калійної сировини.

Примітка: Через тогочасний недостатній розвиток геотехнологічних засобів керування формою камер та контролю кінетики розчинення, усі вищезгадані перші закордонні спроби не принесли очікуваного промислового успіху.

На теренах СРСР концепцію розробки покладів калійних солей методом свердловинного підземного розчинення вперше сформулював у 1929 році видатний геолог, професор П. І. Преображенський. Він висунув пропозицію впровадити цей безшахтний підхід для освоєння сильвінітових пластів Верхньокамського родовища. Надалі ця наукова ініціатива знайшла широку підтримку та отримала теоретичний розвиток у працях таких відомих фахівців галузі, як І. З. Розенкранц, А. Е. Риковський, Е. І. Ахумов, Б. Б. Васильєв та інші.

Промислове перероблення отриманих розсолів пов'язане з високими операційними витратами, зумовленими технологічною необхідністю випаровування великих об'ємів рідкої фази (води). З огляду на це, практичному впровадженню технології свердловинного підземного вилуговування калійних

покладів обов'язково має передувати глибоке техніко-економічне обґрунтування та детальний аналіз рентабельності.

У контексті світової практики показовим є приклад успішної комерційної реалізації методу підземного розчинення калійних солей у Канаді (провінція Саскачеван). Ефективність та доцільність застосування геотехнологічного методу на цьому об'єкті обумовлені унікальним поєднанням природних чинників.

Сприятливі геолого-термічні передумови родовища Саскачеван:

- Висока концентрація корисної компоненти: вміст хлориду калію (KCl) у пласті сягає пікових 56% (за середнього показника 30%);
- Значна геометрична потужність: товщина продуктивного покладу становить орієнтовно 30 метрів;
- Природний термічний потенціал: температура соляного масиву на глибині близько 1600 метрів досягає 45 °С, що суттєво інтенсифікує кінетику розчинення.

Повний цикл розробки родовища – від перших фундаментальних досліджень на пілотній установці до введення промислового комплексу в експлуатацію — тривав дев'ять років. Інженерно-технологічний супровід та будівництво об'єкта виконала американська компанія «Каліум кеміклз» (*Kalium Chemicals*), а сумарний обсяг інвестицій склав близько 50 млн доларів.

Навіть при теоретично правильному ході процесу виникають експлуатаційні втрати, зумовлені тим, що частина маточника, що містить при 20°C в 1 л 127 г KCl, скидається. Інша частина маточника залишається у виробленому просторі. Для видобутку бідних калієм руд при великій потужності покладу слід частину камери заповнювати нерозчиненою кам'яною сіллю. Дослідження показали, що при 50-процентному заповненні порожнин і 20-процентному вмісті K₂O 17 можливий вихід 50-процентного розчину. Однак, і в цьому випадку видобуток таких руд неекономічний [1-5].

РОЗДІЛ 2. ТЕХНОЛОГІЯ ВИДОБУТКУ КАЛІЙНИХ СОЛЕЙ

2.1. Фізико-хімічні основи процесу розчинення кам'яної і калійної солі

Взаємодія солі з рідиною є гетерогенним процесом, оскільки він протікає на межі зіткнення двох різних станів речовини – твердого та рідкого. Цей фізико-хімічний перехід складається з трьох послідовних етапів:

1. Транспортування: молекули рідкого розчинника спрямовуються до поверхні твердої речовини.
2. Атака та взаємодія: безпосередній контакт і фізико-хімічний зв'язок між компонентами на межі фаз.
3. Дифузія: відведення утворених частинок розчиненої солі від твердої поверхні та їх розподіл в об'ємі рідини.

Під час розчинення твердого тіла рідка фаза завжди перебуває в русі відносно нього. Проте, незалежно від інтенсивності цього руху, безпосередньо на межі розділу фаз утворюється специфічний прикордонний (дифузійний) шар. Він виконує роль своєрідного бар'єра, що сповільнює проникнення частинок солі в основну масу розчину.

Головний чинник швидкості: Інтенсивність дифузії та швидкість усього процесу розчинення загалом залежать від градієнта концентрації (різниці між насиченістю розчину біля поверхні солі та в його загальному об'ємі), а також від загальної кількості розчинника.

Кінетика розчинення твердого тіла в рідині наступна:

$$\frac{vdc}{d\tau} = kS(C_n - C), \quad (2.1)$$

де v – об'єм розчину, м^3 ; τ – тривалість утворення концентрованого розчину, год; k – коефіцієнт швидкості дифузійного розчинення; S – площа розчинення; C_n , C – концентрація солі, відповідно, в насиченому розсолі і в розчиннику, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Коефіцієнт швидкості для дифузійного розчинення (за В.Ж. Аренсом):

$$K = \frac{\varepsilon D^{213}}{v^{113}}, \quad (2.2)$$

де ε – константа, спільна для тіл дифузійного розчинення; D – коефіцієнт дифузії, м³/год; v – кінематична в'язкість.

Лінійна швидкість розчинення твердих тіл:

$$W = \frac{q}{\rho_c} \cdot \frac{k(C_n - C)}{\rho_c}, \quad (2.3)$$

де q – кількість розчиненої солі з одиниці поверхні за одиницю часу; ρ_c – щільність кам'яної солі [6].

Зростання концентрації солі у рідкому середовищі призводить до уповільнення процесу її подальшого розчинення, що підпорядковується логарифмічному закону. Інакше кажучи, динаміка цього процесу прямо пропорційна поточному рівню насиченості розчину.

Численні наукові експерименти доводять, що швидкість розчинення є величиною змінною. Вона трансформується в часі, навіть якщо такі базові показники, як температура системи та стартова концентрація речовини, залишаються незмінними.

Аналізуючи специфіку розчинення кам'яної солі, дослідник П. А. Кулле встановив, що для побудови точної математичної та фізичної моделі цього процесу недостатньо враховувати лише хімічні чинники. Необхідно обов'язково брати до уваги гідродинамічні параметри руху рідини.

Ці параметри безпосередньо залежать від двох ключових факторів:

- В'язкість розчину (яка змінюється в міру його насичення);
- Вплив гравітаційних сил (сили тяжіння), що зумовлює виникнення природної конвекції через різницю густини шарів рідини.

Швидкість розчинення солі є динамічною величиною, на яку суттєво впливають температурний режим та просторове розташування (кут нахилу) робочої поверхні.

Експериментальні дані демонструють чітку закономірність залежності процесу від гравітаційних потоків (рисунки 2.1):

- **Мінімальна швидкість (кут 0°):** Коли горизонтальна поверхня солі розміщена *під* шаром розчинника, дифузія відбувається найповільніше. Важчий, уже насичений розчин накопичується зверху й блокує доступ свіжої води.

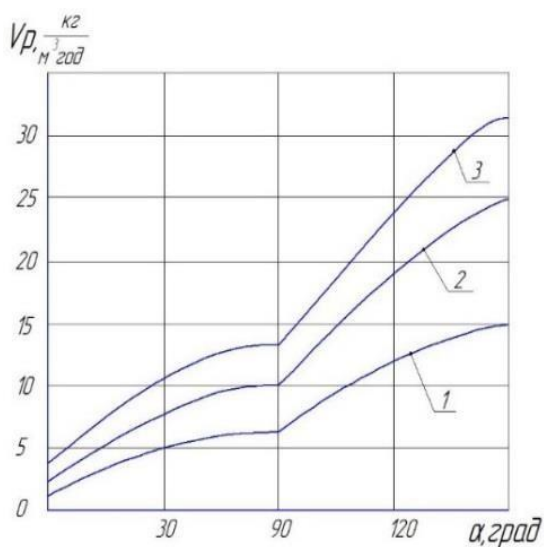
- **Максимальна швидкість (кут 180°):** Коли сіль знаходиться *над* розчинником, під дією сили тяжіння виникають спадні вертикальні потоки. Густіший розсіл одразу стікає вниз, звільняючи місце для нових порцій недонасиченої рідини.

Під час вилучення солі з реальної породи процес ускладнюється через наявність нерозчинних механічних домішок. Це зумовлює такі технологічні особливості:

- **Фактор шламу:** Нерозчинні часточки (шлам) під дією гравітації осідають на дно та похилі стінки камери. Цей осад створює захисний екран, який ізолює корисну породу від контакту з водою і суттєво гальмує її подальше руйнування.

- **Гідродинаміка розсолу:** Концентрований розчин стікає по стінах виробки й акумулюється в її нижній зоні.

Підсумкова інтенсивність розмиву стінок камери безпосередньо визначається геометрією їхнього нахилу та товщиною накопиченого на них шламового шару [9].



Рис/ 2.1. Графік залежності швидкості C_p розчинення солі від кута α нахилу поверхні: 1,2,3 - відповідно при температурі 5°C , 15°C , 25°C

Залежно від зміни температури води розчинність галіту сильвініту змінюється по-різному. На рисунку 2.2 чітко видно, що при збільшенні температури розчинність хлориду калію у воді різко зростає, в той час як розчинність хлориду натрію практично не змінюється.

