

**МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**  
***(103)НЗГ-24.00.000.ПЗ***  
***ГРУПА НЗГм-24-1***  
**Ліщинська Тетяна**  
**2025**

Факультет природничих наук  
Кафедра Геології та розвідки нафтових і газових родовищ

## МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

**Тема:** Деталізація системи критерійної оцінки геологічних структур з точки зору придатності для зберігання водню.

(назва відповідно до наказу ректора)

Ступінь вищої освіти — *магістр*  
Спеціальність — 103. Науки про Землю  
Освітньо-професійна програма — Геологія нафти і газу

### ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

МР 103 НЗГМ-24-ПЗ

(позначення)

Виконала студентка гр. НЗГМ-24-1 Ліщинська Т. Д.  
(підпис)(прізвище та ініціали)

Керівник доц.Дубей Н. В.  
(підпис) (посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: \_\_\_\_\_  
(підпис) (посада, прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис) (посада, прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Уграк Л. В.  
(підпис) (посада, прізвище та ініціали)

Перевірено на плагіат Уграк Л. В.  
(підпис) (посада, прізвище та ініціали)

### *Допускається до захисту*

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ доц. Михайлів І. Р.  
(підпис) (посада, прізвище та ініціали)

Рецензент \_\_\_\_\_ доц. Михайлів І. Р.  
(підпис) (посада, прізвище та ініціали)

2025 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ доц. Михайлів І.Р.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ**

Спеціальність — 103 – Науки про Землю  
Освітньо-професійна програма — Геологія нафти і газу.

**Студентка**

Ліщинська Гетяна Дмитрівна  
(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема магістерської роботи:** Деталізація системи критерійної оцінки геологічних структур з точки зору придатності для зберігання водню (затверджена наказом ректора університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р. № \_\_\_\_).

**2. Термін здачі студентом закінченої роботи:** «17» лютого 2025 р.

**3. Вихідні дані до роботи:**

- фондові матеріали.
- літературні джерела по району досліджень і темі магістерської роботи.
- 4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які належить розробити):

Вступ. 1. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ПІДЗЕМНОГО ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ У СВІТІ. 2. ПОТЕНЦІАЛ ТА ІНІЦІАТИВИ УКРАЇНИ В СФЕРІ ПІДЗЕМНОГО ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ. 2.1. Потенціал України для підземного зберігання водню. 2.2. Ініціативи, технології та регуляторні рамки. 2.3. Перспективи реалізації та роль підземного зберігання. 2.4. Аналіз ризиків при створенні підземного сховища водню. 3. ХАРАКТЕРИСТИКА РОДОВИЩ. 4. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ГЕОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР. 5. ВИБІР ПРИДАТНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ПІДЗЕМНОГО ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ КРИТЕРІЙНОЇ ОЦІНКИ ГЕОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР. 6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА. ПІДСУМКИ. СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.

5. Перелік обов'язкових графічних додатків:

---

---

---

**6. Консультанти з окремих розділів і питань магістерської роботи:**

Розділ, питання	Посада, прізвище та ініціали консультанта	Завдання видав (підпис консультанта)	Завдання прийняв (підпис студента)
Нормоконтроль	Уграк Л. В.		

### 8. КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

	Назва етапів виконання роботи	Термін виконання	Примітка
1	Одержання завдання.	17.02.2025	<i>Виконано</i>
2.	Вступ. Огляд досліджень підземного зберігання водню у світі	03.03.2025	<i>Виконано</i>
3.	Потенціал та ініціативи України в сфері підземного зберігання водню	24.03.2025	<i>Виконано</i>
4.	Характеристика родовищ	14.04.2025	<i>Виконано</i>
5.	Критерії оцінювання геологічних структур	26.05.2025	<i>Виконано</i>
6.	Вибір придатних об'єктів для підземного зберігання водню на основі системи критерійної оцінки геологічних структур	01.09.2025	<i>Виконано</i>
7.	Охорона навколишнього середовища	22.09.2025	<i>Виконано</i>
8.	Написання підсумків	20.10.2025	<i>Виконано</i>
9.	Оформлення пояснювальної записки	01.12.2025	<i>Виконано</i>
10.	Здача магістерської роботи на кафедрі	15.12.2025	<i>Виконано</i>
11.	Захист роботи на засіданні ЕК	23.12.2025	<i>Виконано</i>

7. Дата видачі завдання — 17 лютого 2025 р.

Завдання видав керівник

\_\_\_\_\_

( підпис )

доц. Дубей Н. В.

( посада, прізвище та ініціали )

Завдання прийняла студентка

\_\_\_\_\_

( підпис )

Ліщинська Т.Д.

( прізвище та ініціали )

## **АНОТАЦІЯ**

У магістерській роботі проведено комплексну оцінку геологічних структур Передкарпатського прогину з метою визначення їхньої придатності для підземного зберігання водню. Розроблено систематизовану методику критерійного аналізу, що охоплює геологічні, геотехнічні та економічні параметри, а також сформовано 24 критерії оцінювання з обґрунтованою бальною шкалою. На основі зібраних геолого-геофізичних даних виконано характеристику одинадцяти родовищ, визначено їхні фільтраційно-ємнісні властивості, стан покришок, гідрогеохімічні умови та технічну інфраструктуру. Проведене ранжування дозволило виокремити найбільш перспективні структури для створення підземних сховищ водню. Отримані результати формують наукове підґрунтя для планування та подальшої реалізації проєктів водневої енергетики в Україні.

Ключові слова: підземне зберігання водню, геологічні структури, критерійна оцінка, колектор, покришка, Передкарпатський прогин.

## **ANNOTATION**

The master's thesis conducted a comprehensive assessment of the geological structures of the Precarpathian depression in order to determine their suitability for underground hydrogen storage. A systematic methodology for criteria analysis was developed, covering geological, geotechnical and economic parameters, and 24 evaluation criteria with a substantiated scoring scale were formed. Based on the collected geological and geophysical data, eleven deposits were characterized, their filtration and capacity properties, the condition of the covers, hydrogeochemical conditions and technical infrastructure were determined. The ranking allowed us to identify the most promising structures for the creation of underground hydrogen storage facilities. The results obtained form a scientific basis for planning and further implementation of hydrogen energy projects in Ukraine.

Keywords: underground hydrogen storage, geological structures, criteria assessment, collector, cover, Precarpathian depres

# ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ ПІДЗЕМНОГО ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ В СВІТІ.....	9
РОЗДІЛ 2. ПОТЕНЦІАЛ ТА ІНІЦІАТИВИ УКРАЇНИ В СФЕРІ ПІДЗЕМНОГО ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ .....	14
2.1. Потенціал України для підземного зберігання водню .....	14
2.2. Ініціативи, технології та регуляторні рамки .....	16
2.3. Перспективи реалізації та роль підземного зберігання .....	17
2.4. Аналіз ризиків при створенні підземного сховища водню.....	19
РОЗДІЛ 3. ХАРАКТЕРИСТИКА РОДОВИЩ .....	23
РОЗДІЛ 4. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ГЕОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР.....	31
РОЗДІЛ 5. ВИБІР ПРИДАТНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИДАТНИХ ДЛЯ ПІДЗЕМНОГО ДЛЯ ПІДЗЕМНОГО ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ КРИТЕРІЙНОЇ ОЦІНКИ ГЕОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР.....	70
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА .....	75
ПІДСУМКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	79

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний етап розвитку енергетики характеризується глобальним переходом від традиційних викопних джерел енергії до відновлюваних та екологічно чистих. В умовах зростання попиту на стабільні й безпечні способи накопичення енергії, водень є універсальним енергоносієм майбутнього. Його використання дозволяє знизити викиди парникових газів, зменшити залежність від імпортованих енергоресурсів.

Воднева енергетика на даний момент стає одним із найперспективніших напрямів розвитку світової енергетичної системи. Європейські країни активно інвестують у створення технологій виробництва «зеленого» водню за допомогою відновлюваних джерел енергії — вітрової, сонячної та гідроенергії. Крім цього, значну увагу приділяють розвитку інфраструктури для транспортування та зберігання водню. Це є ключовим елементом забезпечення стабільності енергетичних систем.

Останні декілька років Європейський Союз запровадив низку стратегічних програм, які передбачають створення «водневої економіки» та формування транс'європейської мережі водневих коридорів. Наприклад: Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe та REPowerEU. Це відкриває нові можливості для країн, що мають розвинену газотранспортну інфраструктуру.

Питання розвитку водневої енергетики є особливо актуальним для України у контексті післявоєнного відновлення, інтеграції до європейського енергоринку та зміцнення енергетичної незалежності. Україна володіє потужною системою ПСГ, а також вигідним географічним положенням між ЄС та країнами Східної Європи, що створює унікальні можливості для переорієнтації частини газової інфраструктури на потреби водневої економіки.

Досвід експлуатації підземних сховищ природного газу може бути використаний при створенні підземних сховищ водню (ПСВ).

Крім того, розвиток технологій зберігання водню може забезпечити гнучкість енергосистеми України, зменшити сезонну нерівномірність споживання електроенергії та підвищити стійкість енергетичної інфраструктури.

З огляду на сучасні глобальні тенденції, дослідження питання зі створення ПСВ в Україні є надзвичайно актуальним як у науковому, так і у практичному вимірах. Розробка критеріїв оцінки геологічних структур для таких сховищ допоможе визначити найбільшперспективні об'єкти для майбутньої реалізації водневих проектів.

**Мета роботи:** розробити методику критерійної оцінки геологічних структур і вибрати пріоритетні об'єкти для підземного зберігання водню.

**Завдання:**

- ознайомитись із світовим досвідом підземного зберігання водню;
- оцінити потенціал та ініціативи України у сфері підземного зберігання водню;
- вибрати критерії оцінювання геологічних структур;
- виконати геолого-технологічний аналіз структур;
- зробити висновки.

В результаті виконаної роботи буде здійснено ранжування досліджуваних об'єктів, що дозволить обрати найбільш перспективні родовища для подальшого використання з метою підземного зберігання водню.

**Об'єкт досліджень:** Підземні родовища газу Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину, потенційно придатні для підземного зберігання водню.

**Предмет досліджень** – геологічні, геотехнічні та економічні критерії, що визначають придатність структур для безпечного та ефективного зберігання водню.

**Методи досліджень** – Аналіз наукових джерел і звітних матеріалів, порівняльно-аналітичний метод, систематизація геологічних даних, критерійна оцінка, узагальнення світового досвіду ПСВ.

**Новизна отриманих результатів.** Запропонована у роботі систематизована методика забезпечує наукове підґрунтя для подальшого розвитку напрямку з підземного зберігання водню, дозволяючи оптимізувати вибір структур і зменшити ризики, пов'язані з геологічними та технічними умовами їх експлуатації.

**Зв'язок з науковими програмами.** Робота пов'язана з кафедральною науково-дослідною темою «Дослідження геологічної будови та нафтогазоносності осадових басейнів України».

**Практичне значення результатів роботи.** Потенційні кандидати, перспективність яких доведена в роботі, дадуть можливість реалізувати проекти зі зберігання водню в підземних структурах і створити основу для масштабування водневої інфраструктури в Україні.

**Апробація результатів.** Перевірку результатів досліджень на практиці рекомендується провести на виробничих підприємствах АТ «Укртрансгаз».

## **РОЗДІЛ 1. Огляд досліджень підземного зберігання водню у світі**

Підземне зберігання водню (Underground Hydrogen Storage, UHS) наразі залишається одним з ключових методів енергетичного переходу. Він дозволяє ефективно акумулювати надлишкову енергію від відновлюваних джерел. У періоди високої генерації електроенергії з вітрових і сонячних станцій вона перетворюється в водень за допомогою електролізу, після чого закачується у підземні геологічні формації для подальшого використання у періоди дефіциту енергії. Це дозволяє збалансувати енергетичні системи, зменшити викиди CO<sub>2</sub> та підвищити надійність енергопостачання.

В загальному водень класифікують за походженням і технологією виробництва, що визначає рівень вуглецевих викидів та екологічні характеристики процесу.

Зелений водень виробляється методом електролізу води з використанням електроенергії, отриманої з відновлюваних джерел. Для прикладу: вітрових, сонячних та гідроелектростанцій. В такому разі, процес виробництва водню практично не супроводжується викидами парникових газів а отже є найбільш екологічно чистим видом водню. Перевагою даного виду водню є можливість перетворювати надлишки електроенергії, що утворюються в періоди високої інтенсивності вітру або сонячного випромінювання у енергію водню. [5]

Незважаючи на значний потенціал, частка зеленого водню у світовому виробництві наразі залишається обмеженою, що зумовлено високими капітальними витратами на електролізне обладнання, залежністю від вартості відновлюваної електроенергії та необхідністю розвитку відповідної інфраструктури зберігання і транспортування. Крім «зеленого» водню, у промисловій практиці та науковій літературі виокремлюють також інші види водню.

Чорний водень отримують шляхом газифікації кам'яного вугілля. У процесі перетворення вугілля за високих температур з утворенням синтез-газу відбувається значне виділення вуглекислого газу. [3]

Бурий водень виробляють з бурого вугілля, при цьому рівень викидів CO<sub>2</sub> є ще вищим, ніж у чорного водню, Цей метод один із найбільш екологічно несприятливих. [3]

Сірий водень є найбільш поширеним у сучасній промисловості. Він отримується методом парового риформінгу з природного газу. У процесі виробництва утворюється значна кількість CO<sub>2</sub>, який викидається в атмосферу. [3]

Блакитний водень, як і сірий виробляється з природного газу, проте із застосуванням технології уловлювання та зберігання вуглекислого газу. Це зменшує викиди приблизно на 80–90 %, хоча повністю усунути їх неможливо. [3]

Рожевий водень отримують шляхом електролізу води з використанням електроенергії атомних електростанцій. Такий водень має низький рівень вуглецевих викидів. [3]

Жовтий водень утворюється в процесі електролізу з використанням електроенергії з енергосистеми загального призначення, яка може включати відновлювані і викопні джерела. [3]

Бірюзовий водень отримують шляхом піролізу метану з утворенням твердого вуглецю замість CO<sub>2</sub>; ця технологія наразі є на стадії експериментальних досліджень. [3]

Згідно з аналітичними даними, найбільша частка активної місткості підземних сховищ газу (ПСГ) у Європі зосереджена в Росії (45,1%), Україні (21,3%), Італії (9,3%) та Німеччині (8,5%). Водночас саме ці країни та їхні сусіди є лідерами у впровадженні технологій підземного зберігання водню та метану. На карті європейських досліджень виділяються діючі, заплановані та завершені проекти, більшість яких реалізовано у Західній Європі — насамперед у Німеччині, Великій Британії, Нідерландах та Франції.



Рисунок 1.1 – Впровадження підземного зберігання водню та метану - за матеріалами Noura Eddaoui Patterns in bioreactive transport in underground storage of hydrogen: impact of natural and induced heterogeneity (Université de Lorraine; Université Hassan II, 2021).