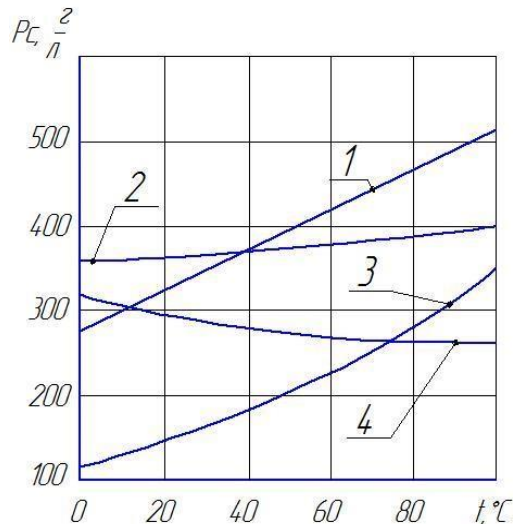


Рис. 2.2. Графік залежності розчинення P_c KCl (1) та NaCl (2) у воді від температури t : 3,4 – відповідно розчинність KCl та NaCl при спільному їх розчиненні

Взаємна розчинність солей у системі NaCl - KCl - H_2O має специфічну температурну залежність. У середовищі, яке вже насичене хлоридом калію (KCl), здатність хлориду натрію (NaCl) до розчинення дещо падає за умови зростання температури.

Ця аномалія є основою високоефективного промислового методу розділення солей, який реалізується у два ключові етапи:

- Вилуговування при високій температурі: Гарячий розчин селективно вимиває з руди (сильвініту) максимальну кількість хлориду калію, тоді як розчинення хлориду натрію блокується через ефект насичення.
- Селективна кристалізація: Під час подальшого охолодження отриманого розчину до температури $20\text{ }^\circ\text{C}$ з нього випадає у осад чистий KCl, оскільки його розчинність стрімко падає із зниженням температури, тоді як NaCl залишається в рідкій фазі [3-5].

Така розбіжність у поведінці солей дозволяє здійснювати ефективне розділення компонентів силвініту термохімічним способом, мінімізуючи втрати цільового продукту.

2.2. Способи видобутку розсолів

За своїм походженням розсоли класифікують на дві основні групи: природні (звичайні) та штучні.

Технологія підземного розчинення кам'яної солі спрямована на видобуток штучних розсолів високої концентрації. Цей метод мінімізує потребу в шахтному видобутку і реалізується шляхом подачі розчинника безпосередньо в соляний пласт.

2.2.1. Некероване підземне розчинення солей

До некерованого розчинення відноситься прямоточне і протиточне.

При прямоточному розчиненні пласта в свердловину опускається одна робоча колона труб, нижній кінець якої встановлюється на відстані 1...2 м від ґрунту пласта.

За описаної схеми подачі технологічний процес організовано як протитік: свіжа вода подається вглиб по внутрішній (центральної) колоні труб, тоді як концентрований розсіл витісняється на поверхню через кільцевий міжтрубний простір. За такої гідродинаміки фіксується відносно висока інтенсивність розмиву соляного масиву, яка може перевищувати 15 см/добу.

У процесі підземного вилуговування геометрія утвореної порожнини (камери) проходить три послідовні стадії розвитку (рис. 2.4):

Еволюція форми підземної камери

- I стадія (Грушоподібна форма): На початковому етапі розмиву водяний потік рухається вгору вздовж стінок початкового стовбура у турбулентному режимі. Висока турбулентність та максимальний дефіцит насичення рідини зумовлюють інтенсивне розширення нижньої та середньої частин, через що вироблений простір набуває грушоподібних обрисів.

- II стадія (Перехідна форма): У міру збільшення об'єму порожнини характер руху змінюється. Свіжа вода конвекційними потоками піднімається вгору переважно у приствольній (центральной) зоні камери. Там вона поступово змішується з уже густішим розсолом, який заповнює периферійні (пристінкові) ділянки вироботки.

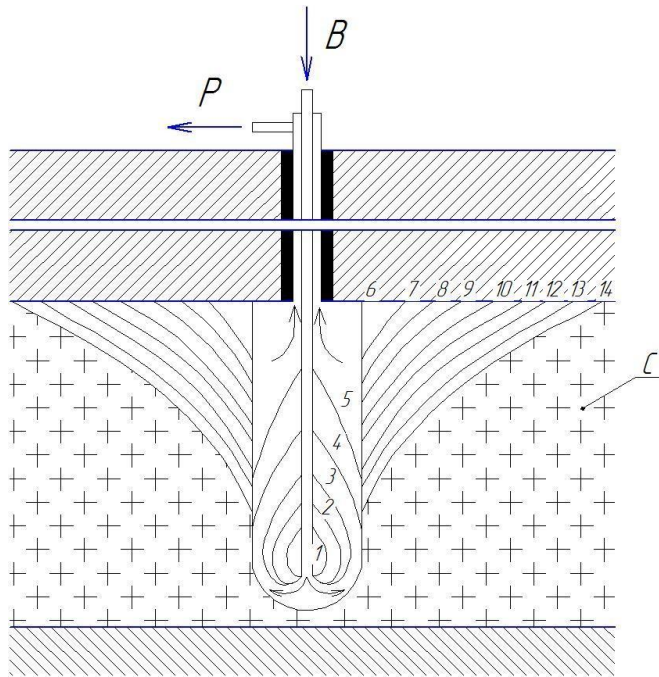
- III стадія (Конусоподібна форма): На завершальному етапі всередині камери виникають складні зустрічні потоки рідин різної густини. Внаслідок нерівномірного розмиву верхніх і нижніх шарів соляного пласта порожнина остаточно трансформується і набуває характерного конусоподібного вигляду[3-5].

Недоліки прямоточного розчинення:

- 1) формоутворення камери відбувається стихійно;
- 2) розсоли отримані із свердловини не повністю насичені;
- 3) низький (до 2,5%) коефіцієнт вилучення солі;
- 4) небезпека осідання земної поверхні через некерованість процесу розчинення;
- 5) недовгий термін служби експлуатаційних свердловин;
- 6) неможливість застосування при вмісті нерозчинних частинок більше 10%;
- 7) мала продуктивність (до 15...20 м³/год);
- 8) недовгий термін експлуатації (не більше 3...5 років);
- 9) ефективний лише при використанні на родовищах солі високої якості.

Переваги прямоточного розчинення:

- 1) мала (близько місяця) тривалість підготовчого періоду;
- 2) спрощена конструкція свердловин;
- 3) невеликі витрати на обладнання.



Рис/ 2.4. Схема розвитку камери розчинення прямоточним методом (за Ходьковим): цифрами вказані основні етапи формування камери;

P – розсіл; B – вода; C - поклад солі

При застосуванні схеми, де конструкція свердловини лишається аналогічною, але змінюється вектор подачі реагентів, прісна вода спрямовується у міжтрубний простір. За такої організації потоків розчинник потрапляє в підземну камеру зверху. Оскільки густина чистої води менша, ніж у концентрованого розчину, утворений насичений розсіл опускається і накопичується в донній частині виробки, звідки під тиском евакуюється на поверхню через центральну (внутрішню) колону труб.

Такий розподіл потоків кардинально змінює геометрію камери та зумовлює такі процеси:

- Гравітаційне розшарування: Усередині конусоподібної порожнини відбувається чітке розділення шарів рідини за густиною — концентрація солі лінійно зростає в напрямку від покрівлі до дна.
- Інтенсивне розмивання покрівлі: Постійне надходження ненасиченої води у верхню зону камери призводить до агресивного горизонтального розмиву соляного пласта безпосередньо під перекриваючими породами. Як наслідок, у

покрівлі формується широка щілина, яка розростається вбік зі швидкістю близько 3 см/добу.

Найбільш критичною особливістю цього методу є неконтрольоване збільшення діаметра приповерхневої щілини, швидкість розширення якої може досягати 20–24 см/добу, особливо на межі контакту солі з іншими літологічними різновидами (гіпсами, ангідритами чи глинами).

Це призводить до низки серйозних аварійних ситуацій:

1. Геомеханічна деформація: Втрата опори викликає масивні обвалення слабких порід, що залягають над соляним пластом.
2. Механічні пошкодження: Обвалена порода створює колосальні згинальні навантаження, що спричиняє деформацію, закупорювання або повний зріз (обрив) підземних робочих колон.
3. Вихід з ладу виробки: Наслідком масштабних вивалів породи є повне завалювання камери нерозчинним шрамом, що унеможлиблює її подальшу експлуатацію.

Порівнянно з прямиотічним протитічне розчинення має ряд переваг:

- 1) більший видобуток солі (до 10%);
- 2) більший термін служби свердловин (до 8 років).

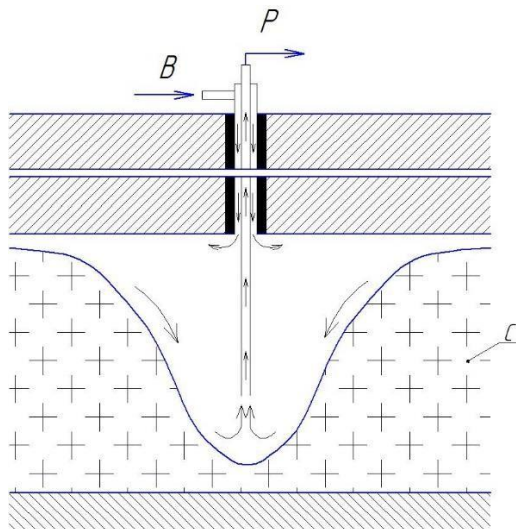


Рис. 2.5.Схема розчинення солі методом протитоку (кінцевий період):

P – розсіл; B – вода; C - поклад солі

Комбінований спосіб розчинення набув найбільшого поширення в

практиці розробки соляних пластів. При його використанні солі розчиняються у два етапи.