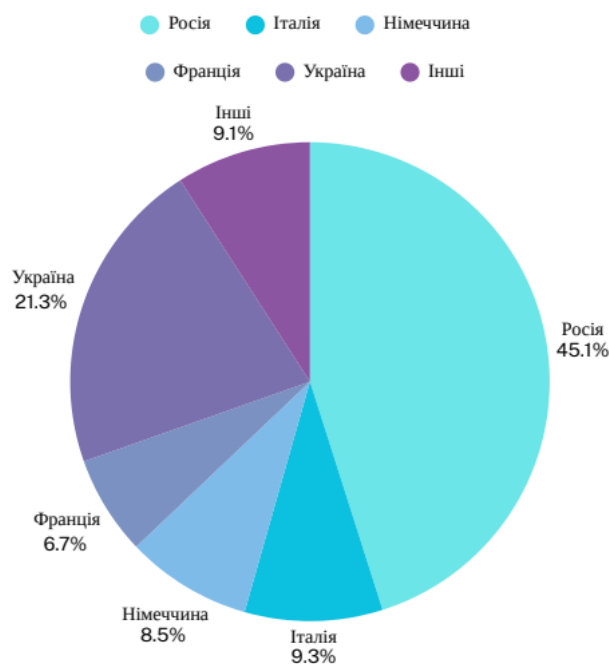


Рисунок 1.2 – Активна місткість ПСГ Європейських країн.

Основними типами геологічних формацій, придатних для зберігання водню, є:

- соляні каверни — найгерметичніші та найбільшвивчені;

- виснажені нафтові та газові родовища — із вже наявною інфраструктурою;
- водоносні горизонти— перспективні, але найменш досліджені.

За результатами численних експериментів, саме соляні каверни вважаються найкращими для промислового зберігання водню. У зв'язку з низькою проникністю, стабільністю тиску та температури, а також можливості багаторазових циклів закачування та відбору.

У **Великій Британії** підземне зберігання водню здійснюється переважно у соляних кавернах на узбережжі Північної Англії. Компанія *Hydrogen Storage Project UK* працює над проєктом *Teesside Hydrogen Storage*, основною метою якого є стабілізація електромережі та створення сезонного енергетичного резерву (*Clean Energy Wire, 2024*). Завдяки цьому Британія розглядається як один із європейських лідерів у переході до «зеленого водню», а досвід зберігання у кавернах використовується як основа для національної стратегії *Hy Net North West*. [14]

В **Італії** для підземного зберігання водню застосовують виснажені газові родовища. В Падуанському басейні ENI спільно з Politecnico di Milano проводять дослідження для визначення потенціалу сезонного зберігання. За результатами коефіцієнт ефективності такого типу сховищ може перевищувати 80%. Можна стверджувати про реальну перспективу їхнього промислового використання (*ScienceDirect, 2023*).

**Німеччина** основну увагу приділяє створенню ПСГ в соляних кавернах, оскільки вони забезпечують найкращу герметичність і можливість багатократних циклів закачування-відбору.

Зараз активно реалізуються два масштабні проєкти:

- *HyStorage (Bavaria)* — експериментальна платформа для оцінки довгострокової стабільності водню в соляних пластах;
- *H<sub>2</sub>CAST Etzel* — демонстраційний проєкт, метою якого є підтвердження можливості промислового використання каверн для зберігання водню (*DVGW & HYPOS, 2023*).

У Японії підземне зберігання водню є на основі виснажених газових родовищ. Вони достатньо вивчені та мають досить герметичні покриття. Дослідження, проведені Niigata University, показують потенціал родовища Sekihara, де після шести циклів закачування та відбору коефіцієнт ефективності зберігання водню досяг 82,7% (ResearchGate, 2023).

Канада використовує соляні каверни, зосереджені у регіоні Онтаріо, де є сприятливі геологічні умови. Дослідження Li et al. (MDPI, 2023) показують, що родовища у південному регіоні Онтаріо є придатною для зберігання водню.

Канада розглядає водень як ключовий елемент майбутнього експорту енергії, тому активно інвестує у вивчення підземних сховищ у межах програми Hydrogen Strateg for Canada (2022).

Узагальнюючи результати міжнародних проєктів, можна стверджувати, що підземне зберігання водню переходить із етапу наукових досліджень до практичного впровадження.

## **РОЗДІЛ 2. Потенціал та ініціативи України в сфері підземного зберігання водню**

### **2.1 Потенціал України для підземного зберігання водню**

Україна володіє однією з найбільших у світі системою ПСГ, що формує міцну основу для подальшого розвитку технологій зберігання водню. Сьогодні в країні функціонує 13 підземних газосховищ (ПСГ) із сумарною активною місткістю понад 31 млрд м<sup>3</sup>, які розташовані у трьох основних регіональних комплексах — Західному, Центральному та Східному.

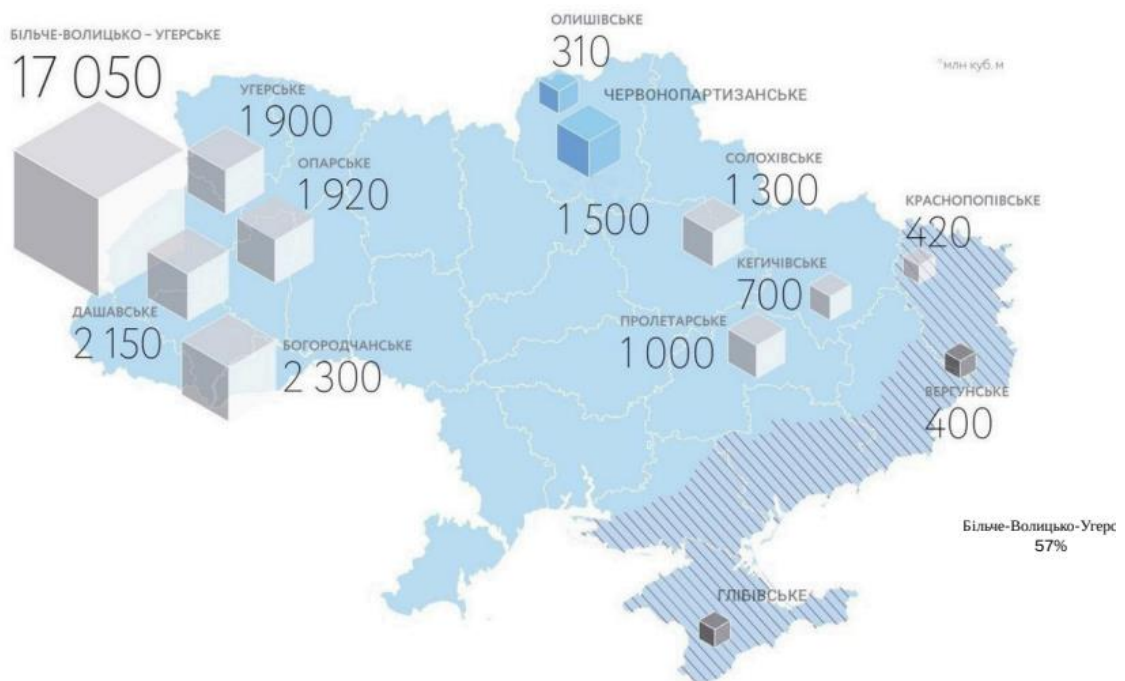


Рисунок 2.1 – Схема ПСГ України.

Найбільшим серед них є Західний комплекс, до складу якого входить п'ять ПСГ. Провідну роль відіграє Більче-Волицько-Угерське сховище, на частку якого припадає близько 57 % від загального активного об'єму. Інші значні об'єкти — Богородчанське (~8 %), Дашавське (~7 %), Опарське (~7 %) та Угерське (~6 %) сховища. Решта об'єктів розташовані переважно у Центральній та Східній частинах країни, їхня сукупна місткість становить близько 15 % від загального обсягу.

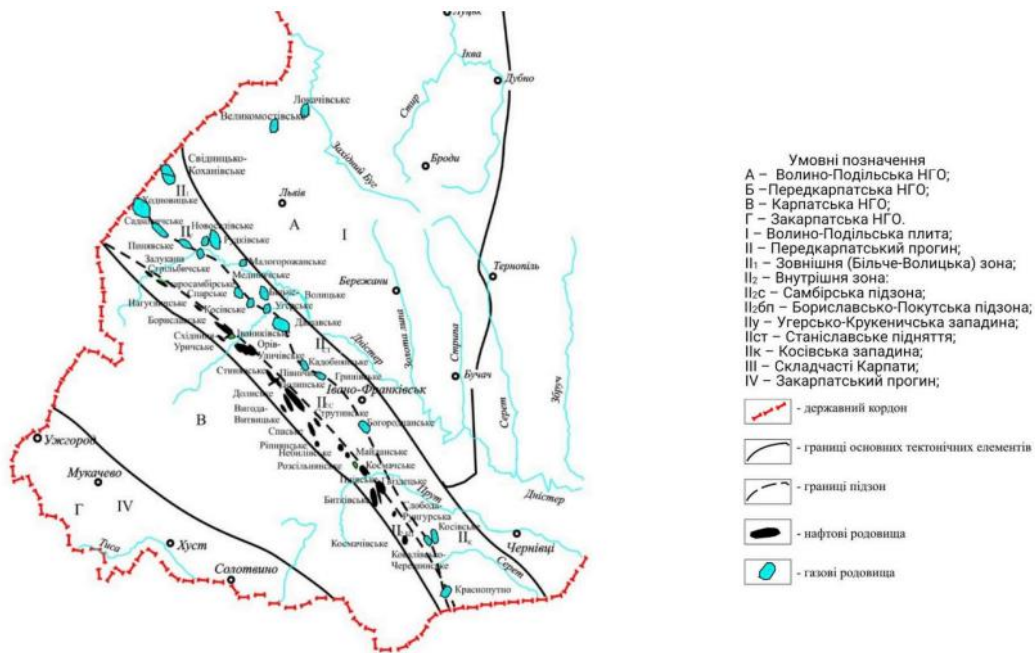


Рисунок 2.2 – Нафтогазогеологічне районування.

Така концентрація сховищ у західній частині України зумовлена сприятливими геологічними умовами: наявністю газових покладів, зручних для переобладнання під зберігання водню, стабільними тисковими режимами та високою герметичністю порід-покришок.

Перевагою є поєднання вже наявної інфраструктури і відповідних природних умов. Більшість ПСГ створені на базі виснажених газових родовищ, які мають доведену герметичність колекторів і добре досліджену геолого-технічну будову. Це суттєво спрощує процес переоснащення їх піднові типи енергоносіїв, зокрема — під зберігання водню.[7]

Крім того, Україна має розгалужену систему магістральних газопроводів, що забезпечує зв'язок між підземними сховищами, газотранспортною системою і споживачами в Україні та Європі. Така інфраструктура може бути частково адаптована для транспортування водню або його сумішей із природним газом.[7]

Додатковим чинником є висока кваліфікація українських фахівців у сфері буріння, підземних робіт і експлуатації сховищ, що забезпечує технічну готовність до реалізації проєктів у сфері водневої енергетики.

Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА), існуючі підземні газосховища України мають значний потенціал для переобладнання під зберігання водню. Попередні оцінки вказують, що за умови проведення необхідної модернізації Україна здатна зберігати до 2,4 млн тонн водню на рік.

Така кількість відповідає приблизно п'ятій частині від потенційного європейського попиту на підземне зберігання водню, що робить Україну перспективним партнером у формуванні майбутнього європейського водневого ринку.

Таким чином, Україна має високу ресурсну, технологічну та інфраструктурну базу, що формує унікальні передумови для розвитку підземного зберігання водню. Поєднання великої кількості виснажених газових родовищ, розвиненої системи трубопроводів та підготовлених фахівців робить країну одним із найперспективніших регіонів Європи для створення потужної водневої інфраструктури.

## **2.2 Ініціативи, технології та регуляторні рамки**

Україна активно формує стратегічний напрям розвитку водневої енергетики, розглядаючи її як один із ключових елементів майбутньої енергетичної системи та частину інтеграції до європейського енергетичного простору. Згідно з інформацією, оприлюдненою на офіційному сайті Міністерства енергетики України, держава вже здійснила низку кроків у цьому напрямі. Зокрема, підготовлено Проєкт Водневої стратегії України до 2050 року, який визначає основні напрями розвитку галузі, включаючи виробництво, транспортування, зберігання та використання водню. Цей документ передбачає формування необхідної нормативно-правової бази, що регулюватиме безпечно та ефективно впровадження водневих технологій, а також створення сприятливих умов для інвестицій і міжнародної співпраці.

Уже сьогодні можна сказати, що Україна визнає водень як альтернативне газове паливо та стратегічний ресурс майбутнього. Зокрема, Міністерство

енергетики внесло водень до переліку пріоритетних напрямів розвитку газового сектору.

Важливою складовою розвитку водневої енергетики є міжнародне співробітництво. Україна вже бере участь у спільних програмах із Європейським Союзом, спрямованих на розвиток ринку зеленого водню та його інтеграцію до європейської енергетичної інфраструктури. Серед ключових ініціатив — Ukraine–EU Hydrogen Corridor, який має забезпечити транспортування водню з України до країн ЄС через існуючі газотранспортні маршрути.

Водень в Україні розглядається не лише як енергетичний ресурс, а й як інструмент декарбонізації промисловості, транспорту та енергетики. Згідно з даними Міністерства енергетики, країна володіє потужним потенціалом для виробництва водню з низьким вуглецевим слідом, зокрема завдяки розвитку відновлюваної енергетики — сонячної, вітрової та гідроенергетики. Потенціал виробництва “зеленого” водню в Україні оцінюється у десятки мільйонів тонн на рік, що значно перевищує внутрішні потреби й відкриває перспективи експорту.

Подальші плани України зосереджені на адаптації існуючої газотранспортної інфраструктури під водневі потреби, залученні міжнародних інвестицій і розробці єдиної системи сертифікації водню, що відповідатиме європейським стандартам.

### **2.3 Перспективиреалізації та роль підземногозберігання**

Реалізація водневої стратегії України безпосередньо залежить від створення ефективної системи зберігання водню, адже саме цей елемент забезпечує стабільність енергетичного балансу, можливість накопичення надлишкової енергії та гнучкість водневого ринку. У цьому контексті підземне зберігання розглядається як ключова складова національної інфраструктури, що поєднує технологічну доцільність, економічну вигоду та високий рівень безпеки.[6]

На сучасному етапі особливу роль відіграє Західний регіон України, який має унікальні геологічні, інфраструктурні та стратегічні переваги для розміщення майбутніх підземних сховищ водню. Передусім, саме тут зосереджена більшість діючих підземних газосховищ країни — понад 70 % від загального обсягу. Розташовані вони у межах Передкарпатського прогину, який характеризується складною, але добре вивченою геологічною будовою, наявністю численних виснажених газових покладів і сприятливими колекторними властивостями порід. Такі умови створюють природну базу для переобладнання частини сховищ під зберігання водню або воднево-метанових сумішей.

Окрім природних передумов, Західний регіон вирізняється вигідним географічним положенням. Його територія безпосередньо прилягає до кордонів країн Європейського Союзу — Польщі, Словаччини та Угорщини, що забезпечує найкоротші шляхи транспортування енергоносіїв на європейський ринок.

Наукові дослідження, зокрема в межах проєктів HYSTORIES та H2EU+Store, підтверджують високу перспективність використання карпатських родовищ для зберігання водню. Висока герметичність колекторів, оптимальні глибини залягання, стабільні тискові умови та низький ризик гідро геохімічних реакцій роблять ці структури придатними для довготривалого утримання водню без суттєвих втрат. У регіоні вже відібрано низку потенційних ділянок для детальнішого дослідження — зокрема Свидницьке, Коханівське, Вижомлянське, Вишнянське та Хідновицьке родовища, які геологічно належать до Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину.

Перспективи реалізації підземного зберігання водню також визначаються економічними та технологічними чинниками. Використання вже існуючих газових об'єктів дає змогу суттєво скоротити вартість проєктів у порівнянні з будівництвом нових сховищ, а також мінімізувати екологічні ризики. Україна має значний досвід експлуатації підземних ховищ природного газу, що спрощує процес адаптації технологій та підвищує рівень промислової безпеки при роботі з воднем.

Успішна реалізація масштабних проєктів у сфері чистого водню отримує потужну підтримку на рівні Європейського Союзу. Зокрема, Європейська Комісія 12 липня оголосила про надання фінансування у розмірі 1,8 млрд євро 17 інноваційним проєктам, серед яких п'ять стосуються виробництва та використання чистого водню. Ці проєкти, що входять до портфелю Європейського Альянсу з чистого водню, спрямовані на впровадження передових технологій, таких як електролізери великої потужності, виробництво зеленого водню з відновлюваних джерел, а також розвиток водневої інфраструктури для транспортування і зберігання.

Крім того, в рамках спільного проєкту Європейського Союзу IPCEI (Проєкт спільного європейського інтересу) було схвалено державну допомогу в розмірі 5,4 млрд євро для 41 великомасштабного водневого проєкту, які охоплюють весь ланцюг створення вартості — від виробництва водню до його зберігання, транспортування та використання. Очікується, що ця ініціатива сприятиме масштабуванню виробництва електролізерів, підвищенню стандартів безпеки та ефективності водневих технологій, а також створенню близько 20 000 робочих місць у Європі.

У перспективі підземне зберігання водню може стати основою енергетичної незалежності та стійкості України. Його розвиток дозволить акумулювати надлишки відновлюваної енергії у вигляді водню, забезпечуючи стабільне енергопостачання в пікові періоди. Крім того, поєднання української системи ПСГ із європейською інфраструктурою сприятиме інтеграції країни в спільний енергетичний простір ЄС.

#### **2.4. Аналіз ризиків при створенні підземного сховища водню**

Створення підземних сховищ водню у виснажених газових родовищах передбачає низку специфічних ризиків, які пов'язані як із природними особливостями геологічного середовища, так і з технологічними, технічними та експлуатаційними аспектами роботи майбутнього об'єкта. Комплексний аналіз ризиків є обов'язковим етапом проєктування, оскільки водень має

унікальні фізико-хімічні властивості, що відрізняють його від метану і вимагають підвищеної уваги до герметичності, матеріалостійкості та стабільності цілого комплексу елементів сховища.

Одним із ключових ризиків є геологічний, який пов'язаний зі здатністю колекторів та покриток забезпечувати тривалу герметичність під час циклічного закачування та відбору водню. Природна неоднорідність порід, наявність тріщинних зон, зон підвищеної проникності або тектонично ослаблених ділянок можуть створювати потенційні шляхи міграції водню, що призведе до втрат, зниження ефективності сховища або навіть виходу газу на поверхню. Важливим ризиком також є поведінка пластових флюїдів, зокрема їхня взаємодія з воднем: можливе розчинення газу у пластових водах або формування вторинних флюїдних фаз, що впливатиме на об'єм активного газу. До цього ж блоку належить ризик порушення температурно-геохімічної стабільності порід, оскільки водень здатний активізувати деякі мікробіологічні та біохімічні процеси, які в свою чергу можуть спричинити утворення побічних газів, зміни у мінеральному складі порід або розвиток корозивних середовищ.

Втрати водню, зумовлені виключно його розчиненням у пластових водах, є незначними навіть за підвищених температур і тисків. Зростання температури та тиску лише незначно підвищує розчинність водню, тоді як збільшення мінералізації пластових вод призводить до її зменшення. Таким чином, розчинення водню у пластових розсолах не є визначальним механізмом його втрат при підземному зберіганні.

Суттєво більший ризик втрат водню пов'язаний з мінералогічним складом порід. Встановлено, що водень є геохімічно стабільним у колекторах, складених переважно силікатними мінералами, зокрема кварцом та польовими шпатами, які практично не вступають у реакції з воднем. Натомість наявність карбонатних мінералів, особливо кальциту, у цементуючій масі або покривних породах може призводити до активації геохімічних реакцій у системі «водень – пластова вода – порода».

У водень-насиченому середовищі за участю пластових вод можливе розчинення кальциту, зміна кислотно-лужної рівноваги та перебіг реакцій, що спричиняють втрати частини закачаного водню. За результатами геохімічного моделювання втрати водню в таких системах можуть досягати значних величин, що негативно впливає на об'єм активного газу та економічну ефективність сховища. Окрім цього, розчинення цементуючих мінералів може призводити до погіршення фільтраційно-ємнісних властивостей колектора та зниження герметичності привибійної зони свердловин.

Не менш значущим є ризик, пов'язаний з корозією та водневою крихкістю металів. Водень має здатність проникати в металеві конструкції та викликати зниження їх міцності. Це створює потенційну небезпеку для обсадних колон, наземного обладнання та трубопроводів, що може призвести до їх пошкодження або розгерметизації. Стан існуючих свердловин також є важливим фактором: дефекти цементації, старі інтервали перфорації, негерметичні пакери або сліди корозії збільшують ризик неконтрольованої міграції газу. Тому оцінка технічного стану обсадних колон, цементного каменю та можливість проведення ремонтно-ізоляційних робіт є критично важливою.

Технологічні ризики пов'язані з процесами закачування та відбору водню, які створюють циклічні навантаження на продуктивний пласт. У таких умовах можливе виникнення пластових деформацій, змін у проникності, перерозподіл напруженого стану порід та поява мікротріщин, що з часом може вплинути на стабільність та довговічність сховища. Важливим технологічним аспектом є контроль тиску: як надмірне підвищення, так і надто швидке зниження пластового тиску може спричинити механічну нестабільність або зниження ефективності закачування та відбору. Крім того, технологічними ризиками є можливі збої в роботі компресорних станцій, систем контролю та обладнання для очищення газу, що може призвести до аварійних ситуацій.

Суттєвою групою є гідрогеохімічні та мікробіологічні ризики. У присутності водню деякі групи мікроорганізмів можуть активно

розмножуватись, споживаючи водень і утворюючи метан, сірководень або інші газові продукти, які небажані у системі зберігання. Такі процеси не лише зменшують запас чистого водню, а й створюють корозійні умови. Висока мінералізація пластових вод або наявність агресивних іонів (наприклад, хлоридів або сульфатів) також може підсилювати корозійні процеси в обладнанні та елементах системи.

До експлуатаційних ризиків відносять людський фактор, недосконалість систем моніторингу, помилки обслуговуючого персоналу, недостатній рівень автоматизації процесів або затримки в реагуванні на аварійні ситуації. Зовнішні ризики включають сейсмічні події, техногенні впливи, підриви або військові загрози, що є особливо актуальним для об'єктів критичної інфраструктури. Економічні ризики пов'язані з нестабільністю ринку водню, змінами регуляторних вимог, високою вартістю модернізації інфраструктури та можливими коливаннями інвестиційної привабливості таких проєктів.

Виявлення та оцінка ризиків на ранньому етапі дозволяє розробити комплекс заходів із їх мінімізації, забезпечити довгострокову стабільність сховища та підвищити рівень безпеки водневої інфраструктури в Україні.

### **РОЗДІЛ 3. Характеристика родовищ.**

Для дослідження було обрано одинадцять родовищ Передкарпатського прогину, серед яких Свидницьке, Коханівське, Вижомлянське, Вишнянське, Никловицьке, Макунівське, Хідновицьке, Садковицьке, Пинянське, Залужанське та Новосілківське. Родовища належить до Більче-Волицького нафтогазоносного району Передкарпатської нафтогазоносної області Західного нафтогазоносного регіону України

#### **Свидницьке родовище**

Свидницьке газове родовище приурочене до північно-західної частини Косівсько-Угерської підзони та пов'язане з антиклінальною структурою розмірами  $16,0 \times 4,4$  км. Перші промислові припливи газу отримано у 1956 році з інтервалів 337–454 м. Родовище перебуває на стадії розвідки й характеризується порівняно неглибоким заляганням пластів — від 187 до 629 м, що робить роботи з буріння та можливе використання під ПСВ технічно простішими й економічно привабливішими. Продуктивні горизонти сформовані у відкладах верхнього девону (ВД-5-10, 11, 14). Колектор представлений теригенними поровими породами, переважно тонкошаруватими піщаними відкладами. Кількість продуктивних горизонтів - 6. Тип покладу — пластовий, склепінний, літологічно обмежений та тектонічно екранований, що гарантує добру природну герметичність та зниження ризиків газопроникності. Тип флюїду — газовий. Це підтверджує придатність території для подальших робіт. Кількість свердловин на початок видобутку — 21, а початкові дебіти становлять 19–42 тис м<sup>3</sup>. Початкові запаси газу становлять 6901 млн м, початковий пластовий тиск перебував у межах 2,33–7,45 МПа, тоді як робочий робочий — 0,84–0,9 МПа, кінцевий — 1,63 МПа. Пластова температура становить 291–308 К, що відповідає нормальним термобаричним умовам для таких глибин. Пористість колектора змінюється в межах 0,059–0,222, що є типовим для піщаних порових колекторів. Проникність за напрямками становить:  $0,1-142 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Мінералізація знаходиться в межах 19,45–24,16 м<sup>3</sup>/м. Показник  $\rho_{\text{H}}$

становить 8, що відповідає слабколужному середовищу. Газовий склад характеризується низьким вмістом домішок: CO<sub>2</sub> – 0,005–0,3 %, N<sub>2</sub> – до 1,187 %, що є сприятливим фактором для подальшої підготовки та транспортування газу. Комплекс параметрів родовища свідчить про його гарну природну герметичність, достатню якість колектора та сприятливі умови для промислової розробки. [1]

### **Коханівське родовище**

Коханівське нафтове родовище перебуває у стадії розробки та приурочене до антиклінальної структури розмірами 7,2 × 3,4 км. Глибини залягання продуктивних пластів становлять близько 1300 м, що відповідає середнім глибинам для родовищ даного регіону. Продуктивність родовища пов'язана з карбонатними тріщинними колекторами, представленими вапняками. Кількість продуктивних горизонтів — 1, що зумовлює відносно просту будову покладу. Тип покладу — пластовий масивний, що є характерним для карбонатних резервуарів Передкарпатського прогину. Тип флюїду — нафтовий. Початкові видобувні роботи розпочато у 1962 році, при цьому кількість свердловин на початок розробки становила 27. Початкові дебіти свердловин перебували на рівні близько 20 тис. м<sup>3</sup>/добу. Початковий пластовий тиск становив 11,1 МПа, а пластова температура — 330 К, що відповідає стабільним термобаричним умовам для заданих глибин. Колекторські властивості порід характеризуються відносно невисокими, але прийнятними значеннями пористості та проникності. Пористість змінюється в межах 0,013–0,284. Проникність колектора коливається від 0,001 до 25 · 10<sup>-3</sup> мкм<sup>2</sup>, що свідчить про неоднорідність фільтраційних властивостей карбонатного середовища. Мінералізація пластових вод становить близько 71,8 г/л, що відповідає високомінералізованим водам Передкарпатського регіону. За іонним складом пластові води належать до хлоркальцієвого типу, що є характерним для глибоких карбонатних колекторів та свідчить про тривалу ізоляцію гідродинамічної системи. Газовий фактор та склад розчинених газів характеризуються підвищеним вмістом азоту — до 9,54 %, при незначному

вмісті CO<sub>2</sub> — близько 0,96 %. Такі показники не створюють критичних ускладнень для експлуатації, проте потребують урахування при подальших технологічних рішеннях. Тип вод – хлоркальцієвий.[1]

### **Вижомлянське родовище**

Вижомлянське газове родовище перебуває у стадії консервації та приурочене до антиклінальної структури розмірами близько 10,5 × 4,8 км. Глибини залягання продуктивних пластів змінюються в межах 1091–1430 м, що відповідає середнім глибинам газonosних об'єктів Передкарпатського прогину. Продуктивні горизонти приурочені до відкладів девону (НД) та представлені теригенними поровими колекторами, складеними піщано-алевритовими породами. Кількість продуктивних горизонтів — 6. Тип покладу — пластовий, склепінний, тектонічно екранований, що забезпечує надійну природну герметичність. Тип флюїду — газовий. Розробка родовища розпочата у 1993 році. Кількість свердловин на початковому етапі становила 14, початкові дебіти газу перебували в межах 2,23–22,4 тис. м<sup>3</sup>/добу. Початкові запаси газу оцінюються у 4731 млн м<sup>3</sup>. Початковий пластовий тиск становив 10,7–11,5 МПа, пластова температура — 328–335 К, що відповідає стабільним термобаричним умовам. Пористість колекторів змінюється в межах 0,09–0,21, проникність — до 15,7·10<sup>-3</sup> мкм<sup>2</sup>, що є достатнім для формування промислових припливів газу. Мінералізація пластових вод становить близько 42,6 г/л, тип вод — хлоркальцієвий, реакція середовища слабколужна, рН ≈ 6,5-7. Газовий склад характеризується помірним вмістом домішок: CO<sub>2</sub> — до 0,43, N<sub>2</sub> — до 0,96, що не створює суттєвих ускладнень під час підготовки та транспортування газу. Сукупність параметрів родовища свідчить про задовільні колекторські властивості, достатню герметичність та стабільні умови експлуатації.[1]

### **Вишнянське родовище**

Вишнянське газове родовище перебуває у стадії розвідки та приурочене до антиклінальної структури розмірами 8 × 3,0 км. Продуктивні горизонти залягають на глибинах 760–1170 м, що зумовлює відносно сприятливі умови буріння та освоєння. Газonosність пов'язана з відкладами верхнього девону, де

колектори представлені теригенними поровими породами піщано-алевритового складу. Кількість продуктивних горизонтів — 6. Тип покладу — пластовий, склепінний, тектонічно екранований, що забезпечує природну ізоляцію газонасичених пластів. Тип флюїду — газовий. Початок розробки родовища датується 1954–1957 роками. Кількість свердловин на початковому етапі становила 17, початкові дебіти газу перебували в межах 12,8–23,5 тис. м<sup>3</sup>/добу. Початкові запаси газу оцінюються у 1565 млн м<sup>3</sup>. Початковий пластовий тиск становив близько 7,87 МПа, пластова температура — 313–329 К. Колекторські властивості характеризуються високою мінливістю: пористість змінюється в межах 2,5–15 %, проникність досягає значних значень, що забезпечує добрі фільтраційні характеристики. Мінералізація пластових вод становить близько 17,23 мл/л, тип вод — хлоркальцієвий, реакція середовища слабколужна, рН ≈ 6–7. Газовий склад характеризується низьким вмістом СО<sub>2</sub> — до 0,26 %, при вмісті азоту до 1,23 %, що є сприятливим для подальшої промислової експлуатації. Загалом Вишнянське родовище характеризується доброю природною герметичністю, якісними колекторськими властивостями та стабільними фізико-хімічними умовами пластів.[1]