На першому етапі відбувається формування камери у висхідному напрямку, на другому – нижня і верхня частини камери формуються назустріч одна одній (рис. 2.6), тобто верхню формують у низхідному напрямку, а нижню – у висхідному [4;5].

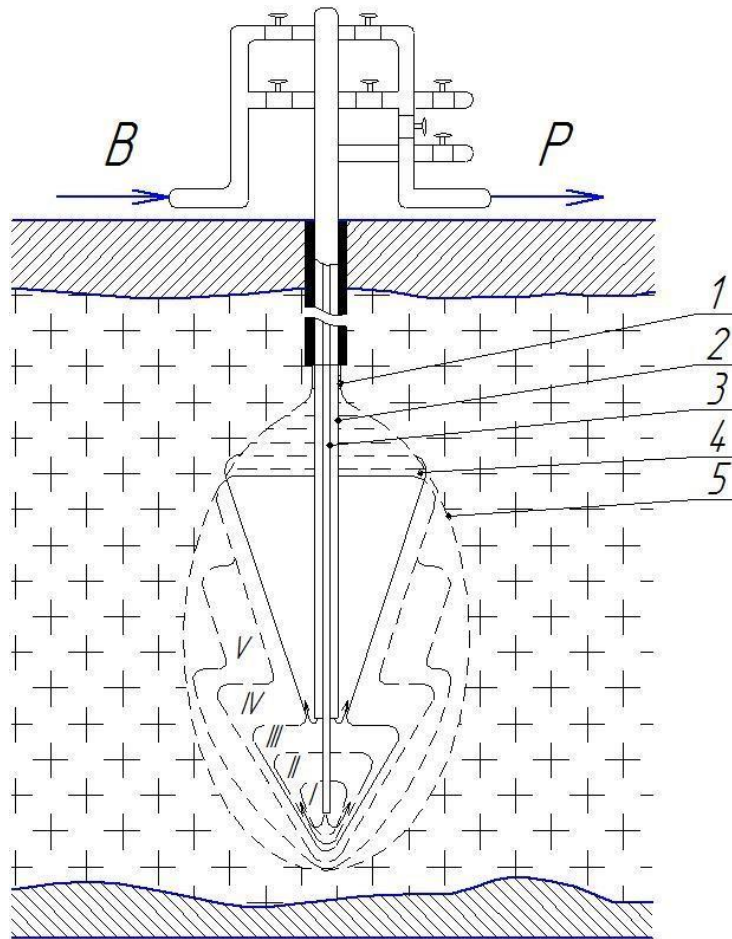


Рис. 2.6. Технологічна схема розчинення солі комбінованим способом:

1 – обсадна колона; 2 – водоподавальна колона; 3 – розчинопідйомна колона; 4 – нерозчинник; 5 – проектний контур камери; I – V – етапи розчинення

2.2.2. Кероване підземне розчинення солей

В даний час широко і успішно застосовуються більш прогресивні способи керованого підземного розчинення із застосуванням гідровруба і метод пошарового розчинення.

Гідровруб — це спеціальна гірська виробка, що створюється в нижній частині пласта і має форму горизонтального кільцевого врубу навколо свердловини, що розкриває соляний поклад та обладнується трьома колонами труб: обсадною 0,325 мм і двома експлуатаційними 219 і 114 мм.

Для створення керованого підземного резервуара та запобігання аварійним обваленням покрівлі застосовують триколонну конструкцію свердловини. Простір між трубами розподіляється за таким функціональним призначенням:

- Зовнішнє (приобсадне) кільцеве затруб'я: використовується для закачування ізолюючого агента (нерозчинника – наприклад, нафтопродуктів або газу) (рис.2.7).
- Проміжний міжтрубний простір: служить для безперервного нагнітання свіжої води (активного розчинника).
- Центральний канал (внутрішня колона): призначений для підйому утвореного насиченого розсолу на поверхню.

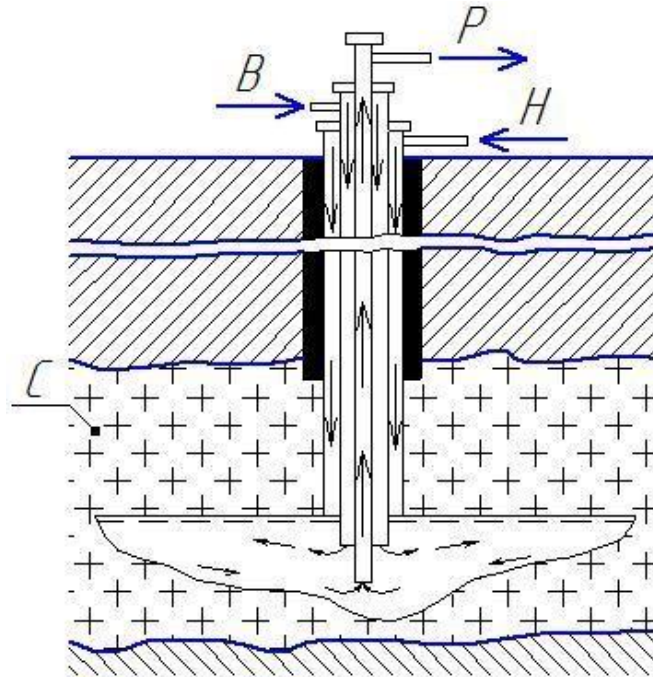
Правильне взаємне розташування нижніх кінців (башмаків) робочих колон є критично важливим для формування первинної вироботки:

1. Башмак розсолотідиомної колони заглиблюють так, щоб перед стартом розмиву він знаходився всього на 0,3–0,5 м вище від нижньої межі пласта, який планується до відробки.
2. Башмак водоподаючої колони (яка має більший діаметр) фіксують вище від розсолотідиомного на 1,5–2,0 м. Цей інтервал визначає проєктну висоту майбутнього гідроврубу.

Експлуатація системи базується на безперервному та одночасному розрахунковому подаванні води й гідроізоляційного флюїду з паралельним відкачуванням готового продукту.

- Захисний екран: Маючи меншу густину, ніж вода і розсіл, нерозчинник завжди акумулюється у найвищій точці порожнини. Він створює надійний захисний шар під покрівлею, повністю блокуючи її вертикальний розмив.

- Направлений розвиток порожнини: Завдяки верхньому екрану вилуговування соляного масиву відбувається суто у горизонтальній площині (вбік від осі свердловини).
- Тривалість етапу: Цей підготовчий етап триває орієнтовно 400–450 діб безперервної роботи. Його результатом є створення плоского горизонтального гідроврубу, радіус розмиву якого досягає діаметра близько 100 м [3-5;7].



Рис/ 2.7. Схема розчинення солі методом гідровруба:

P – розсіл; B – вода; C – поклад солі; H – нафта

Описана технологія має обмежену ефективність, дозволяючи вилучати з пласта не більше 15% від загальних запасів солі. До її ключових мінусів належать:

- Надто тривалий підготовчий етап (формування початкової порожнини);
- Відсутність дієвих інструментів контролю та керування процесом розмиву на стадії активної експлуатації камери.

Новий спосіб керованого підземного розчинення через свердловини, запропонований П. С. Бобко, передбачає пошарове розчинення камери на всіх

стадіях її формування за схемою, наведеною на рис.2.8.

Цей метод полягає в періодичному підйомі башмака колони водоподаючих труб на висоту ступеня розчинення. У камеру в процесі відпрацювання шару солі систематично вводиться нерозчинник. Після відпрацювання шару солі колона водоподаючих труб піднімається до відмітку верхньої межі другого ступеня розчинення, а колона розсолотідиомних труб — на висоту, що забезпечує можливість отримання чистих розсолів.