### **Никловицьке родовище**

Никловицьке газове родовище приурочене до антиклінальної структури розмірами 7 × 4 км та перебуває у консервації. Продуктивні горизонти залягають у межах глибин 1140–1260 м. Газоносність пов'язана з відкладами девону, де продуктивна товща складена теригенними поровими колекторами, представленими піщано-глинистими породами. Кількість продуктивних горизонтів — 4. Тип покладу — пластовий, склепінний, тектонічно екранований, що забезпечує надійну природну герметичність. Тип флюїду — газовий. Початкові дебіти свердловин становили 14,2–18,9 тис. м<sup>3</sup>/добу. Початкові геологічні запаси газу оцінюються у 3035 млн м<sup>3</sup>. Початковий пластовий тиск в межах 10.9–13.0 Мпа, початкова пластова температура становила 319 К, що відповідає нормальним термобаричним умовам для заданих глибин. Пористість колекторів досягає 36,8, що є високим показником для теригенних порових

порід. Пластові води характеризуються високою мінералізацією та належать до хлоркальцієвого типу. Реакція середовища слабколужна,  $\text{pH} \approx 7$ . Газовий склад характеризується помірним вмістом домішок  $\text{CO}_2$  — до 1,44 %, при вмісті азоту до 3,5 %.[1]

### **Макунівське газове родовище**

Макунівське газове родовище приурочене до антиклінальної структури та перебуває у стадії консервації. Продуктивні горизонти залягають на глибині близько 2052 м. Газоносність пов'язана з відкладами верхнього девону, де колектори представлені теригенними поровими породами, переважно пісковиками. Кількість продуктивних горизонтів — 1, що свідчить про відносно просту геологічну будову покладу. Тип покладу — пластовий, тектонічно екранований, тип флюїду — газовий. Початкові дебіти газу досягали 38,9 тис.  $\text{м}^3/\text{добу}$ . Початкові геологічні запаси газу оцінюються у 382 млн  $\text{м}^3$ . Початковий пластовий тиск становив 23.9 Мпа, а пластова температура - 359 К, що відповідає підвищеним термобаричним умовам на даній глибині. Пористість колекторів змінюється в межах 0,09–0,19. Пластові води характеризуються досить високою мінералізацією, належать до хлоркальцієвого типу, реакція середовища слабкокіслова–нейтральна,  $\text{pH} \approx 6,5$ . Газовий склад характеризується помірним вмістом домішок  $\text{CO}_2$  — близько 1,466 %, при вмісті азоту до 5,047 %.[1]

### **Хідновицьке газове родовище**

Хідновицьке газове родовище приурочене до великої антиклінальної структури розмірами  $30 \times 20$  км. Продуктивні горизонти залягають у межах 520–1150 м. Газоносність пов'язана з відкладами верхнього девону, де колектори представлені теригенними поровими пісковиками. Кількість продуктивних горизонтів — 7, що обумовлює складну багатопластову будову. Тип покладу — пластовий, склепінний, тектонічно екранований, тип флюїду — газовий. Родовище відкрито в 1966 році, при початковій кількості свердловин — 27. Початкові дебіти газу змінювались у широких межах — 12,0–358,8 тис.  $\text{м}^3/\text{добу}$ , що свідчить про значну неоднорідність колекторських властивостей. Початкові геологічні запаси газу оцінюються у 17018 млн  $\text{м}^3$ . Початковий

пластовий тиск змінювався в межах 1.2-8.8 Мпа. Пористість колекторів досягає 0,19, проникність – до 1505. Пластові води хлоркальцієвого типу, рН  $\approx$  5,9-7. Газовий склад не містить критичних домішок: CO<sub>2</sub> — близько 0,78 %, при вмісті азоту до 2,03 %.[1]

Родовище є одним із найбільш значущих за запасами у межах району.

### **Садковицьке газове родовище**

Садковицьке газове родовище перебуває у стадії розробки. Продуктивні горизонти залягають на глибинах 670–1215 м. Газоносність приурочена до відкладів верхнього девону, де колектори представлені теригенними поровими породами. Кількість продуктивних горизонтів — 7. Тип покладу — пластовий, склепінний, тип флюїду — газовий. Запаси затверджені в 1968 році при кількості свердловин – 3. Початкові дебіти газу становили 3,2–34 тис. м<sup>3</sup>/добу, початкові запаси — 2307 млн м<sup>3</sup>. Пластова температура перебуває в межах 300–310 К. Початкові пластові тиски становили 2,4-10,9 Мпа. Пористість колекторів досягає 0,153, тоді як проникність – 12,6мкм<sup>2</sup>. Пластові води хлоркальцієвого типу, рН  $\approx$  5,2-11. Газовий склад: CO<sub>2</sub> — до 0,84 %, при вмісті азоту до 1,553 %.[1]

### **Пинянське газове родовище**

Пинянське газове родовище приурочене до антиклінальної структури розмірами 13 × 7 км та перебуває у розробці. Продуктивні горизонти залягають у межах 1085–1965 м. Газоносність пов'язана з відкладами верхнього девону, колектори — теригенні порові. Кількість продуктивних горизонтів — 7. Тип покладу — пластовий, склепінний. Літологічно обмежений та тектонічно екранований, тип флюїду — газовий. Запаси затверджені в 1970 році з початковою кількістю свердловин – 39. Початкові дебіти газу досягали 361 тис. м<sup>3</sup>/добу, що свідчить про високу продуктивність окремих пластів. Початкові запаси газу становлять 15612 млн м<sup>3</sup>. Початковий пластовий тиск становив 2.7-17.14 Мпа, а пластова температура — 307–330 К. Пористість колекторів досягає 0,238, тоді як проникність – 515 мкм<sup>2</sup>. Пластові води хлоркальцієвого типу, рН  $\approx$  7. Газовий склад характеризується вмістом домішок: CO<sub>2</sub> – 0,2–0,7 %, N<sub>2</sub> – до 4,291 %.[1]

### **Залужанське газоконденсатне родовище**

Залужанське газоконденсатне родовище пов'язане з антиклінальною структурою розмірами  $4,9 \times 2,35$  км. Перші промислові припливи газу отримано у 1980 році з інтервалів 1080–3280 м. Продуктивні горизонти сформовані у відкладах девону. Колектор представлений теригенними поровими породами, переважно піщано-глинистими відкладами. Кількість продуктивних горизонтів – 13. Тип покладу — пластовий, склепінний, літологічно обмежений. Тип флюїду — газовий. Кількість свердловин на початок видобутку — 27, а початкові дебіти становлять 10.5–15.4 тис м<sup>3</sup>. Початкові запаси газу становлять 27938 млн м, початковий пластовий тиск перебував у межах 2,8–44,08 МПа, тоді як робочий — 1,55–13,24 МПа. Пластова температура становить 309–384 К, що відповідає нормальним термобаричним умовам для таких глибин. Пористість колектора змінюється в межах 0,1–0,217. Проникність становить:  $0,07 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Мінералізація знаходиться в межах 16–38,1 м<sup>3</sup>/м. Показник рН становить 6–8. Газовий склад характеризується низьким вмістом домішок: CO<sub>2</sub> – 0,24 %, N<sub>2</sub> – до 6,41 %.[1]

### **Новосілківське газове родовище**

Новосілківське газове родовище перебуває у стадії консервації та приурочене до великої антиклінальної структури розмірами  $3,4 \times 1,2$  км. Продуктивні горизонти залягають у межах 1075–1900 м. Газоносність пов'язана з відкладами верхнього девону, де колектори представлені теригенними поровими пісковиками. Кількість продуктивних горизонтів — 2. Тип покладу — пластовий, склепінний, тектонічно екранований, тип флюїду — газовий. Родовище відкрито в 1972 році, при початковій кількості свердловин – 14. Початкові дебіти газу змінювались у широких межах — 20,0–95,4 тис. м<sup>3</sup>/добу. Початкові геологічні запаси газу оцінюються у 702 млн м<sup>3</sup>. Початковий пластовий тиск змінювався в межах 1,7–15,6 Мпа. Пластова температура 302–353 К. Пористість колекторів досягає 0,226. Пластові води хлоркальцієвого типу, рН  $\approx 4$ . Газовий склад не містить критичних домішок: CO<sub>2</sub> — близько 1,86 %, при вмісті азоту до 1,27 %.[1]

**РОЗДІЛ 4. Критерії оцінювання геологічних структур.**

Для обґрунтованого вибору потенційних об'єктів необхідно застосовувати систему критерійної оцінки, яка дозволяє комплексно охарактеризувати геологічну структуру та визначити її відповідність вимогам до безпечного та ефективного зберігання водню. Критерії поділяються на геологічні, геотехнічні та економічні, що відповідає загально визнаним підходам до оцінки технічних газових сховищ.

Геологічні критерії охоплюють природні властивості структур, що визначають їхню здатність утримувати водень тривалий час без значних втрат і небезпечних трансформацій. До таких критеріїв належать глибина залягання продуктивних горизонтів, оскільки оптимальний діапазон глибини забезпечує необхідний пластовий тиск і термобаричні умови для компактного зберігання та зниження дифузійних втрат; розмір і об'єм структури, що визначають макроємність сховища і впливають на економічну доцільність проекту; тип і літологічний склад колекторів (теригенні порові породи проти карбонатних порово-тріщинних систем), які прямо впливають на пористість, проникність та гідродинамічну однорідність резервуара; наявність і якість покриття (герметизуючих відкладів), її товщина, цілісність та поширеність тріщин або порушень; стратиграфічний вік і ступінь неоднорідності порід, що визначають ймовірність внутрішньої перешаруваності й локальної анізотропії потоку; а також попередні дані про пластовий тиск, температуру та наявність залишкового газу або рідин у поровому просторі. Усі ці показники аналізуються в комплексі для оцінки герметичності, ємності, прогнозованості поведінки водню в пласті і ймовірних шляхів міграції або втрат.

Геотехнічні критерії стосуються технічної придатності об'єкта для інженерного облаштування й експлуатації сховища водню. Сюди входить ступінь вивченості родовища (результати ГРП, наявність детальних геологічних, геофізичних і гідродинамічних даних), стан і кількість існуючих свердловин, їх конструкція та можливість переобладнання або капітального ремонту; механічна і корозійна стійкість пород-покриттів та цементних/металевих елементів експлуатації у присутності водню; фільтраційно-ємнісні характеристики

(пористість, проникність, товщина колекторської товщі), що визначають швидкість закачування і відбору, інтерференційні ефекти між свердловинами та ризик локальних гідродинамічних нестабільностей; поведінка пласта при циклічних навантаженнях (тискотемпературні коливання, механічні деформації), можливість утворення фазових або біогеохімічних процесів (наприклад, біогенна активність, перетворення сірководню); наявність і стан наземної інфраструктури (трубопроводи, компресорні цехи, системи очищення) та можливість інтеграції зі старими об'єктами; системи моніторингу, контролю та аварійного реагування, які забезпечують безпечну експлуатацію. Геотехнічна оцінка повинна давати чіткі відповіді на питання про технологічну реалізованість, часові рамки робіт із переобладнання і технічні ризики під час експлуатації.

Економічні критерії передбачають оцінку фінансової життєздатності та суспільно-економічної доцільності проєкту зберігання водню. Формальні показники включають капітальні витрати на переобладнання або будівництво (CAPEX), поточні операційні витрати (OPEX), очікувані доходи від надання послуг зберігання чи продажу водню, чисту приведену вартість (NPV), внутрішню норму прибутковості (IRR) та період окупності. Важливими є також оцінки ризиків і невизначеностей (геологічних, технологічних, регуляторних), чутливість фінансових показників до змін цін на енергоносії та тарифи за послуги, а також доступ до фінансування та інвестиційних стимулів. Крім цього, до економічних критеріїв належать логістична привабливість (близькість до споживачів та магістральних маршрутів), потенціал масштабу та гнучкості операції (можливість нарощування ємності або мультифункціонального використання інфраструктури), вартість заходів з гарантування якості водню (очищення, сепарація домішок), а також відповідність нормативно-правовим вимогам і здатність отримати сертифікацію/дозволи. Комплексна економічна оцінка має поєднувати кількісні фінансові розрахунки з аналізом ризиків і стратегічних вигод для інвесторів та суспільства.

Узагальнюючи представлену систему критеріїв, можна стверджувати, що придатність геологічних структур для підземного зберігання водню визначається

комплексом взаємопов'язаних факторів. Геологічні критерії формують основу оцінювання, адже саме вони визначають природну ємність, герметичність, однорідність та стабільність середовища, що є ключовими умовами для безпечного довготривалого утримання водню. Геотехнічні показники доповнюють цю оцінку характеристиками технічного стану родовища, глибиною його вивченості та можливістю його практичного переобладнання під водневе сховище з урахуванням технологічних ризиків та вимог до інфраструктури. Економічні критерії забезпечують стратегічне бачення доцільності проєкту, визначаючи його фінансову ефективність, інвестиційну привабливість, масштаби витрат і потенційні вигоди.

Комплексне застосування цих трьох груп критеріїв дозволяє всебічно та об'єктивно оцінити перспективність конкретних структур, обґрунтувати вибір найкращих кандидатів і мінімізувати ризики на етапах планування, створення та подальшої експлуатації підземних сховищ водню. Такий підхід формує надійну методичну основу для прийняття рішень і забезпечує високий рівень безпеки та ефективності майбутніх водневих проєктів.

Для забезпечення об'єктивної та всебічної оцінки придатності геологічних структур до підземного зберігання водню в роботі сформовано та систематизовано 24 критерії, що охоплюють основні аспекти геологічної будови, технічного стану об'єктів та їхньої економічної доцільності. Такий комплексний підхід дозволив структурувати всі фактори, які можуть впливати на безпечність, ефективність і стабільність процесу зберігання, та розділити їх на три основні групи — геологічні, геотехнічні та економічні. Кожна група критеріїв відображає свій рівень впливу на формування надійного підземного сховища, а разом вони створюють цілісну методичну основу для подальшого аналізу потенційних об'єктів.

В роботі використовується шкала бальної оцінки, у межах якої кожен критерій отримує певну кількість балів залежно від ступеня відповідності оптимальним параметрам для підземного зберігання водню. Такий підхід

дозволяє врахувати різну значущість параметрів та одночасно зберегти простоту й прозорість процедури оцінювання.

Вибір балів для кожного критерію обґрунтований їхнім впливом на безпечне й ефективне функціонування майбутнього сховища. Критерії, що визначають герметичність, фільтраційно-ємнісні властивості та стабільність середовища (наприклад, тип колектора, пористість, покришка), отримують вищу вагу, оскільки вони є ключовими для довготривалого утримання водню. Показники, що мають другорядний, але все ж важливий вплив — стан інфраструктури, ступінь вивченості, дебіти — оцінюються меншою кількістю балів. Такий розподіл дозволяє правильно акцентувати увагу на найкритичніших характеристиках об'єкта.

Максимальна сума балів системи визначена виходячи з кількості критеріїв та їхньої вагомості. Загальний бал формує інтегральний показник, який відображає сумарну придатність родовища до створення підземного сховища водню. Чим вищий результат, тим більше структура відповідає цільовим параметрам і тим нижчі потенційні геологічні, технічні та економічні ризики.

Логіка ранжування базується на порівнянні отриманих сумарних балів між усіма дослідженими об'єктами. Родовища з найвищими значеннями розглядаються як найбільш перспективні, оскільки вони демонструють оптимальне поєднання геологічної надійності, технічної доступності та економічної ефективності. Об'єкти із середніми результатами потребують додаткового аналізу або доопрацювання, а ті, що отримали найнижчі бали, є найменш придатними для створення підземних сховищ водню. Такий підхід забезпечує чітке, аргументоване та прозоре обґрунтування вибору пріоритетних структур.