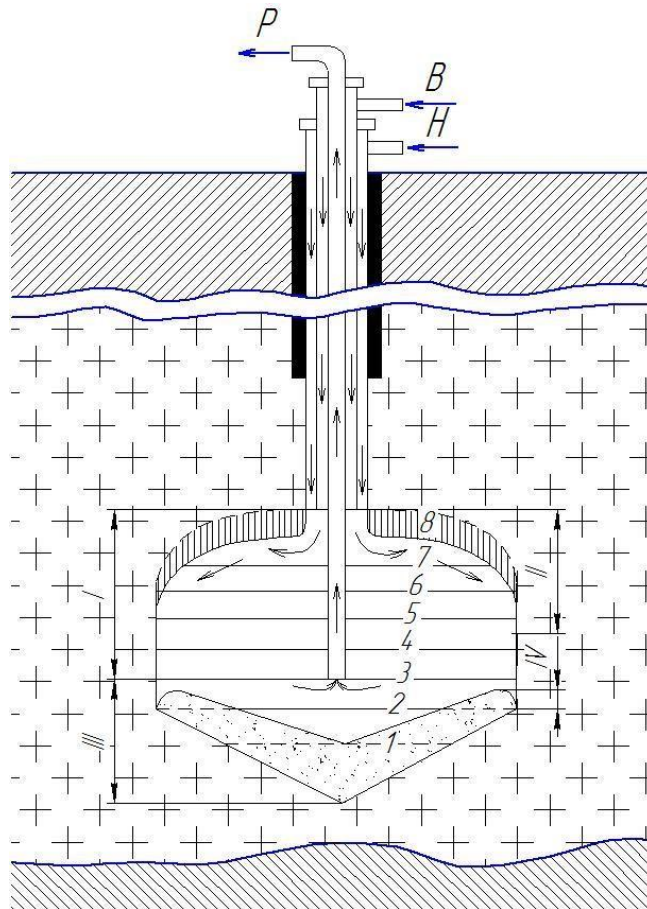


Рис. 2.8. Схема пошарового розчинення солей (цифрами вказані ступені розчинення): *I* - активна зона; *II* - зона формування розсолу; *III* – зона консервації розсолу; *IV* - зона закладки

Висота шару залежить від геологічних умов залягання і складу соляних порід. Вона змінюється в підготовчий період від 0,75 м до 23,4 м, а в експлуатаційний – від 5,8 м до 54,9 м. Однак висоту окремих шарів недоцільно задавати більше ніж 3-6 м.

2.3. Суцільна система розробки

Для підвищення ефективності промислового вилуговування застосовують батарейний метод або суцільну систему розробки. В основі цієї технології лежить гідродинамічне об'єднання підземних виробок двох або більше сусідніх свердловин безпосередньо в процесі їхнього розмиву. Завдяки оптимізації гідравлічного опору та збільшенню площі дзеркала розчинення, продуктивність кожної свердловини зростає в 2–3 рази, а загальний коефіцієнт вилучення солі з пласта підвищується до 20% [3-5;7].

Сучасний підхід до освоєння деяких складних соляних родовищ передбачає комбіноване розкриття масиву серією вертикальних та похило-горизонтальних свердловин (рисунок 2.9).

Вилучення солі при застосуванні суцільної системи розробки сягає понад 40%.

Головним недоліком є деформація земної поверхні [7].

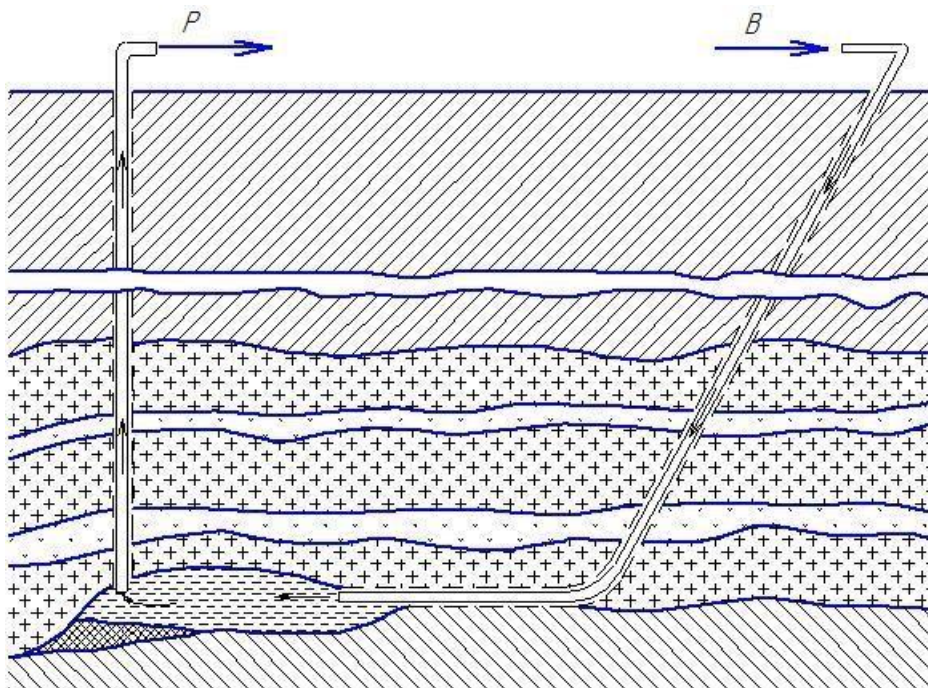


Рис. 2.9.Схема суцільної системи розробки родовища

2.4. Струминний спосіб розчинення солі

Практичний досвід експлуатації підземних камер продемонстрував, що класична циркуляційна схема розчинення соляного масиву має низьку кінетичну

ефективність і протікає досить повільно. Для подолання цього недоліку останнім часом почали активно впроваджувати суттєво продуктивнішу технологію — струминний спосіб розчинення (рис. 2.10).

Суть методу полягає в динамічній подачі розчинника під тиском через спеціальні гідравлічні насадки (сопла), змонтовані на водоподавальній колонії. Існує кілька модифікацій цієї системи: рухомі насадкові пристрої та стаціонарне багатоярусне розміщення.

Грунтова відмінність цього методу полягає в тому, що розмив породи відбувається не за рахунок пасивного омивання, а шляхом активного спрямованого зрошення (гідроудару) стінок камери високошвидкісними струменями води.

Продуктивність струминного способу в 3 – 4 рази вище циркуляційного. Так середня мінералізація розчину при циркуляційному розмиві становить 64 кг/м², а струминного – 277 кг/м², витрата води відповідно – 28,4 м³ і 6,54 м³ [6].

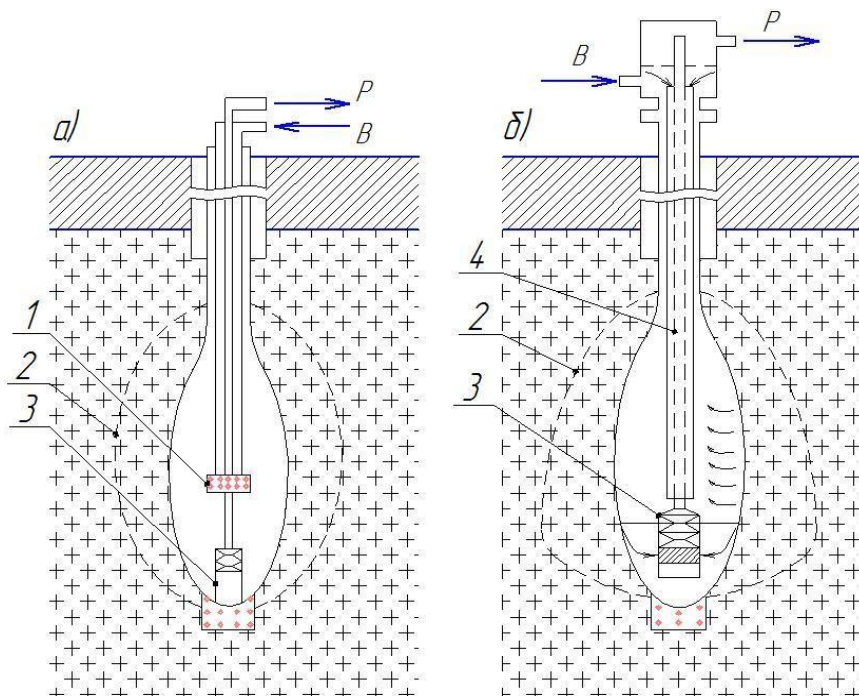


Рис. 2.10. Схема розчинення солі струминним способом з укороченою (а) і подовженою (б) насадками: 1 — зрошувач з насадками; 2 — проектний контур камери; 3 — поглиблена камера; 4 — система насадок по висоті камери

2.5. Світовий досвід застосування підземне розчинення калійних солей

Застосування підземного розчинення калійної руди через свердловини передбачає заміну трудомістких і дорогих робіт з будівництва та експлуатації гірничих виробок (капіталовкладення на видобуток сировини зменшуються в 2,5 рази), скорочення термінів підготовчого періоду і повну автоматизацію робіт та дозволяє поєднувати видобуток сильвініту з першою стадією його переробки - розчиненням солей.

Практикою встановлено, що при глибині залягання пластів калійних солей понад 1000 м шахтний метод видобутку стає нерентабельним, оскільки в таких умовах переважають витрати по гірничій частині.

В 1957 році на родовищі Саскачевань в Канаді, з ініціативи керівника копалень фірми Kalium Chemicals Б. П. Едмондса, розпочались дослідні роботи по підземному розчиненню сильвініту. Сильвініт з високим вмістом KCl представлений там 3-4 пластами з середньою потужністю ≈ 30 м на глибині 1615 м [3-5;7].

У 1962 році в США був зареєстрований патент Д. Б. Дамса і Б. П. Едмондса на спосіб підземного розчинення сильвінітів, що залягають на великих глибинах (1000 м і більше). Вони запропонували розчинення рудного пласта проводити «конгруентно», тобто зі збереженням в розсолі приблизно того ж співвідношення NaCl/KCl, яке відповідає руді. На основі цих даних у кінці 1964 року в штаті Саскачевань було побудовано промислове підприємство [3-5;7].