## 1. Оцінка за фазовим станом родовища

Таблиця 4.1 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за фазовим станом родовища

№	Тип родовища	Кількість балів
---	--------------	-----------------

	Назва родовища		max – 3 бали
1	Свидницьке	газове	3
2	Коханівське	нафтове	1
3	Вижомлянське	газове	3
4	Вишнянське	газове	3
5	Никловицьке	газове	3
6	Макунівське	газове	3
7	Хідновицьке	газове	3
8	Садковицьке	газове	3
9	Пинянське	газове	3
10	Залужанське	газове	3
11	Новосілківське	газове	3

Найкращим типом виснаженого родовища для зберігання водню за фазовим станом є газові родовища. Це зумовлено кількома ключовими факторами.

1. Виснажені газові родовища містять переважно залишковий природний газ і пластову воду. Це зменшує ймовірність небажаних хімічних реакцій між воднем і залишками вуглеводнів, на відміну від нафтових родовищ, де водень може взаємодіяти з нафтою, призводячи до забруднення або втрат.

2. Добра вивченість та інфраструктура. Методи підземного зберігання газу у виснажених родовищах добре відомі та відпрацьовані. Більшість існуючих сховищ природного газу в світі (понад 75%) знаходяться саме у виснажених газових родовищах. Це означає, що існуюча інфраструктура, включаючи свердловини, компресорні станції та трубопроводи, може бути адаптована для зберігання водню з відносно меншими витратами.

3. Висока ефективність відбору. Дослідження показують, що ефективність відбору водню зі сховищ у виснажених газових родовищах значно вища (до 87%), ніж у нафтових родовищах (близько 77%). Це пов'язано з меншим залишковим захопленням водню пористим середовищем.

4. Використання залишкового газу як буферного. Залишковий природний газ у пласті може діяти як буферний газ, допомагаючи підтримувати тиск під час відбору водню.

Виснажені нафтові родовища є менш придатними через ризик взаємодії водню з залишковою нафтою, що може призвести до утворення небажаних домішок (наприклад, метану) і зниження чистоти водню, а також до втрат самого водню. Це вимагатиме додаткових витрат на очищення водню після вилучення. Серед родовищ, які розглядаються в даній роботі як потенційні об'єкти зберігання водню, одне родовище (Коханівське) є нафтовим. Решта – газові. Тому, імовірно, саме Коханівське родовище є найменш сприятливим порівняно з іншими для зберігання в ньому водню.

## 2. Оцінка за станом ГРР

Таблиця 4.2 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за станом ГРР

№	Назва родовища	стан ГРР	Кількість балів max – 4 бали
1	Свидницьке	у розробці	2
2	Коханівське	у розробці	2
3	Вижомлянське	у консервації	4
4	Вишнянське	у розвідці	1
5	Никловицьке	у консервації	4
6	Макунівське	у консервації	4
7	Хідновицьке	у розробці	2
8	Садковицьке	у розробці	2

9	Пинянське	у розробці	2
10	Залужанське	у розробці	2
11	Новосілівське	у консервації	4

Найкращими для зберігання водню є родовища, що знаходяться на стадії консервації, а точніше, вже повністю виснажені.

1. Родовища в розробці. Використання родовища, яке ще знаходиться в розробці, для зберігання водню недоцільно та економічно невиправдано.

Основні причини:

- Конфлікт інтересів. Розробка родовища спрямована на видобуток вуглеводнів, тоді як зберігання водню — це інша мета. Одночасне ведення цих процесів є технічно складним, може призвести до втрат продукції та створює конфлікт у використанні інфраструктури.

- Неповне використання. На родовищі, що ще розробляється, залишається значний обсяг вуглеводнів, які необхідно видобути. Це обмежує доступний об'єм для зберігання водню та знижує ефективність проекту.

- Ризики змішування. Існує високий ризик змішування водню з вуглеводнями, що не тільки погіршить якість водню, а й може створити вибухонебезпечні суміші.

2. Родовища в розвідці. Родовища на стадії розвідки також не є оптимальними для зберігання водню. Причини:

- Невизначеність. Геологічні та геохімічні параметри таких родовищ ще не повністю вивчені. Немає точних даних про об'єм колектора, проникність, пористість, склад пластових вод та інші ключові характеристики, які критично важливі для безпечного та ефективного зберігання.

- Відсутність інфраструктури. Відсутня необхідна інфраструктура (свердловини, трубопроводи, компресорні станції), що вимагатиме значних капітальних інвестицій та часу на її будівництво.

- Фінансові ризики. Інвестування у зберігання водню на родовищі, чия комерційна цінність для видобутку ще не підтверджена, є дуже ризикованим.

3. Родовища в консервації (виснажені). Виснажені (законсервовані) родовища є найкращим вибором для підземного зберігання водню. Причини:

- Повна вивченість. Ці родовища добре досліджені, а їхні геологічні характеристики (розміри, геометрія, властивості колектора та герметичність) добре відомі. Це дозволяє точно оцінити потенційну ємність сховища та мінімізувати геологічні ризики.

- Наявність інфраструктури. Вже існуюча інфраструктура (свердловини, наземне обладнання) може бути переобладнана для закачування та відбору водню, що значно зменшує капітальні витрати і прискорює реалізацію проєкту.

- Природний буфер. Залишковий газ у виснаженому газовому родовищі може слугувати буферним газом, підтримуючи тиск у сховищі і забезпечуючи стабільну роботу.

- Виснажені газові родовища є особливо привабливими, оскільки менший вміст рідини та залишків вуглеводнів мінімізує ризик небажаних хімічних та мікробіологічних реакцій з воднем.

Із запропонованих родовищ, які аналізуються з точки зору придатності їх для підземного зберігання водню, 4 перебувають у стані консервації, 6 – у розробці і 1 – у розвідці (табл. 2).

Розподіл кількості балів для об'єктів, які аналізуються, проводився згідно вибірки.

### 3. Оцінка за глибиною залягання пластів-колекторів

Таблиця 4.3 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за глибиною залягання

№	Назва родовища	Глибина залягання, м	Кількість балів max – 3 бали
1	Свидницьке	187 - 629	1
2	Коханівське	1300	2
3	Вижомлянське	1091-1430	2

4	Вишнянське	760-1170	3
5	Никловицьке	1140-1260	3
6	Макунівське	2052	1
7	Хідновицьке	520-1150	3
8	Садковицьке	670-1215	3
9	Пинянське	1085-1965	2
10	Залужанське	1080-3280	2
11	Новосілківське	1075-1900	2

Оптимальна глибина залягання пластів-колекторів для зберігання водню у виснажених газових родовищах становить від 800 до 1200 метрів. Цей діапазон є компромісом між кількома важливими факторами. Вибір глибини залежить від геологічних, фізичних та інженерних умов, що впливають на безпеку та ефективність зберігання.

Тиск. Збільшення глибини призводить до зростання пластового тиску, що дозволяє зберігати більше водню в тому ж об'ємі пласта. Це значно підвищує ефективність сховища. Чим більша глибина, тим вищий тиск.

Температура. Глибина також впливає на температуру. Вища температура покращує динаміку водню, але може збільшити ризик хімічних реакцій з мінералами та мікроорганізмами.

Герметичність. На глибині, яка перевищує 800 метрів, верхні шари мають високу щільність і низьку проникність, що забезпечує надійну герметизацію і запобігає витоку водню. Виснажені газові родовища мають вже існуючий шар-покришку, що є ключовим для утримання газу.

Об'єм. Занадто малі глибини (менше 800 метрів) не забезпечують достатньої ємності для комерційно вигідного зберігання водню. Занадто великі глибини (понад 1200 метрів) можуть ускладнити буріння і спричинити надмірні витрати.

В таблиці 4.3 відповідною кількістю балів оцінені родовища за даними глибин залягання пластів-колекторів. Найбільш оптимальною ця ознака є для

родовищ: Вишнянське, Никловицьке, Хідновицьке, Садковицьке. Надтомаліглибини (187 – 629 м) характерні для Свидницького родовища, надто великі глибини (2052 м) - для Макунівського родовища.

#### 4. Оцінка за розміром структур.

Таблиця 4.4 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за розміром структур

№	Назва родовища	Розмір структур, км	Кількість балів max – 3 бали
1	Свидницьке	16*4,4	2
2	Коханівське	7*2,3-4,0	3
3	Вижомлянське	10*5 50	2
4	Вишнянське	8*3 24	3
5	Никловицьке	7*4 28	3
6	Макунівське	4*1 4	1
7	Хідновицьке	30*20 600	1
8	Садковицьке	8*3,5 28	3
9	Пинянське	13*7 91	1
10	Залужанське	4,9*2,35 (5,3*2,6) 10	2
11	Новосілівське	3,4*1,2 4	1

Оцінюючи вибрані родовища з точки зору розміру їх структур, можна зробити такі висновки. Розміри пасток потенційних об'єктів зберігання водню суттєво варіюють — від кількох до сотень квадратних кілометрів, що безпосередньо впливає на можливу ємність сховища, необхідні капітальні вкладення та технічні особливості експлуатації. Дуже малі структури, такі як Макунівське та Новосілівське родовища, можуть бути використані у випадках, коли потрібно зберігати обмежені обсяги водню при мінімальних капіталовкладеннях. Вони дозволяють швидко розпочати облаштування сховища, вимагають мало свердловин і простої поверхневої інфраструктури.

Такі об'єкти можуть служити для випробування технологій підземного зберігання водню. Проте їх потенціал обмежений: мала площа структур зумовлює низьку загальну ємність і велику частку буферного газу, що зменшує корисний обсяг. Крім того, у малих структурах характерні вищі питомі навантаження на свердловини, що збільшує ризик нестабільного фільтраційного режиму, інтерференції між свердловинами та утворення пальцювання потоку водню.

З іншого боку, дуже великі структури, наймасштабнішою з яких є Хідновицьке родовище площею близько 600 км<sup>2</sup>. Такі об'єкти доцільно використовувати для зберігання великих сезонних або стратегічних обсягів водню. Їх очевидними перевагами є величезна порова ємність, нижчі питомі швидкості закачування та відбору, можливість оптимального розміщення великої кількості свердловин і зменшення ризику локальних гідродинамічних нестабільностей. Однак такі структури мають і суттєві недоліки: значні капітальні витрати на буріння та інфраструктуру, великі обсяги робіт із сейсмічного та гідродинамічного моніторингу, а також вищі управлінські та технічні ризики, пов'язані зі складністю контролю таких масштабних систем.

Найбільш оптимальним вибором для створення ефективних та економічно обґрунтованих підземних сховищ водню є структури середніх розмірів, приміром Вишнянське, Никловицьке та Садковицьке родовища. Вони поєднують достатню ємність з помірними витратами на облаштування, забезпечують оптимальне навантаження на свердловини та простішу гідродинамічну керованість порівняно з надто великими або надто малими структурами. Саме середні за розміром пастки найкраще відповідають вимогам до першого етапу формування інфраструктури підземного зберігання водню в регіоні.

## 5. Оцінка за віком порід-колекторів.

Таблиця 4.5–Вік порід-колекторів потенційних об'єктів підземного зберігання водню

№	Назва родовища	Вік порід	Кількість балів
---	----------------	-----------	-----------------

			max – 2 бали
1	Свидницьке	ВД-5-10, 11,14	1
2	Коханівське	ІЗ	1
3	Вижомлянське	НД-8,9а,9б,10	2
4	Вишнянське	ВД-12,13, НД-4-7	2
5	Никловицьке	НД-3,4,7,8	2
6	Макунівське	НД-15	1
7	Хідновицьке	ВД-13, НД1-5,7	2
8	Садковицьке	ВД-12-13, НД-1,2,3а,3б,4)	1
9	Пинянське	ВД-14, НД-1,5-9	2
10	Залужанське	НД-5-11, 12а,12б, 13а,13б,15, ВД-13	2
11	Новосілківське	НД-9,16	2

Міоценовий відділ неогенової системи є основним газоносним комплексом у Зовнішній зоні Передкарпатського прогину. До нього приурочена більшість родовищ північно-західної частини Більче-Волицької зони, де продуктивними є піщані відклади нижнього сармату, а саме: нижньодашавської та верхньодашавської підсвіт. Продуктивні горизонти мають пористість 6-20% і товщину від декількох до 50-60 м. Більшість газових родовищ пов'язана саме з відкладами нижньосарматської підсвіти. Окрім того, об'єктами зберігання газу на трьох ПСГ із п'яти у Більче-Волицькій зоні є горизонти НД-5, НД-7, НД-8, НД-9. Опираючись на досвід експлуатації цих підземних газосховищ, пріоритетними можна вибрати аналогічні за віком об'єкти для зберігання водню.

#### **6. Оцінка за типом колекторів.**

Таблиця 4.6 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за типом колекторів

№	Назва родовища	Тип колектора	Кількість балів max – 3 бали
---	----------------	---------------	---------------------------------

1	Свидницьке	Теригенні, порові	3
2	Коханівське	Карбонатніпоровітріщинні	1
3	Вижомлянське	Теригенні, порові	3
4	Вишнянське	Теригенні, порові	3
5	Никловицьке	Теригенні, порові	3
6	Макунівське	Теригенні, порові	3
7	Хідновицьке	Теригенні, порові	3
8	Садковицьке	Теригенні, порові	3
9	Пинянське	Теригенні, порові	3
10	Залужанське	Теригенні, порові	3
11	Новосілковське	Теригенні, порові	3

У газових родовищах пласти-колектори — це гірські породи, щоможутьмістити й пропускатиприродний газ. Їхкласифікують за типом порового простору, якийвизначає, як газ зберігається і рухається в породі. Найпоширеніший тип колекторів – поровий (гранулярний). Газ у них зберігається в порах, тобто в порожнечахміж зернами породи. Характерніприкладипорід — пісковики та алевроліти. Перевагами таких колекторів є висока пористість і проникність, що забезпечує легке проходження газу.

У тріщинних колекторах газ накопичується переважно в мережах тріщин і розломів у породі. Цей тип колекторів часто зустрічається у вапняках та доломітах. Сама порода може мати низьку пористість, але тріщини забезпечують високу проникність.

Можуть бути змішані (порово-тріщинні, тріщинно-кавернові) колектори.

Колектори також можна класифікувати за речовинним складом: теригенні:(пісковики, алевроліти), карбонатні (вапняки, доломіти).

Серед родовищ, вибраних для аналізу геологічних чинників з точки зору придатності їх для зберігання водню, лише для одного Коханівського родовища

тип колектора характеризується як карбонатний, поровий, тріщинний, що є менш сприятливою ознакою, аніж теригенний, поровий тип колектора для решти родовищ.

## 7. Оцінка за літологічним складом колекторів.

Таблиця 4.7 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за літологічним складом колекторів

№	Назвародовища	Літологічний склад колектора	Кількість балів max – 4бали
1	Свидницьке	тонкошаруватий піщаний	2
2	Коханівське	вапняки	1
3	Вижомлянське	піщано-глинисті	3
4	Вишнянське	піщано-глинисті	3
5	Никловицьке	піщано-глинисті	3
6	Макунівське	тонкошаруватий піщано-алевролітовий	2
7	Хідновицьке	піщано-глинисті	3
8	Садковицьке	піщано-глинисті	3
9	Пинянське	піщано-глинисті	3
10	Залужанське	піщано-глинисті	3
11	Новосілківське	піщано-глинисті	3

Піщано-глинисті колектори — це геологічні пласти, що складаються з чергування піщаних і глинистих шарів. Придатність цих колекторів залежить від їх пористості, проникності, наявності покриття. Для ПСГ підходять виснажені газові родовища, які мають необхідні геологічні характеристики.

Неоднорідна структура колектора може призвести до нерівномірного розподілу газу, що ускладнює контроль за сховищем. Для мінімізації цього ризику проводять ретельне геологічне моделювання.

Незважаючи на певні виклики, піщано-глинисті колектори є одними з найпоширеніших типів сховищ, особливо якщо вони є виснаженими газовими родовищами. Їхня природна геологічна структура (з вже існуючими покришками) робить їх привабливим вибором для ПСГ. Саме такий тип колектора і геологічна неоднорідність пластів як по розрізу так і по площі притаманна в більшій чи меншій мірі для підземних сховищ газу Західноукраїнського нафтогазоносного регіону.

Вапняки як колекторимають специфічні властивості. У масивному стані вони часто мало пористі й слабо проникні. Вапняки можуть бути придатними лише за умови розвитку тріщин чи карсту, але в цілому вони менш прогнозовані й потребують ретельного дослідження перед практичним використанням.

### **8. Оцінка за кількістю продуктивних горизонтів.**

Таблиця 4.8- Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за кількістю продуктивних горизонтів

№	Назва родовища	Кількість продуктивних горизонтів (покладів)	Кількість балів max – 2 бали
1	Свидницьке	6	1
2	Коханівське	1	2
3	Вижомлянське	6	1
4	Вишнянське	6	1
5	Никловицьке	4	2
6	Макунівське	1	2
7	Хідновицьке	7	1
8	Садковицьке	7	1
9	Пинянське	7	1
10	Залужанське	13	1
11	Новосілківське	2	2

Зазвичай для підземного зберігання водню у виснажених газових родовищах використовується один або декілька продуктивних горизонтів. Це залежить від їхніх геологічних та інженерних характеристик, таких як пористість, проникність, товщина пласта і його герметичність.

Переваги кількох горизонтів:

Збільшення загальної ємності. Використання декількох пластів-колекторів, розташованих на різних глибинах, дозволяє значно збільшити загальний об'єм сховища, що є критично важливим для великомасштабного зберігання водню.

Підвищення гнучкості. Використання кількох горизонтів може забезпечити більшу гнучкість в управлінні сховищем, дозволяючи оптимізувати процеси закачування та відбору водню.

Зниження ризиків. Якщо один горизонт виявиться менш ефективним через геологічні аномалії або проблеми з герметичністю, наявність інших пластів може компенсувати втрати.

Недоліки кількох горизонтів:

Складність та вартість. Розробка сховища, що включає кілька горизонтів, вимагає буріння більшої кількості свердловин та складнішої інфраструктури, що значно збільшує капітальні витрати.

Інженерні виклики.

Закачування і відбір водню з різних пластів одночасно вимагає ретельного інженерного планування, щоб уникнути взаємного впливу та проблем із тиском.

Зазвичай перевагу надають одному або двомосновним горизонтам, які мають найкращі характеристики (велика товщина, висока пористість і проникність) і забезпечують максимальну ефективність та безпеку. Використання більшої кількості горизонтів є доцільним лише тоді, коли одного пласта недостатньо для досягнення запланованої ємності, а геологічні умови дозволяють ефективно розробляти декілька пластів одночасно. Остаточне рішення приймається на основі детальних геологічних досліджень та економічного аналізу.

## 9. Оцінка за типом покладу.

Таблиця 4.9- Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за типом покладу.

№	Назвародовища	Тип покладу	Кількість балів max – 3 бали
1	Свидницьке	Пластовий, склеп. Літобмеж та тектекранований	3
2	Коханівське	Масивний	1
3	Вижомлянське	Пластовий склеп. Тектекранований	2
4	Вишнянське	Пластовий склеп. Тектекранований	2
5	Никловицьке	Пластовий склеп. Тектекранований	2
6	Макунівське	Пластовий. Тектонічноекранований	2
7	Хідновицьке	Пластовий склеп. Тектекранований	2
8	Садковицьке	Пластовий склеп. Тектекранований	2
9	Пинянське	Пластовий склеп. Літологічнообмежений і тектекранований	3
10	Залужанське	Пластовий склеп. та літологічнообмежені	2
11	Новосілківське	Пластовий склеп. Тектекранований	2

Всі типи покладів, представлені в таблиці 9, можуть бути використані для підземного зберігання водню. Однак, кращими є пластові склепінні поклади з літологічним обмеженням. Вони мають перевагу над тектонічно обмеженими та масивними покладами.

Пластовий склепінний літологічно обмежений поклад утворюється, коли колектор повністю обмежується з усіх боків непроникними породами (наприклад, глинами або солями) внаслідок зміни фацій або виклинювання пласта. Цей поклад ідеальний для ПСГ, оскільки його герметичність залежить

від стабільних, природних геологічних властивостей порід, а не від структурних порушень. Відсутність значних розломів або інших тектонічних порушень мінімізує ризик витоку газу з сховища.

Пластовий тектонічно обмежений поклад утворюється, коли рух тектонічних плит створює розломи, які перекривають пласт-колектор. Покришкою в цьому випадку є вже самі розломи, заповнені непроникним матеріалом. Основний недолік — це потенційний ризик втрати герметичності. Надійність сховища залежить від цілісності розлому, яка може бути порушена зміною тиску під час закачування і відбору газу.

Масивні поклади мають потенційно більший обсяг, протепластові поклади є більш надійними та простими в експлуатації, що є критично важливим для підземних сховищ газу. Для ПСГ головне — не лише вмістити багато газу, а й мати можливість швидко його закачати та відібрати, а також гарантувати неможливість його витоку. Пластові поклади з їхніми чітковизначеними межами та надійними покриттями краще відповідають цим вимогам.

## 10. Оцінка згідно року затвердження запасів.

Таблиця 4.10- Рік затвердження запасів на родовищах

№	Назва родовища	Рік затвердження запасів	Кількість балів max – 2 бали
1	Свидницьке	1959	1
2	Коханівське	1962 і 1993	2
3	Вижомлянське	1993	2
4	Вишнянське	1954?	1
5	Никловицьке	1990	2
6	Макунівське	1990	2
7	Хідновицьке	1966	1
8	Садковицьке	1968	1
9	Пинянське	1970	1

10	Залужанське	1980	1
11	Новосілівське	1972	1

Рік, коли були затверджені запаси, має значення для вибору підземного сховища (ПСГ) водню, оскільки він вказує на те, за якими методиками та з якою деталізацією проводилася оцінка родовища. За останні десятиліття змінилися методики підрахунку запасів вуглеводнів, вимоги до геолого-економічної оцінки, а також до збору та обробки первинних геологічних даних. Якщо запаси затверджувалися, наприклад, у 1970-80-х роках, то дані могли базуватися на меншточних методах, ніжсучасні. Старі звіти можуть містити обмежену інформацію, що ускладнить детальну оцінку родовища для зберігання водню. Сучасна оцінка родовищ використовує високоточні методи, такі як 3D сейсміка, ГДС (гідродинамічні дослідження свердловин), та детальний каротаж. Ці технології дозволяють отримати набагато повнішу картину про геометрію покладу, його фізичні властивості (пористість, проникність) та наявність пластових вод, що є критично важливим для ПСГ водню. З моменту затвердження запасів, родовище експлуатувалося, що спричинило зміни в пластовому тиску, насиченості флюїдами (газ, вода), а також в гідрогеологічних умовах. Інформація, щобула актуальною 30-40 років тому, не відображає поточний стан родовища.

Для вибору ПСГ водню необхідно провести комплексну переоцінку виснаженого газового родовища, незалежно від року затвердження йогозапасів. Навіть якщо родовище затвердили нещодавно, для водню потрібен окремий аналіз, оскільки він має зовсім інші фізико-хімічні властивості порівняно з природним газом (наприклад, меншу молекулярну масу, що підвищує ризик витоків).

## **11. Оцінка за режимом покладів.**

Таблиця 4.11- Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за режимом покладів

№	Назва родовища	Режим покладів	Кількість балів max – 2 бали
1	Свидницьке	Газовий	2
2	Коханівське	Пружний та розчиненого газу	0
3	Вижомлянське	Газовий	2
4	Вишнянське	Газовий	2
5	Никловицьке	Газовий	2
6	Макунівське	Газовий	2
7	Хідновицьке	Газовий	2
8	Садковицьке	Газовий	2
9	Пинянське	Газовий	2
10	Залужанське	Газовий	2
11	Новосілківське	Газовий	2

Якщо порівняти режими — газовий, пружний та режим розчиненого газу, то для зберігання водню найбільш оптимальним є газовий режим. Це пояснюється тим, що при газовому режимі основним енергоносієм виступає сам газ, який перебуває у вільному стані в порах колектора. Такий режим забезпечує стабільні умови зберігання, легкий контроль за тиском, ефективне закачування та відбір водню. При газовому режимі немає суттєвої залежності від енергії води чи розчиненого газу, тому ризик непередбачуваних змін у процесі експлуатації мінімальний. Пружний режим менш оптимальний, адже він базується на стисканні порового простору та пластових вод, що забезпечує лише обмежений обсяг енергії. Це ускладнює довготривале зберігання та зменшує ефективність відбору газу. Режим розчиненого газу є найменш придатним, оскільки водень у такому випадку перебуває не у вільному стані, а розчинений у пластових флюїдах. Для його відбору потрібні значні зміни тиску, процес є

енерговитратним і неконтрольованим, що практично виключає можливість використання такого режиму для цілей підземного зберігання.. Таким чином найменшоптимальним є Коханівське родовище.

## 12. Оцінка гідності кількості свердловин сна родовищах.

Таблиця 4.12- Кількість свердловин на родовищах

№	Назва родовища	Кількість свердловин на початок	Кількість балів тах – 2 бали
1	Свидницьке	21	2
2	Коханівське	27	2
3	Вижомлянське	14	1
4	Вишнянське	17	2
5	Никловицьке	6	1
6	Макунівське		
7	Хідновицьке	27	2
8	Садковицьке	3	1
9	Пинянське	39	2
10	Залужанське	27	2
11	Новосілківське	14	2

Кількість свердловин у виснаженому газовому родовищі має критичне значення для вибору його як ПСГ водню. Вона впливає на економіку проекту, його експлуатаційну гнучкість, а також на технічну та екологічну безпеку. Чим більше наявних свердловин, тим нижчі капітальні витрати на будівництво ПСГ, оскільки не потрібно бурити нові. Проте, кожна свердловина повинна бути перевірена на цілісність та придатність для роботи з воднем. Мала кількість свердловин може обмежувати швидкість відбору, що знижує ефективність ПСГ як балануючого активу. . Водень є легкою та дуже мобільною молекулою, яка може просочуватися навіть через дрібні дефекти в цементному камені або

обсадній колоні. Тому, наявні свердловини потребують ретельної перевірки на цілісність, а старі та небезпечні — ліквідації.

Отже, кількість свердловин — це не просто цифра, це індикатор, який відображає потенційні витрати, експлуатаційну ефективність та безпеку майбутнього ПСГ. Ідеальний сценарій — це родовище з достатньою кількістю добре збережених, рівномірно розташованих свердловин, які можна модернізувати для використання з воднем.

### 13. Оцінка згідно початковому дебіту газу/нафти.

Таблиця 4.13- Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню згідно початковому дебіту газу/нафти

№	Назва родовища	Дебіти газу, тис м <sup>3</sup> /добу / нафти, т/добу початкові	Кількість балів max – 3 бали
1	Свидницьке	19-42 / -	2
2	Коханівське	- / 20	1
3	Вижомлянське	2,23-22,4 / -	1
4	Вишнянське	12,28-23,51 / 0,6	1
5	Никловицьке	14,2-18,9 / -	1
6	Макунівське	38,9 / -	2
7	Хідновицьке	12,0-358,8 / -	3
8	Садковицьке	3,2-34 / -	1
9	Пинянське	361 / -	3
10	Залужанське	10,5-15,4 / -	1
11	Новосілківське	20-95,4 / -	3

Початковий дебіт свердловини є важливим показником при оцінці потенційних об'єктів для підземного зберігання водню, оскільки він безпосередньо відображає фільтраційно-ємнісні властивості колектора. Високий

початковий дебіт свідчить про добру проникність і достатню пористість порід, що забезпечує можливість швидкого закачування та відбору водню у промислових масштабах. Це означає, що такі горизонти здатні працювати ефективно в умовах сезонних коливань попиту на енергію, коли необхідні значні обсяги газу за короткий проміжок часу. Низький початковий дебіт, навпаки, вказує на обмежену проникність або неоднорідність пласта, що ускладнює процеси закачування й відбору та може призвести до високих експлуатаційних витрат. У такому випадку навіть при достатньому об'ємі порового простору колектор не буде оптимальним для зберігання водню, адже забезпечення необхідної продуктивності вимагатиме значної кількості свердловин або додаткових технічних заходів.

#### **14. Оцінка гідності кількості початкових запасів.**

Таблиця 4.14- Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню згідно кількості початкових запасів

№	Назва родовища	Початкові запаси, млн м <sup>3</sup>	% відбору	Кількість балів max – 3 бали
1	Свидницьке	6901	89,2	3
2	Коханівське			-
3	Вижомлянське	4731		3
4	Вишнянське	1565		3
5	Никловицьке	3035		3
6	Макунівське	382		1
7	Хідновицьке	17018	91,7	2
8	Садковицьке	2307	13,3	0
9	Пинянське	15612	52,1	3
10	Залужанське	27938	13,6	0
11	Новосілківське	702	17,7	0

Початкові запаси природного газу в родовищі мають критично важливе значення для створення в ньому підземного сховища водню. Вони є основою для оцінки технічної та економічної доцільності проєкту. Чим більші початкові запаси газу, тим більший об'єм, доступний для зберігання водню, що робить проєкт економічно привабливішим. Наявність значних початкових запасів вказує на те, що родовище має надійний пласт-колектор (пористий і проникний) і, що найважливіше, щільну, непроникну покривку, яка утримувала газ протягом мільйонів років. Ця герметичність є критичною, оскільки молекула водню значно менша за молекулу метану і більш схильна до просочування.

Таким чином, визначаючи оптимальну величину початкових запасів газу при виборі об'єкта для підземного зберігання водню необхідно знайти баланс між технічною можливістю (ємністю пласта), економічною ефективністю та експлуатаційними вимогами. Це результат детального проєктування та моделювання для кожного окремого ПСГ.

У виснажених газових родовищах часто залишається природний газ (метан), який може виконувати роль буфера. Це дозволяє уникнути додаткових витрат на закачування буферного газу. Однак, якщо потрібна висока чистота водню, може бути необхідним закачування іншого газу, наприклад азоту чи вуглекислого газу, що збільшує початкові інвестиції. Частка буферного газу зазвичай становить 30-50%.