Схема переробки розсолів отриманих при підземному розчиненні калійної руди, що використовується на цьому підприємстві зображена на рис.2.11.

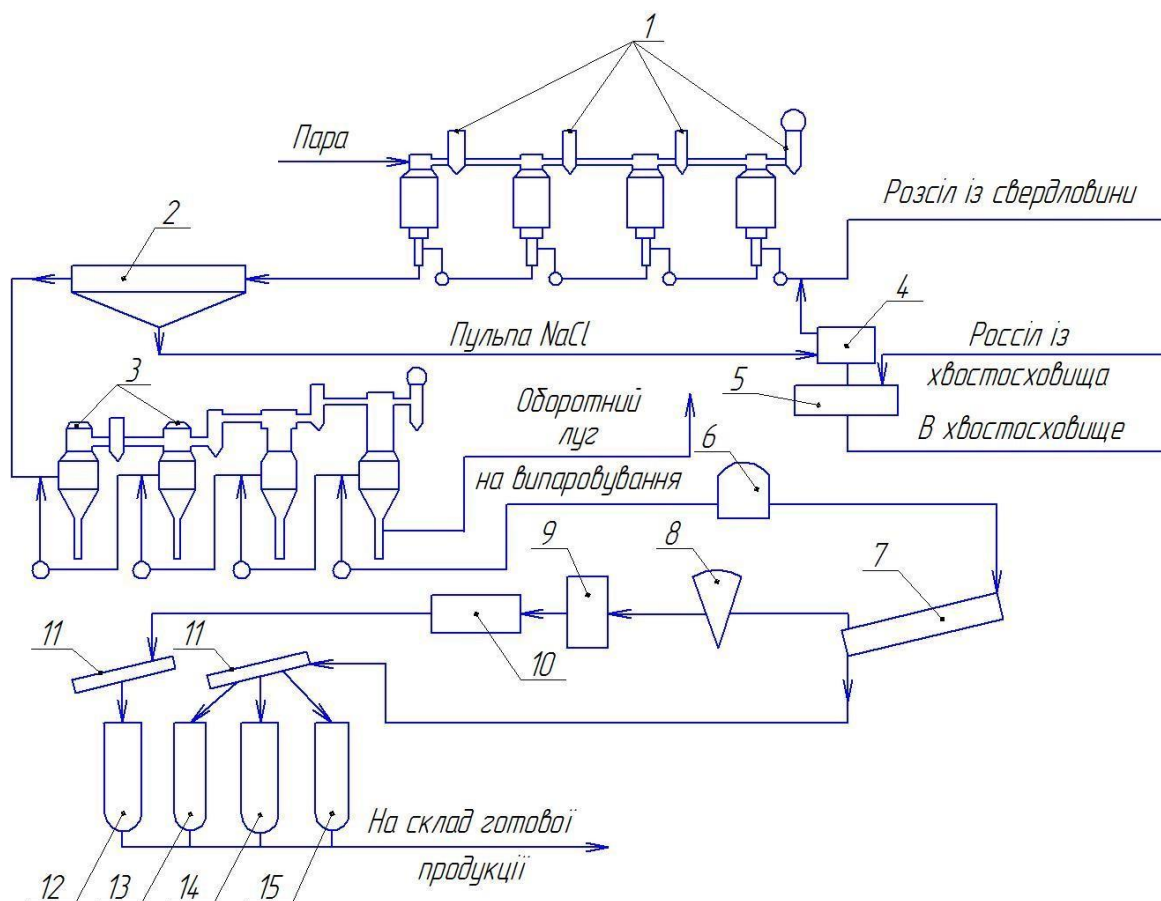


Рис. 2.11 Схема переробки розсолів отриманих при підземному розчиненні калійної руди: 1-випарювальний апарат; 2-згущувач; 3-апарати чотирьохступінчатої вакуум-кристалізації; 4,6-центрифуга; 5-репульпатор; 7-барабанна сушарка; 8-циклон; 9-гранулятор циклонного пилу; 10-дробарка; 11-грохот; 12-ємність з гранульованим KCl ; 13-ємність з крупнозернистим KCl ; 14- ємність з середньозернистим KCl ; 15- ємність з стандартним KCl

Для освоєння глибокозалягаючих покладів сильвініту в провінції Саскачеван дослідники запропонували специфічну технологію, за якої початкові (підготовчі) камери розмиву створюються не в самій корисній калійній руді, а нижче – у підстилаючих шарах галіту (кам'яної солі).

Цей підхід дозволяє підготувати технологічну базу для подальшого високоефективного вилучення калію за наступним алгоритмом:

Технологічні етапи формування камери

1. Заглиблення свердловини: Робочі колони труб опускають нижче підшови калійного пласта на глибину від 0,2 до 4,6 м, проникаючи в підстилаючу кам'яну сіль.

2. Первинне розширення стовбура: За допомогою закачування рідкого нерозчинника (нафти або мінерального масла), який надійно екранує покрівлю від вертикального розмиву, діаметр стартової камери доводять до 4,6–7,6 м.

3. Кероване підняття покрівлі: Далі стелю камери починають покроково піднімати в напрямку сильвінітового пласта. Це досягається двома шляхами:

- Зміщенням вгору інтервалу подачі свіжої води;
- Точним регулюванням товщини захисного шару нерозчинника (зазвичай у межах 1,3–5,1 см), який дозується та нагнітається разом із водою.

Результати та технологічні переваги

- Максимізація площі контакту: На момент, коли верхня межа камери досягає безпосередньо пласта сильвініту, її радіус суттєво розростається і становить від 60 до 150 м. Таке величезне дзеркало розмиву гарантує стабільне отримання розсолів із високою комерційною концентрацією хлориду калію (KCl).

- Шламосахист: Оскільки основа камери штучно заглиблена далеко вниз у підстилаючу галітову товщу, утворюється місткий зумпф. Глибоке дно дозволяє безперешкодно акумулювати великі об'єми нерозчинного осаду (шламу), який не перекриває корисний пласт руди й не заважає процесу подальшого вилуговування.

РОЗДІЛ 3. ПРОПОЗИЦІЇ ПО УДОСКОНАЛЕННЮ ТЕХНОЛОГІЇ

3.1. Застосування ультразвукових коливань для прискорення процесів в рідких середовищах

Ультразвукова обробка - технологічний процес цілеспрямованого впливу пружних коливань частотою вище 16-20 кГц на рідкі, газоподібні і тверді середовища для прискорення масо- і теплообміну, хімічних реакцій, руйнування, ущільнення і коагуляції в них.

Сучасні геотехнологічні методи найбільш часто ґрунтуються на реалізації гетерогенних процесів, що протікають між двома або кількома неоднорідними середовищами в системах рідина - рідина та рідина - тверде тіло.

Швидкість протікання більшості гетерогенних процесів в звичайних умовах дуже мала і визначається величиною поверхні зіткнення реагуючих компонентів (рис.3.1).



Рис. 3.1. Механізми прискорення процесів у гетерогенних середовищах

Ультразвукові коливання забезпечують надтонке диспергування (нереалізоване іншими способами), збільшуючи міжфазну поверхню реагуючих елементів. Таким є один з механізмів інтенсифікації процесів в рідких середовищах [3-5;7].

Інтенсивний розвиток та успішне застосування ультразвукових технологій у рідких системах базуються на двох фундаментальних фізичних причинах:

Процес передачі акустичної енергії від металевих робочих інструментів (випромінювачів) у рідину є максимально ефективним, особливо якщо порівнювати його з газовим середовищем. Це пояснюється значною різницею у фізичних властивостях матеріалів:

- Питомий хвильовий опір рідин є надзвичайно високим (зокрема, для води цей показник у 3500 разів перевищує опір газів).
- Завдяки такому високому опору рідина чинить належний опір випромінювачу, що дозволяє передавати в неї колосальну акустичну потужність за тієї самої амплітуди коливань робочого інструменту. У газах же енергія просто розсіюється через низьку густину середовища.

Рідкий стан речовини є унікальним майданчиком для виникнення ультразвукової кавітації — специфічного процесу утворення, коливання та мікрровибухів мікроскопічних бульбашок газу або пари під дією звукового тиску.

- Енергетичний імпульс: Кавітація генерує екстремальні локальні тиски та температури, здійснюючи потужний руйнівний та активаційний вплив як на саму рідину, так і на занурені в неї тверді об'єкти. Жодне газове середовище чи тверде тіло не здатне забезпечити аналогічний за силою та ефективністю фізичний ефект.

- Ефекти другого порядку: Кавітаційні процеси запускають цілу низку супутніх явищ — акустичні мікропотоки, ударні хвилі, гідродинамічні зсуви та знакозмінні тиски. Саме ці вторинні ефекти виступають головним каталізатором та інтенсифікатором більшості промислових технологічних процесів у рідких середовищах (наприклад, очищення, диспергування чи прискорення розчинення).

Ці обставини призвели до того, що ультразвуковий вплив отримав найбільш широке поширення при реалізації технологічних процесів, пов'язаних з рідким станом реагентів.

Ультразвукова кавітація - основний діючий фактор прискорення процесів в рідких середовищах. Вона є ініціатором фізико-хімічних процесів, що виникають в рідині під дією ультразвуку.