## 15. Оцінка за показником пластового тиску.

Таблиця 4.15 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за показником пластового тиску

№	Назва родовища	Початковий пластовий тиск, МПа	Кількість балів max – 3 бали
1	Свидницьке	2,33-7,45	3

2	Коханівське	11,1	3
3	Вижомлянське	10,7-11,5	3
4	Вишнянське	7,87	3
5	Никловицьке	10,9-13,0	3
6	Макунівське	23,9	3
7	Хідновицьке	1,2-8,8	3
8	Садковицьке	2,4-10,9	3
9	Пинянське	2,7-17,14	3
10	Залужанське	2,8-44,08	3
11	Новосілковське	1,7-15,6	3

При виборі підземного сховища водню у виснаженому газовому родовищі початковий пластовий тиск є одним із найважливіших критеріїв. Він безпосередньо впливає на ємність сховища, його ефективність та економічну доцільність. Ємність ПСГ прямо залежить від тиску. Згідно із законом Бойля-Маріотта, чим вищий тиск, тим більше газу можна вмістити в одному і тому ж об'ємі. Тому, родовища з вищим початковим пластовим тиском зазвичай мають більший потенціал для зберігання. Низький початковий тиск може збільшити ризик взаємодії водню з іншими речовинами в пласті. Водень — це дуже "летучий" газ, і при низькому тиску можуть виникати проблеми з його витоками, а також з його розчиненням у пластових водах. Високий тиск, навпаки, допомагає утримувати водень у потрібному об'ємі та мінімізувати втрати.

#### **16. Оцінка за показником показником пластової температури.**

Таблиця 4.16 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за показником пластової температури

№	Назва родовища	Пластова температура , К	Кількість балів max – 1 бали
1	Свидницьке	300	1

2	Коханівське	330	1
3	Вижомлянське	332	1
4	Вишнянське	321	1
5	Никловицьке	319	1
6	Макунівське	359	1
7	Хідновицьке	310	1
8	Садковицьке	305	1
9	Пинянське	319	1
10	Залужанське	347	1
11	Новосілковське	328	1

Оптимальна температура для підземного зберігання водню у виснажених газових родовищах збігається з природною температурою пласта, яка залежить від глибини залягання. У кельвінах ця температура зазвичай знаходиться в діапазоні від 290 К до 380 К. Хоча підвищення температури пласта може впливати на швидкість деяких хімічних та мікробіологічних реакцій, дослідження показують, що при типових температурах газових родовищ втрати водню через такі реакції є незначними.

### 17. Оцінка за показником пористості.

Таблиця 4.17 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за показником пористості

№	Назва родовища	Пористість			Кількість балів max – 4бали
		промислова min	промислова mid	промислова max	
1	Свидницьке	0,059	0,14	0,222	2
2	Коханівське	0,013	0,15	0,284	3
3	Вижомлянське	0,09	0,15	0,21	3

4	Вишнянське	0,025	0,09	0,15	1
5	Никловицьке	0,03	0,20	0,37	4
6	Макунівське	0,09	0,14	0,19	2
7	Хідновицьке	0,063	0,13	0,19	2
8	Садковицьке	0,07	0,11	0,153	2
9	Пинянське	0,04	0,14	0,238	2
10	Залужанське	0,1	0,16	0,217	3
11	Новосілівське	0,114	0,17	0,226	3

Для підземного сховища водню пористість має бути високою, що забезпечить ефективне та безпечне зберігання. Ідеальними вважаються значення пористості понад 20%. Однак, пористість є лише одним з ключових параметрів; не менш важливою є також проникність (здатність породи пропускати газ).

Чим більша пористість, тим більше водню може бути фізично розміщено у порах колектора. Це безпосередньо впливає на активний об'єм сховища. Висока пористість, у поєднанні з високою проникністю, забезпечує легке закачування та відбір водню. Це дозволяє швидко реагувати на зміни попиту на енергію.

Таким чином, для створення підземного сховища водню, розглядаються колектори з пористістю не менше 15%, але найбільш бажаними є поклади з пористістю 20% і більше, які мають високу проникність.

## 18. Оцінка за показником проникності.

Таблиця 4.18 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за показником проникності

№	Назва родовища	Проникність, $1 \times 10^{-3}$ мкм <sup>2</sup>			Кількість балів max – 3 бали
		промислова min	промислова mid	промислова max	
1	Свидницьке	0,1	71,1	142	2
2	Коханівське	0,001	12,5	25	1

3	Вижомлянське	0,33	8	15,7	1
4	Вишнянське				-
5	Никловицьке	0,45	18,2	35,9	1
6	Макунівське				-
7	Хідновицьке	0,1	752,6	1505	3
8	Садковицьке	0,3	10,2	20,1	1
9	Пинянське	0,1	335,8	671,4	3
10	Залужанське	0,07	47,0	94	1
11	Новосілівське	0,1	28,3	56,5	1

Для підземного зберігання водню у виснажених газових родовищах необхідна висока проникність (permeability). Оптимальне значення проникності для колектора ПСГ водню, як і для природного газу, зазвичай становить понад 100 мілідарсі (mD).

Водень — дуже легкий газ, тому його руху пористому середовищі залежить від проникності породи. Висока проникність дозволяє швидко закачувати великі обсяги водню під час низького попиту та так само швидко відбирати його в пікові періоди.

У сховищах із низькою проникністю для закачування газу потрібен високий тиск, а для його відбору — вакуумування. Це вимагає значних енергетичних витрат, щоробитьпроектекономічноневигідним. Висока проникність дозволяє мінімізувати ці витрати.

Низька проникність може призвести до нерівномірного розподілу водню в пласті, що ускладнює контроль за сховищем і може призвести до витоків.

Хоча вимоги до проникності для водню схожі з вимогами для природного газу, є одна важлива відмінність: водень має меншу в'язкість і меншу молекулярну масу, ніж метан. Це означає, що водень може проникати в пори навіть із низькою проникністю, але це не скасовує вимоги до високої проникності для комерційно ефективного ПСГ. Низькомолекулярна маса водню також

підвищує ризик його витоку через мікроскопічні тріщини, тому надійність покриття є ще більш важливою, ніж для метану.

Таким чином, для ПСГ водню потрібно шукати родовища, що мають відмінні колекторські властивості, з проникністю, яка дозволить забезпечити високі дебіти нагнітання та відбору.

## 19. Оцінка за показником рН.

Таблиця 4.19 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за показником рН

№	Назва родовища	рН			Кількість балів max – 2 бали
		min	mid	max	
1	Свидницьке		8		1
2	Коханівське				-
3	Вижомлянське	6,5	6,8	7	2
4	Вишнянське	6	6,5	7	2
5	Никловицьке	7	7		2
6	Макунівське	6,5	6,5		2
7	Хідновицьке	5,9	6,4	7	2
8	Садковицьке	5,2	8,1	11	1
9	Пинянське	6	7,5	9	1
10	Залужанське	6	7,3	8,5	1
11	Новосілковське	4	4		1

Рівень рН пластової води є ключовим фактором, що впливає на мікробіологічну активність у підземних сховищах, що, у свою чергу, має прямий вплив на ефективність та безпеку зберігання водню.

Більшість мікроорганізмів, таких як метаногени та сульфатвідновлювальні бактерії, які споживають водень, найкраще ростуть у певних діапазонах рН. Зміна рН пластової води за межі оптимального діапазону для цих мікробів може сповільнити їх активність або навіть зупинити її. Це може знизити втрати водню

та утворення небажаних побічних продуктів, таких як метан (CH<sub>4</sub>) або сірководень (H<sub>2</sub>S).

Деякі мікробіологічні реакції, що споживають водень, можуть самі призводити до зміни рН. Наприклад, утворення сірководню при відновленні сульфатів може призвести до збільшення рН води, що в свою чергу може вплинути на подальшу мікробну активність.

рН також впливає на корозію свердловинного обладнання та розчинення/осадження мінералів у пласті. Екстремальні значення рН (як дуже кисле, так і дуже лужне середовище) можуть підвищувати ризик корозії.

Рівень рН є важливим параметром для характеристики і моніторингу підземних сховищ водню. Регулярний контроль рН може дати цінну інформацію про хімічні та біологічні процеси, що відбуваються в пласті, та дозволити вчасно вжити заходів для запобігання втратам газу.

Таким чином, підтримання оптимального рівня рН є важливим елементом стратегії зберігання водню.

Ідеальний рН для підземного зберігання водню — це той, що мінімізує мікробіологічну активність, яка може призвести до втрат водню, і забезпечує стабільність сховища. Оптимальний діапазон рН для більшості підземних сховищ водню знаходиться в нейтральному або слабокислому діапазоні (рН від 5 до 7).

## 20. Оцінка за показником мінералізації пластової води.

Таблиця 4.20 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за показником мінералізації пластової води

№	Назва родовища	Мінералізація, г/дм <sup>3</sup>			Кількість балів max – 3 бали
		min	mid	max	
1	Свидницьке	19,45	21,81	24,16	2
2	Коханівське	71,8	71,8		1
3	Вижомлянське	12,1	42,6	73,1	1

4	Вишнянське	8,67	17,23	25,79	2
5	Никловицьке	10,43	14,24	18,06	3
6	Макунівське	122	122		0
7	Хідновицьке	3,56	33	62,44	2
8	Садковицьке	26,7	40,15	53,6	1
9	Пинянське	13,2	16,6	20	2
10	Залужанське	16	27,05	38,1	2
11	Новосілківське	8,82	8,82		3

Мінералізація пластової води (М) має значний вплив на зберігання водню у підземних сховищах, зокрема у виснажених нафтових/газових родовищах. Цей вплив проявляється у двох основних аспектах: геохімічні реакції та мікробіологічна активність.

Висока мінералізація пластової води, тобто велика концентрація розчинених солей (хлоридів, сульфатів, натрію, калію та інших іонів), може призводити до небажаних геохімічних реакцій при контакті з воднем. Водень, будучи дуже реакційною молекулою, може взаємодіяти з мінералами та солями, що містяться у воді та породах колектора. Це може спричинити такі негативні наслідки:

- Корозія та руйнування свердловинного обладнання. Солоня вода в поєднанні з воднем може спричинити корозію сталевих труб і цементу, що використовується для кріплення свердловин. Це може призвести до витоків водню та зниження цілісності сховища.

- Зміна фізичних властивостей колектора. Реакції між воднем, мінералами та іонами в пластовій воді можуть призвести до розчинення одних мінералів і випадання в осад інших. Це може змінити пористість та проникність породи-колектора, що, в свою чергу, впливає на ефективність закачування та відбору водню.

Пластові води часто містять різні мікроорганізми, включаючи сульфатвідновлювальні бактерії (SRB). Ці бактерії можуть використовувати

водень як джерело енергії, реагуючи з сульфатами, що розчинені у воді. Цей процес призводить до утворення небажаних побічних продуктів, таких як сірководень (H<sub>2</sub>S).

- Зниження чистоти водню. Утворений сірководень є забруднюючою домішкою, яка знижує чистоту збереженого водню. Це є серйозною проблемою, оскільки водень високої чистоти (наприклад, для паливних елементів) є дуже цінним. Необхідність подальшого очищення збільшує витрати та складність експлуатації ПСГ.

- Втрати водню. Мікробіологічна деградація водню призводить до незворотних втрат газу, що знижує ефективність зберігання.

Враховуючи ці фактори, об'єкти з високою мінералізацією пластових вод потребують ретельнішого аналізу та інженерних рішень для мінімізації негативних наслідків при зберіганні водню.

Аналізуючи показники мінералізації на об'єктах досліджень, можна констатувати наступне:

Пластові води середньої мінералізації (за класифікацією В.І. Вернадського) характерні для родовищ: Никловицьке, Новосілківське, які є придатні для зберігання водню за величиною М, високої мінералізації – Свидницьке, Вишнянське, Хідновицьке, Пинявське, Залужанське. Розсоли – для родовищ: Коханівське, Вижомлянське, Макунівське, Садковицьке, відповідно геологічні умови цих родовищ за показником М є найменш сприятливими для створення в них об'єктів підземного зберігання водню.

## 21. Оцінка за значенням коефіцієнта метаморфізації.

Таблиця 4.21- Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за значенням коефіцієнта метаморфізації

№	Назва родовища	Na/Cl			Кількість балів max – 2 бали
		min	mid	max	
1	Свидницьке	0,96	1,08	1,21	2

2	Коханівське	0,84	0,84		1
3	Вижомлянське	0,67	0,9	1,13	2
4	Вишнянське	0,9	1,01	1,13	2
5	Никловицьке	1,06	1,5	1,94	1
6	Макунівське	0,72	0,72		1
7	Хідновицьке	0,81	1	1,2	2
8	Садковицьке	0,8	0,87	0,94	2
9	Пинянське	1,14	1,22	1,29	1
10	Залужанське	0,53	0,67	0,81	1
11	Новосілківське	1,3	1,3		1

Коефіцієнт метаморфізації ( $r_{Na/Cl}$ ), який відображає ступінь зміни хімічного складу підземних вод, може мати непрямий вплив на зберігання водню у виснажених газових родовищах. Цей вплив проявляється через геохімічні реакції, що відбуваються між воднем, пластовою водою та породою-колектором. Хоча пряма залежність коефіцієнта метаморфізації від втрат водню не є домінантною, він може слугувати індикатором умов, які сприяють небажаним процесам, таким як біогенні реакції та хімічні перетворення.

Оптимальне значення коефіцієнта метаморфізації для підземного зберігання водню у виснажених газових родовищах має бути якомога ближчим до 1. Коефіцієнт метаморфізації ( $C_m$ ) — це важливий гідро геохімічний показник, який характеризує склад підземних вод. Він показує співвідношення між концентрацією іонів натрію ( $Na^+$ ) та хлоридів ( $Cl^-$ ) у воді. При підземному зберіганні водню в пористих породах, де раніше знаходився природний газ, водень контактує з залишковою пластовою водою. Якщо коефіцієнт метаморфізації значно відрізняється від 1, це може свідчити про невідповідність хімічного складу води для безпечного та ефективного зберігання водню. Значення коефіцієнта метаморфізації, близьке до 1, вказує на те, що вода має первинний, менш змінений хімічний склад, характерний для високомінералізованих розсолів у закритих гідродинамічних системах. У таких

умовах, якісні колекторні властивості порід (пористість, проникність) та цілісність покладу зазвичай добре збережені. Відхилення коефіцієнта від 1 може свідчити про процеси розчинення мінералів або змішування пластових вод з іншими типами вод, що може негативно вплинути на: цілісність герметизації, корозію обладнання, втрати водню.

Таким чином, для вибору оптимального місця для підземного сховища водню у виснаженому газовому родовищі, слід віддавати перевагу тим ділянкам, де пластові води мають коефіцієнт метаморфізації, близький до 1, що свідчить про їх високу гідрогеологічну ізоляцію та мінімальні зміни в часі.

## 22. Оцінка за показником вмісту CO<sub>2</sub>.

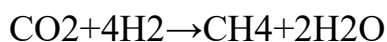
Таблиця 4.22 - Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за показником вмісту CO<sub>2</sub>

№	Назва родовища	CO <sub>2</sub> , об'ємних %			Кількість балів max – 3 бали
		min	mid	max	
1	Свидницьке	0,005	0,152	0,3	1
2	Коханівське	0,96	0,96		2
3	Вижомлянське	0,16	0,295	0,43	3
4	Вишнянське	0,005	0,132	0,26	3
5	Никловицьке	0,21	0,825	1,44	2
6	Макунівське	1,466	1,466		1
7	Хідновицьке	0,1	0,44	0,78	3
8	Садковицьке	0,2	0,520	0,839	3
9	Пинянське	0,2	0,468	0,736	3
10	Залужанське	0,24	1,055	1,87	1
11	Новосілківське	0,54	1,2	1,86	1

Вплив CO<sub>2</sub> на зберігання водню в підземних сховищах є значним, оскільки він може призвести до незворотних втрат водню та утворення небажаних

продуктів. Основна проблема полягає в біологічних реакціях, які можуть відбуватися за участю CO<sub>2</sub>, а також у хімічних взаємодіях.