Кавітація - утворення в рідині пульсуючих бульбашок, заповнених парою, газом або їх сумішшю. В ультразвуковій хвилі під час напівперіодів розрідження виникають кавітаційні бульбашки, які різко закриваються після переходу в область підвищеного тиску, породжуючи сильні гідродинамічні збурення в рідині та інтенсивне випромінювання акустичних хвиль. При цьому, в рідині відбувається руйнування поверхонь твердих тіл, що межують з кавітуючою рідиною [3-5;7].

3.2. Застосування ультразвуку в гірництві

На сьогоднішній день є приклади успішного застосування технології ультразвукової дії на корисну копалину. Вона використовується при видобутку нафти та води.

Технологічний процес обробки привибійної зони здійснюється з використанням наступного обладнання:

- 1) 3-х жильного каротажного кабеля типу КГ-3-90-180;
- 2) свердловинного ультразвукового випромінювача;
- 3) наземного ультразвукового генератора.

Зовнішній вигляд генератора ультразвукових коливань і свердловинного випромінювача наведено на рисунку 3.2.



а)



б)

Рис. 3.2. Зовнішній вигляд ультразвукової установки:

а) генератор ультразвукових коливань;

б) свердловинний випромінювач ультразвуку

Обладнання складається з наземного ультразвукового генератора та свердловинного випромінювача, які з'єднуються між собою 3-х жильним геофізичним кабелем КГ-3-90-180 за допомогою кабельного наконечника НКБЦ 3-36. Робоча частота випромінювача становить 20-40 кГц. Обробка свердловин проводиться за допомогою безперервного сигналу [3-5;7].

3.3. Ультразвуковий свердловинний випромінювач

Ультразвуковий свердловинний випромінювач (рис.3.3.).

Прилад призначений для акустичного впливу на поклад складається з 6-10 п'єзокерамічних модулів, закріплених на металевому стрижні діаметром 6-10 мм.

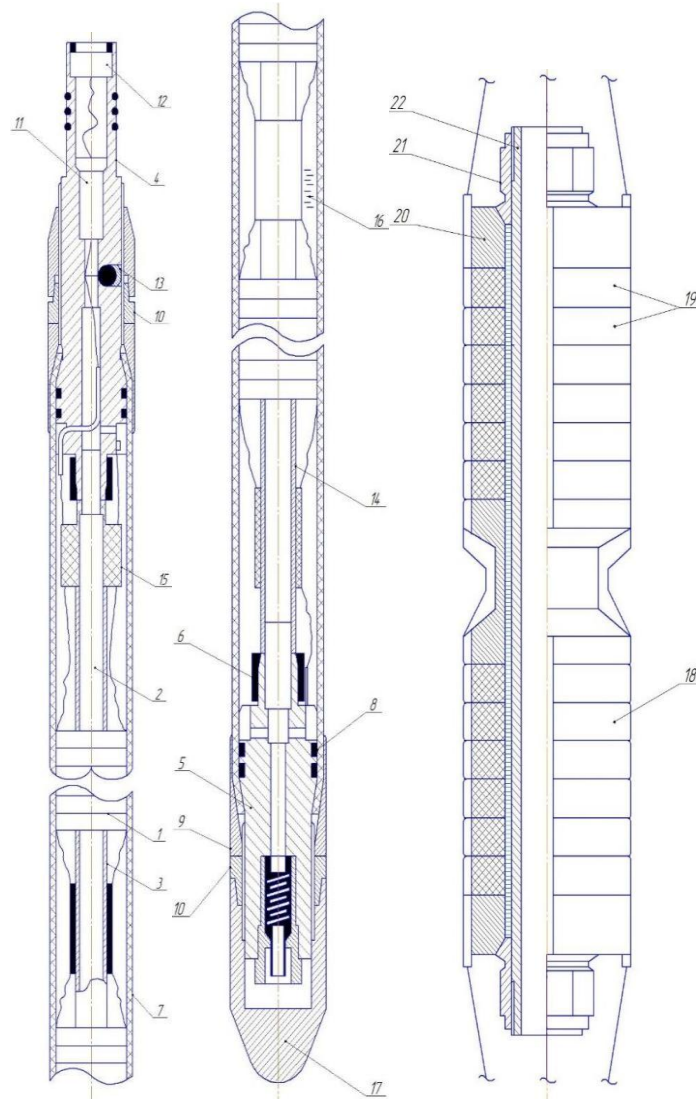


Рис. 3.3. Ультразвуковий свердловинний випромінювач:

1 – п’єзопретворювач; 2 - стрижень; 3 - втулка; 4 - верхня головка; 5 - нижня головка; 6 - пристрій контровки стрижня; 7 - еластичний кожух; 8 - гумове кільце ущільнювача; 9 - стакан з внутрішнім конусом; 10 - гайка з цанговим затискачем; 11 - герметичний струмоввід; 12 - контактний пристрій; 13 - запобіжний клапан; 14 – клапан, що закривається сам; 15 - блок обробки сигналів; 16 – компенсаційна рідина; 17 - захисний ковпак; 18 – п’єзокерамічні шайби; 19 – п’єзокерамічні шайби з електрично ізольованими сегментами; 20 - трубка; 21 - гайка; 22 - накладка

Функціонування свердловинного акустичного пристрою та його взаємодія з наземним комплексом управління реалізується за такою схемою:

- **Подача живлення:** З наземного генератора через одножильний броньований геофізичний кабель, оснащений спеціальним кабельним

наконечником, на занурений у свердловину випромінювач подається змінна синусоїдальна напруга, частота якої відповідає резонансній частоті системи.

- Ефект п'єзоелектрики: Внутрішній п'єзоперетворювач трансформує отриману електричну енергію в механічні коливання, генеруючи поздовжню ультразвукову хвилю.

- Направленість випромінювання: Завдяки точному просторовому рознесенню п'єзоелементів на відстань, що дорівнює половині довжини акустичної хвилі, у захисному середовищі компенсаційної рідини відбувається перенаправлення (векторний поворот) звукової енергії. Вона поширюється у радіальному напрямку відносно центральної осі приладу, безпосередньо впливаючи на стінки свердловини чи розчин.

Паралельно з випромінюванням система здійснює моніторинг параметрів роботи за допомогою сенсорних зон:

- Знімання сигналу: На ізольованих ділянках (сегментах) п'єзокерамічних шайб під дією змінного акустичного тиску виникає вторинний електричний сигнал.

- Обробка та трансформація: Ці первинні сигнали з окремих сегментів передаються на електронний суматор підземного блока обробки. Після інтегрування вони потрапляють у модуль перетворення, де трансформуються в інформативний сигнал постійного струму.

- Автоматичне регулювання (АПЧ): Отриманий аналоговий сигнал по геофізичному кабелю повертається на поверхню. Він надходить у блок зворотного зв'язку наземного комплексу, який миттєво генерує коригувальний імпульс для керування генератором. Це дозволяє системі автоматично підлаштовувати частоту й утримувати випромінювач у режимі максимального резонансу.

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ

4.1. Економічна ефективність пропонованого методу

Запропонований метод підземного розчинення солей для видобутку калійних солей Калуш-Голинського родовища дозволяє знизити рівень капіталовкладень у 1,5...2 рази за рахунок зменшення витрат на спорудження гірничо-капітальних виробок та закупівлю обладнання, які є присутні при видобутку солі шахтним способом. Застосування цього методу робить можливими заміну трудомістких і дорогих робіт по будівництву і експлуатації гірничих виробок, скорочення терміну підготовчого періоду і повну автоматизацію робіт.

Техніко-економічні показники методу підземного розчинення солей визначаються двома чинниками:

- 1) фізико-геологічними умовами родовища, що розробляються;
- 2) технічними та технологічними рішеннями, що приймаються.

Економічна ефективність методу підземного розчинення калійних солей визначається за двома показниками:

- 1) структура капітальних вкладень;
- 2) розмір експлуатаційних та трудових витрат.

Величина капітальних вкладень при підземному розчиненні складається із витрат на:

- 1) буріння свердловин (обладнання для буріння свердловин, буріння видобувних свердловин);
- 2) гідровидобутку (основне та допоміжне обладнання гідровидобутку, водопостачання);
- 3) гідротранспортування розсолу до резервуару;
- 4) допоміжні об'єкти та інші витрати (енергетичне господарство, ремонтне господарство, склади, тимчасові споруди).

Під параметрами підземного розчинення слід розуміти основні кількісні характеристики, що визначають його властивості та умови функціонування, які залежать від фізико- геологічних, технічних і економічних умов організації

процесу.

Найбільші капіталовкладення приходяться на гідровидобувні свердловини, об'єкти водопостачання та об'єкти енергетичного господарства. Витрати на перераховані об'єкти складають близько 30% загальних капітальних витрат [7].

Загальна вартість обладнання для підготовки однієї свердловини глибиною 100 м можна визначити за формулою:

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{б.уст.}} + C_{\text{тр.б.}} + C_{\text{дол.}} + C_{\text{нас}} + C_{\text{кол.тр.}}, \text{ грн, (4.1)}$$

де $C_{\text{б.уст.}}$ - вартість бурової установки, грн.; $C_{\text{тр.б.}}$ – вартість бурових труб, грн; $C_{\text{дол.}}$ – вартість долота, грн; $C_{\text{нас}}$ - вартість насоса для закачування води, грн; $C_{\text{кол.тр.}}$ - вартість колони робочих труб (для пошарового розчинення), грн.

Вартість колони робочих труб для пошарового розчинення визначається за формулою:

$$C_{\text{кол.тр.}} = C_{\text{тр.в.}} \cdot n_1 + C_{\text{тр.р.}} \cdot n_2 + C_{\text{тр.нер.}} \cdot n_3, \text{ грн/м, (4.2)}$$

де $C_{\text{тр.в.}}$ - вартість водоподаючих труб, грн/м; $C_{\text{тр.р.}}$ - вартість розсолопідйомних труб, грн/м; $C_{\text{тр.нер.}}$ - вартість труб для подачі нерозчинника, грн/м; n_1, n_2, n_3 – довжина труб відповідно водоподаючої, розсолопідйомної та труби для подачі нерозчинника, м.

Для облаштування свердловини приймаємо таке обладнання:

- 1) бурова установка УРБ-ЗАМ на базі вантажного автомобіля МАЗ 500;
- 2) бурові труби;
- 3) шарошечне долото;
- 4) насос 50НРР125Г;
- 5) колона робочих труб:
 - а) труба водоподачі;
 - б) розсолопідйомна труба;
 - в) труба для подачі нерозчинника.

Для зручності підрахунків зведемо дані в табл.4.1.

Таблиця 4.1

**Ціна придбання обладнання для підготовки однієї
свердловини глибиною 100 м**

Найменування робочого Обладнання	Одиниці вимірювання	Ціна	Кількість
Бурова установка УРБ-ЗАМ на базі вантажного автомобіля МАЗ 500	грн./шт.	527100	1
бурові труби	грн./т	65000	2
шарошечне долото	грн./шт.	18000	1
насос 50НРР125Г	грн./шт.	51842	1
труба водо подачі	грн./м	95	100
розсолотідиомна труба	грн./м	170	99,5
труба для подачі нерозчинника	грн./м	164	98

Вартість колони робочих труб становитиме:

$$C_{\text{кол.тр.}} = 164 * 98 + 95 * 100 + 170 * 99,5 = 42487 \text{ грн.}$$

Відповідно, загальна вартість обладнання для спорудження однієї
свердловини глибиною 100 м буде рівною:

$$C_{\text{заг}} = 527100 + 130000 + 18000 + 51842 + 42487 = 769429 \text{ грн.}$$

Основними технологічними показниками, що визначають рівень витрат, є видобуток з однієї камери, продуктивність видобувного агрегату і питомі витрати технологічної води, тобто на рівень капітальних витрат впливають глибина залягання породи, стійкість покриваючих порід та механічна стійкість рудного тіла.

Продуктивність праці при ПР солей залежить від трудоемності таких робіт:

- 1) гідровидобуток (монтаж-демонтаж обладнання на свердловині, видобувні роботи);
- 2) гірничопідготовчі роботи (буріння свердловин і встановлення обладнання);
- 3) роботи з подачі технологічної води;
- 4) транспортування розсолу та допоміжні роботи.

Сумарна трудоемність робіт визначається складанням витрат роботи працівників, що займаються безпосередньо ПР, допоміжними роботами та праці інженерно-технічних працівників.

Аналізуючи приведені вище залежності, можна зробити висновок, що збільшення продуктивності праці при ПР досягається шляхом зміни таких чинників:

- 1) збільшення об'єму видобутку з камери;
- 2) підвищення продуктивності видобувного агрегату;
- 3) зниження витрат технологічної води;
- 4) удосконалення організації праці усіх виробничих ланок.

Витрати на виробництво технологічної води залежать від витрат на 1 м³ води та її питомої витрати на видобуток 1 т породи.

Основні техніко-економічні показники способів підземного розчинення калійних солей через свердловини представлені в табл. 4.2 [28].

Таблиця 4.2

Основні техніко-економічні показники (у %) різних способів підземного розчинення

Показники ^а	Способи розчинення ^а			
	протитоку ^а	гідровруб ^а	пошаровий ^а	батарейний ^а
1 ^а	2 ^а	3 ^а	4 ^а	5 ^а
Капітальні витрати на однакову продуктивність промислу при потужності покладу солі ^а				
а) до 300 м ^а	600 і великі витрати металу ^а	130 ^а	100 ^а	До 70 (90 при 200 м) ^а
б) 400-500 м і більше ^а	Невигідно ^а	200 ^а	160 ^а	100 з економією металу ^а
Кількість кондиційного розсолу добутого з однієї свердловини ^а	2 ^а	60 ^а	100 ^а	100 ^а
Термін служби свердловини ^а	10-20 ^а	60-70 ^а	100 ^а	100 ^а
Оптимальна продуктивність однієї свердловини ^а	20 ^а	60-70 ^а	100 ^а	150 ^а
Необхідність в обслуговуючому персоналі ^а	150-200 ^а	100 ^а	100 ^а	70-80 ^а
Питомі витрати електроенергії на 1 м ³ розсолу ^а	50 ^а	80 ^а	100 ^а	70 ^а
Собівартість 1 м ³ розсолу ^а	150-200 ^а	100 ^а	90 ^а	80-85 ^а
Коефіцієнт вилучення запасів солі ^а	2 ^а	10-20 ^а	20-30 ^а	30-35 ^а

Для порівняння техніко-економічних показників шахтного та відкритого способів видобутку з геотехнологічним видобутком калійних солей розглянемо табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Техніко-економічні показники технології перероблення руди
Стебницького ДГХП «Полімінерал» і розсолів Домбровського кар'єру

	Стебницький ДГХП «Полімінерал»			Домбровський кар'єр		
	К-ть	Ціна, грн.	Сума, грн.	К-ть	Ціна, грн.	Сума, грн.
1	2	3	4	5	6	7
Руда ДГХП «Полімінерал», т	100	500	50000			
Розсоли ДК, м ³				100	-	-
Вода технічна, м ³	110	14,12	1553,2	-	-	-
Газ, м ³	1080	29,85	32238	277,4	29,85	8280
1	2	3	4	5	6	7
Пара, Гкал	24,2	580,93	14029	19,0	580,93	11037
Усього			97820			19317
Продукція						
Сіль харчова, т	30	11000	330000	-	-	-
Сіль технічна, т				23	4300	98900
Лангбейніто-полігалітовий концентрат, т	20	9000	180000	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7
Калімагнезія, т	29	12400	359600	11	12400	136400
Бішофіт MgCl ₂ ·4H ₂ O, т	10	4500	45000	6	4500	27000
Усього			914600			262300

Вартість однієї тони калійної солі становить 45000 грн (станом на 2026 р.).

Зважаючи на те, що одразу після видобутку калійної руди здійснювалася її переробка на добрива, важливими техніко-економічними показниками є норми витрат сировини, матеріалів та енергоресурсів (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

Витратні норми сировини, матеріалів і енергоресурсів на 1 тонну
калімагnezії (30 % K₂O)

	На 1 млн. т руди	Ціна за од., грн.	На весь випуск, грн.
1	2	3	4
Руди, т	1 000 000	500*	500 000 000
Вода на розчинення, т	250 000	14,12	3 550 000
Калімагnezія 30 % K ₂ O	215 517	11200	
Супутні продукти			
Калійно-магнієве добриво, т	150862	12400*	
Сіль харчова вищого сорту,	314 654	11000*	
Бішофіт, т	100 000	4500*	450 000 000
Відходи виробництва			
Промитий мул, т	230 600	-	-
Енергетичні затрати		-	-
Випарена вода в чотирикорпусній ВВУ, т	687 500	-	-
Випарена вода в двокорпусній ВВУ, т	58 190	-	-

1	2	3	4
Висушена в сушильних агрегатах, т	73 276	-	-
Витрата гріючої пари на випарювання, Гкал	310 340	2580,93	800 965 816
Витрата природного газу на сушіння, м ³	7 887 920	29,85	235 454 412
Амортизаційні відрахування (15 % від капітальних затрат 215 млн. дол. США)			258 000 000
Заробітна плата 2 тис. чол. по 25 тис. грн. за 1 місяць			60 000 000

* - ціни прийняті орієнтовно (станом на 2026 рік)

Прибуток:

$$D = A - B, \text{ грн.}, \quad (4.3)$$

де A - вартість продукції, грн; B – витрати, грн.

$$D=3312925089 - 1807970228 = 1504954861 \text{ грн (34 203 520 дол. США)}$$

4.2. Економічна доцільність пропонованого технологічного рішення

Запропонований мною метод ультразвукової дії на поклад створює

декілька ефектів, що позитивно впливають на процес підземного розчинення калійних солей через свердловини, а саме:

- 1) кавітація, що виникає у розчиннику під дією ультразвукових коливань, спричиняє руйнівні процеси у масиві руди;
- 2) ультразвукові хвилі призводять до перемішування розчинника та розсолу, що сприяє підвищенню його концентрації;
- 3) концентровані розсоли є в'язкими, а цей фактор впливає на швидкість підняття його по трубах на поверхню.

Тому впровадження ультразвукової дії в технологію розчинення покладу калійної солі підвищує продуктивність методу підземного розчинення вдвічі.

Важливою характеристикою ультразвуку, що впливає на продуктивність процесу розчинення є його швидкість.

Швидкість звуку в ідеальному пружному матеріалі при заданих температурі і тиску є постійною. Зв'язок між швидкістю ультразвуку і довжиною хвилі наступний:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (4.4)$$

де λ - довжина хвилі, м; c - швидкість звуку, м/с.

У твердих речовинах для поздовжніх хвиль швидкість звуку визначається за формулою:

$$c_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu) \cdot (1-2\mu)}}, \quad (4.5)$$

де c_l - швидкість звуку для поздовжніх хвиль, м/с; E - модуль пружності, Па; μ - коефіцієнт Пуассона; ρ - щільність, кг/м³.

Для поперечних хвиль швидкість визначається за формулою:

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (4.6)$$

де c_t - швидкість звуку для поперечних хвиль, м / с; G - модуль зсуву, Па [32].

Впровадження методу підземного розчинення калійних солей через свердловини на Калуш-Голинському родовищі та реалізація технологічного рішення ультразвукового впливу на процес руйнування солі спрямовано на підвищення ефективності виробничих процесів.

Собівартість 1 м³ розсолу при підземному розчиненні приблизно в три рази нижча, ніж при шахтному способі видобутку.

Позитивний економічний ефект цього методу досягається також за рахунок зменшення чисельності обслуговуючого персоналу в результаті цілковитої автоматизації процесу видобутку. А впровадження ультразвуку в технологію розчинення інтенсифікує процес видобутку, що сприятиме економії часу та коштів.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. Система організації охорони праці на підприємстві

Керівництво компанії зобов'язане гарантувати кожному співробітнику безпечні умови на робочому місці, суворо дотримуючись законодавства про охорону праці. Це передбачає регулярний моніторинг технічного стану споруд та устаткування, оновлення матеріально-технічної бази через автоматизацію процесів, а також дотримання санітарно-гігієнічних стандартів.

Специфіка роботи у шкідливих, небезпечних чи несприятливих метеоумовах вимагає від працедавця безкоштовного надання персоналу сертифікованого спецодягу, взуття та засобів індивідуального захисту. Якщо ЗІЗ зношуються завчасно (без вини самого працівника), їх оновлення фінансує підприємство.

Головна мета системи охорони праці на підприємстві — запобігання аваріям, профзахворюванням та нещасним випадкам. Контроль за дотриманням працівниками правил безпеки, правильним використанням захисного спорядження та виконанням внутрішніх інструкцій здійснює спеціалізована служба (або комісія) з охорони праці [8].

Найголовнішим обов'язком працівника є неухильне дотримання вимог законодавчих та нормативних актів з охорони праці за своїм фахом

Працівник повинен:

- 1) дбати про особисту безпеку та здоров'я, а також про безпеку і здоров'я оточуючих людей;
- 2) знати й виконувати вимоги інструкцій за фахом та нормативно-правові акти з охорони праці;
- 3) проходити у встановленому порядку навчання, попередні та періодичні медичні огляди;

4) підтримувати вимоги трудової і технологічної дисципліни, які встановлюють правила виконання робіт і поведінки у виробничих приміщеннях та на території підприємства.

За порушення законодавчо-правових актів з охорони праці працівник несе відповідальність. Роботодавець може застосовувати дисциплінарне стягнення у вигляді догани або звільнення від займаної посади.

Усі працівники під час прийому на роботу і в процесі роботи проходять на підприємстві інструктаж.

За характером і часом проведення інструктажі поділяються на: вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий. Працівники допускаються до самостійної роботи після вступного інструктажу, первинного інструктажу на робочому місці, стажування [8].

5.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

Сьогодні екологічна обстановка в межах Калуш-Голинського родовища залишається критичною, а її стабілізація з кожним роком ускладнюється. Протягом 2000–2010 років фахівці ДП «Науково-дослідний інститут галургії» проводили комплексний моніторинг гідросфери в зоні впливу калійного виробництва. Дослідники детально вивчили стан усіх об'єктів місцевого гірничо-видобувного та переробного комплексу, визначивши специфіку та динаміку їхніх змін [8].

За результатами спостережень було виявлено такі ключові проблеми:

1. Динамічність процесів: Гідродинамічна та гідрохімічна ситуація в регіоні постійно трансформується.

2. Масштабне засолення: Триває активне вимивання солей у відкриті водойми та підземні горизонти, через що зростає мінералізація води, а зона забруднення просувається до міських водозаборів та інфраструктурних об'єктів.

3. Низька ефективність попередніх рішень: Раніше розроблені проекти мінімізації засолення виявилися дієво неспроможними через відсутність системного контролю за геологічними та гідрохімічними процесами.

Головна мета подальших дій: Визначити точні межі та шляхи поширення соляного забруднення, розгорнути оновлену мережу спостережних свердловин та переглянути старі екологічні проекти. На основі цих даних необхідно сформулювати принципово нові, дієві заходи для запобігання катастрофічним наслідкам та відновлення екологічної безпеки в регіоні.

Діяльність промислового комплексу з видобутку калію залишила по собі важку екологічну спадщину. Відпрацьовані рудники («Калуш», «Ново-Голинь», «Голинь»), Домбровський кар'єр із прилеглими відвалами №1 і №4, а також хвостосховища та мулонакопичувач залишаються постійними джерелами екологічної небезпеки. Вони провокують зсуви, просідання ґрунту, утворення карстів та глибоких провалів, паралельно отруюючи підземні та поверхневі водні артерії [1;2].

Головна проблема полягає у десятках мільйонів кубометрів соляних залишків, що лежать просто неба. Атмосферні опади вимивають ці породи, перетворюючи їх на концентровані сольові потоки, які просочуються у водоносні горизонти.

Масштаби лиха підтверджують багаторічні дослідження: жителі Калуша масово відмовилися від використання криничної води через її тотальне засолення. Наприклад, у колодязях неподалік річкової тераси Млинівки й Лімниці мінералізація сягає критичних 80 г/л, а на сході села Пійло підземні води гравійно-галькового шару мають концентрацію солей до 15 г/л. Проби води в інших локаціях теж фіксують стабільне погіршення ситуації [1;2].

ВИСНОВКИ

В роботі вирішено актуальне наукове завдання, що полягає в інтенсифікації процесу підземного розчинення калійних солей через свердловини за допомогою ультразвукової дії.

Найбільш важливі підсумки наукових і практичних результатів полягають у наступному:

- висловлено гіпотезу про можливість застосування ультразвуку для інтенсифікації процесу розчинення солей;

- на основі досліджень теоретичних матеріалів про ультразвукові хвилі показано, що під їх дією відбудеться прискорення таких процесів:

- 1) руйнування солі на поверхні розділу «тверде тіло-рідина», що сприяє збільшенню продуктивності процесу;
- 2) перемішування робочої рідини з розсолом, що підвищує концентрацію розсолу;
- 3) зменшення в'язкості розсолу, що сприяє збільшенню швидкості підняття розсолу по трубах на земну поверхню.

Отримані результати теоретичного ознайомлення потребують подальших пошуків та експериментальних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розроблення та запровадження комплексного екологічного моніторингу на території Калуського гірничопромислового району. Етап 1. «Комплексна техногенно-екологічна характеристика Калуського гірничопереробного комплексу, визначення основних джерел забруднення та техногенної небезпеки» / Костів І.Ю., Садовий Ю.В., Садовий В.Ф., Костів Л.П., Держко О.І., Мазур Х.Й., Романів Г.М., Пітулей О.М.// Рукопис наук.-техн. рад. м. Калуш, 2012 р.
2. Проект бізнес-плану відновлення виробництва калійно-магнієвих добрив, хлориду магнію і бішофіту на базі покладів руд шахти «Пійло» і розсолів Домбровського кар'єру/ Костів І.Ю. // Рукопис наук.-техн. рад. м. Калуш, 2012 р.
3. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. Д. : Східний видавничий дім, 2004 – 2013.
4. Маланчук З.Р., Боблях С.Р., Маланчук Є.З. Гідровидобуток корисних копалин. Навчальний посібник. – Рівне: НУВГП, 2009. 280с.
5. Фізико-хімічна геотехнологія [Текст]: навч. посібник / М.М. Табаченко, О.Б. Владико, О.Є. Хоменко, Д.В. Мальцев – Д.: Національний гірничий університет, 2012. 310 с.
6. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи здобувачами вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійними програмами спеціальності 184 «Гірництво» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Маланчук З. Р., Корнієнко В. Я., Заєць В. В., Васильчук О. Ю., Семенюк В. В. Рівне : НУВГП, 2021. 35 с.
7. Садовий Ю.В. Полігаліт галогенних формацій Передкарпаття: форми знаходження, генезис та розшукове значення / Садовий Ю.В., Садовий Ю.Ю.// Мінералогічний збірник. 2012. № 62. Випуск 2. С. 216–227.

8. Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях: [Електронний ресурс]. URL: http://www.zntu.edu.ua/sites/default/files/konf/rozdil_dp_specialisty.pdf (дата звернення: 07.06.2026)