Мікробіологічна активність. Наявність вуглекислого газу в пласті може сприяти діяльності метаногенів – мікроорганізмів, які виробляють метан (CH<sub>4</sub>). Ці бактерії використовують водень (H<sub>2</sub>) як джерело енергії та відновлюють CO<sub>2</sub> до метану. Цей процес відомий як реакція Сабатьє і є основною причиною втрат водню під час зберігання.



В результаті цієї реакції частина закачаного водню перетворюється на метан, що не тільки зменшує обсяг водню, який можна відібрати, але й призводить до забруднення збереженого газу. Забруднений водень потребуватиме додаткового очищення для подальшого використання, наприклад, у паливних елементах, що збільшує експлуатаційні витрати.

Хоча реакція Сабатьє є найбільш поширеною, CO<sub>2</sub> може також вступати в інші хімічні реакції з воднем, особливо при високих тисках і температурах, що характерно для підземних сховищ. При певних умовах може утворюватися чадний газ (CO), хоча цей процес менш вірогідний, ніж метанізація.

Вплив CO<sub>2</sub> на зберігання водню має бути врахований при проєктуванні та експлуатації підземних сховищ. Кращими вважаються ті геологічні структури, де немає значних покладів вуглекислого газу або мікроорганізмів-метаногенів.

Для потенційних об'єктів зберігання водню, які аналізуються в даній роботі, можна скласти умовну шкалу поділу за вмістом газу CO<sub>2</sub> і відповідно ранжувати їх за кількістю балів. Вміст CO<sub>2</sub> від 0 до 0,5 - 3 бали; від 0,5 до 1,0 - 2 бали і від 1 до 1,5 - 1 бал.

### 23. Оцінка за показником вмісту NH<sub>4</sub>.

Таблиця 4.23 – Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за показником вмісту NH<sub>4</sub>

№	Назва родовища	NH <sub>4</sub> , об'ємних %			Кількість балів max – 2 бали
		min	mid	max	

1	Свидницьке				
2	Коханівське				
3	Вижомлянське	10	110	210	1
4	Вишнянське	20	55	90	2
5	Никловицьке	5	25	45	2
6	Макунівське	550	550		0
7	Хідновицьке	35	119	203	1
8	Садковицьке	80	130	180	1
9	Пинянське	22	30	38	2
10	Залужанське				
11	Новосілківське				

Вплив іона амонію ( $\text{NH}_4^+$ ) на підземне зберігання водню є непрямим, але значним і пов'язаний переважно з геохімією пластових вод. Амоній сам по собі не вступає в хімічні реакції з воднем, але його наявність може свідчити про певні умови в пласті, які можуть бути проблематичними. Амоній ( $\text{NH}_4^+$ ) може природно зустрічатися в підземних водах, утворюючись внаслідок розкладання органічних речовин або біохімічних реакцій в анаеробних умовах. Його присутність у пластових водах може вказувати на певні геохімічні умови, які можуть бути сприятливими для інших мікробіологічних процесів, що впливають на водень. Амоній добре розчиняється у воді. Це важливо, оскільки водень також взаємодіє з пластовою водою. Це може впливати на розчинність та масообмін водню між газовою фазою та пластовою водою. Хоча амоній безпосередньо не реагує з воднем, він може впливати на рН води та інші параметри, що, в свою чергу, можуть впливати на хімічні та біологічні процеси в пласті.

Наявність амонію може бути пов'язана з певними видами мікроорганізмів, які можуть бути активними у підземних умовах. Наприклад, в анаеробних умовах деякі мікроорганізми можуть перетворювати амоній, що може вказувати на потенціал для інших мікробіологічних реакцій.

Хоча пряма біохімічна реакція між іоном амонію та воднем не є ключовою проблемою, важливо враховувати, що присутність амонію є індикатором певного біохімічного середовища, яке може бути сприятливим для метаногенів або інших мікроорганізмів, що можуть споживати водень, перетворюючи його на метан (CH<sub>4</sub>). Це призводить до втрат водню та забруднення газу.

Таким чином, сам по собі NH<sub>4</sub><sup>+</sup> не є критичною загрозою для підземного зберігання водню, проте його наявність вимагає ретельного дослідження, оскільки він може бути індикатором несприятливих біохімічних та геохімічних умов у пласті.

Для потенційних об'єктів зберігання водню, які аналізуються в даній роботі, можна скласти умовну шкалу поділу за вмістом іона амонію (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) і відповідно ранжувати їх за кількістю балів. Вміст іона амонію від 0 до 100 - 2 бали; від 100 до 500 – 1 бал і ,більше 500 – 0 балів.

#### 24. Оцінка за показником вмісту N<sub>2</sub>.

Таблиця 4.24 – Оцінка потенційних об'єктів зберігання водню за показником вмісту N<sub>2</sub>

№	Назва родовища	N <sub>2</sub> , об'ємних %			Кількість балів max – 2 бали
		min	mid	max	
1	Свидницьке	0,4	0,79	1,187	2
2	Коханівське	9,54	9,54		1
3	Вижомлянське	0,21	0,59	0,96	2
4	Вишнянське	0,002	0,62	1,23	2
5	Никловицьке	0,46	1,98	3,5	2
6	Макунівське	5,047	5,05		1
7	Хідновицьке	0,71	1,37	2,03	2
8	Садковицьке	0,23	0,89	1,553	2
9	Пинянське	0,11	2,2	4,291	2
10	Залужанське	0,43	3,42	6,41	2

11	Новосілівське	0,61	0,94	1,27	2
----	---------------	------	------	------	---

Азот є відносно безпечним з точки зору хімічних реакцій, але його наявність у сховищі вимагає врахування при плануванні експлуатації через вплив на чистоту водню та економічну доцільність.

Азот ( $N_2$ ) є інертним газом, тому він не вступає в хімічні реакції з воднем в умовах, характерних для підземних сховищ, щоробить його відносно безпечним компонентом для зберігання водню. Однак, наявність азоту в сховищі має певні наслідки, які впливають на ефективність та економіку процесу.

Азот є хімічно інертним газом, оскільки його молекула  $N_2$  має дуже міцний потрійний зв'язок. Це означає, що за нормальних умов (тиск, температура) у підземних сховищах азот не реагує з воднем. Реакція між азотом і воднем з утворення аміаку ( $NH_3$ ) відбувається лише за високих температур і тиску та в присутності каталізатора, що не є типовим для ПСГ.

Незважаючи на хімічну інертність, наявність азоту впливає на фізичні властивості газової суміші у сховищі. Азот може змішуватися з воднем, що призводить до:

**Зниження чистоти водню:** Азот є домішкою, яка знижує концентрацію водню у відібраному газі. Це може вимагати додаткового очищення водню для його подальшого використання, наприклад, у паливних елементах, де висуваються високі вимоги до чистоти.

**Зміни в об'ємному складі:** Якщо водень закачується в пласт, де вже є залишковий азот (наприклад, після закачування для підтримки тиску), об'єм газу у сховищі буде складатися із суміші  $H_2$  та  $N_2$ . Це вплине на розрахунки об'єму зберігання та ефективність відбору.

Оптимальні значення вмісту азоту для підземного зберігання водню у виснажених газових родовищах становлять менше 5%. Однак, чим менший вміст азоту, тим краще.

Таким чином, кожен із двадцяти чотирьох критеріїв виконує власну функцію в комплексній методиці оцінювання, а їх сукупний вплив формує

об'єктивну картину придатності структури до використання як підземного сховища водню. Система дозволяє відокремити найбільш перспективні об'єкти з оптимальною комбінацією геологічних параметрів, технічної готовності та економічної вигідності й обґрунтовує подальший вибір структур для детального вивчення та можливого пілотного впровадження.

### **РОЗДІЛ 5. Вибір придатних об'єктів для підземного зберігання водню на основі системи критерійної оцінки геологічних структур.**

Інтегральна оцінка, сформована за результатами порівняння родовищ за двадцятьма чотирма критеріями, дозволяє встановити загальний ступінь відповідності кожного об'єкта вимогам до підземного зберігання водню. Підсумкові бали відображають комплексний вплив геологічних, гідродинамічних, гідрохімічних та технічних параметрів на потенційну ефективність і безпечність майбутнього сховища. Усі критерії взаємопов'язані: оптимальна глибина формує необхідний тиск і герметичність, літологія визначає якість колектора, тип покладу забезпечує довготривале утримання газу, хімічні характеристики контролюють корозійні та мікробіологічні процеси, а розміри структури, дебіти і початкові запаси визначають фактичну ємність і продуктивність сховища. На основі інтегральних балів сформовано чітку характеристику для кожного родовища.

#### **Родовища, які є найбільш придатними для підземного зберігання водню**

Найбільш оптимальним родовищем за сукупністю всіх оцінених критеріїв є Никловицьке родовище, яке набрало найбільшу кількість балів серед

досліджених об'єктів. Його переваги полягають у тому, що глибина залягання пластів-колекторів перебуває в оптимальному діапазоні, який забезпечує достатній природний пластовий тиск, що є критично важливим для високої ємності та герметичності сховища. Теригенний піщано-глинистий колектор характеризується хорошою пористістю та проникністю, що полегшує процеси закачування та відбору водню навіть у періоди пікового попиту. Тип покладу — пластовий склепінний із тектонічним екрануванням — утворює природну пастку, яка ефективно утримувала газ протягом геологічного часу, а отже здатна зберігати й водень, молекула якого є значно меншою за молекулу метану. Мінералізація пластових вод є помірною, що знижує ризики хімічних реакцій, корозії обладнання та мікробіологічної деградації водню. Значні початкові запаси підтверджують наявність достатнього порового простору для розміщення великих обсягів газу. У сукупності всі ці показники роблять Никловицьке родовище найкращим кандидатом серед усіх аналізованих об'єктів.

До групи родовищ, які також добре підходять для створення підземного сховища водню, належать Вижомлянське та Вишнянське родовища, що отримали високі інтегральні оцінки. Вижомлянське родовище характеризується сприятливими глибинами залягання, що забезпечують оптимальні тиск і температуру, добре розвиненими піщано-глинистими колекторами із придатними фільтраційно-ємнісними властивостями, а також пластово-склепінним типом покладу, який гарантує природну ізоляцію водню від поверхневого середовища. Хімічні параметри пластових вод залишаються у межах прийнятних значень, що мінімізує ризики небажаних газо- і водо-хімічних реакцій. Вишнянське родовище аналогічно має хорошу геометрію структури, оптимальну глибину залягання та корисний тип колектора, який забезпечує збалансоване поєднання пористості і проникності. Наявність продуктивних горизонтів сарматського віку, які традиційно використовуються в Україні для підземного зберігання газу, підтверджує його перспективність для аналогічного використання у проєктах ПСГ водню.

Таким чином, Никловицьке, Вижомлянське та Вишнянське формують групу найперспективніших родовищ, які відповідають більшості геологічних і технічних вимог і забезпечують високу сумарну оцінку за всіма критеріями аналізу.

### **Родовища, які є умовно придатними або потребують додаткових технічних рішень**

До цієї групи належить Свидницьке родовище, яке продемонструвало середні результати та вимагає специфічного технічного підходу. Його головним недоліком є те, що глибина залягання пластів-колекторів є недостатньою і перебуває в межах, що не забезпечують ані належного пластового тиску, ані герметичної пастки необхідної якості. Відсутність достатньої товщини покритишки збільшує ризики витoku водню, який здатний проникати в мікротріщини та слабкі зони покривних порід. Окрім цього, підвищена мінералізація пластових вод створює потенційні труднощі, пов'язані з корозійною активністю середовища і ризиком мікробіологічного споживання водню. Разом із тим родовище має певні позитивні фактори — значні початкові запаси, достатню кількість свердловин та прийнятні колекторські властивості, що дає можливість розглядати Свидницьке як потенційний об'єкт у випадку реалізації інженерних заходів, спрямованих на компенсацію геологічних обмежень.

### **Родовища, які є найменш придатними і не рекомендовані до створення ПСГ водню**

Найменш придатним серед аналізованих об'єктів є Коханівське родовище, яке отримало найнижчу суму балів за інтегральною оцінкою. Головною його проблемою є масивний тип покладу, який не забезпечує природної ізоляції газу на рівні пластово-склепінних структур. Масивні поклади характеризуються неоднорідним тисковим полем, складною геометрією та суттєво меншою передбачуваністю поведінки газу в процесі закачування та відбору. Другою суттєвою проблемою є карбонатний тріщинний тип колектора, властивий вапнякам і доломітам, який характеризується високою фрагментованістю та

непередбачуваними шляхами міграції газу. Такі колектори мають більшу кількість мікро- і макротріщин, що збільшує ризик витоку водню, враховуючи його малий розмір молекули та високу дифузійну здатність. Третім важливим негативним чинником є висока мінералізація пластових вод, яка суттєво зростає у напрямку до розсолів і формує агресивне середовище, що може прискорювати хімічні взаємодії, ускладнювати експлуатацію свердловин і сприяти мікробіологічним процесам, що ведуть до деградації водню. Непридатність режиму покладу — пружний та розчиненого газу — також робить Коханівське одним із найнесприятливіших варіантів, оскільки такий режим не забезпечує стабільності тиску та потребує значних енерговитрат для відбору газу.

Узагальнення результатів показує, що найбільш перспективними об'єктами для підземного зберігання водню є родовища з оптимальною глибиною, розвинутим піщано-глинистим теригенним колектором, пластово-склепінним типом покладу, помірною мінералізацією та пружними структурними характеристиками. Саме такі умови формують природну герметичність, необхідну для утримання водню, забезпечують високу фільтраційну ефективність і дозволяють зберігати значні обсяги газу без підвищених ризиків. У цьому контексті Никловицьке, Вижомлянське та Вишнянське родовища є найкращими кандидатами для створення ПСГ водню. Свидницьке може використовуватися за наявності додаткових технічних заходів, а Коханівське є найменш придатним і не рекомендується для подальшого розгляду.

Результати критерійної оцінки геологічних структур наведені в табл. 5.1.



Таблиця 5.1 – Підсумкова таблиця оцінки родовищ за критерійними ознаками .

№	Назва родовища	Критерії																							Загальна кількість балів	
		Стан родовища	Стан ГРР	Глибина заляган	Розмір структури	Вік порід	Тип колектора	Склад колектора	К-сть продукт. газифікації	Тип покладу	Вміст запасів	Режим покладів	К-сть св. на початок	Дабіти	Початкові запаси	Пластовий тиск	Пластова температура	Пористість	Проникність	Мінералізація	pH	Na/Cl	CO2	NH4		N2
1	Свидницьке	3	2	1	2	1	3	2	1	3	1	2	2	2	3	3	1	2	2	2	1	2	1	-	2	44
2	Коханівське	1	2	2	3	1	1	1	2	1	2	0	2	1	-	3	1	3	1	1	-	1	2	-	1	32
3	Вижомлянське	3	4	2	2	2	3	2	1	2	2	2	1	1	3	3	1	3	1	1	2	2	3	1	2	49
4	Вишнянське	3	1	3	3	2	3	2	1	2	1	2	2	1	3	3	1	1	-	2	2	2	3	2	2	47
5	Никловицьке	3	4	3	3	2	3	2	2	2	2	2	1	1	3	3	1	4	1	3	2	1	2	2	2	54
6	Макунівське	3	4	1	1	1	3	2	2	2	2	2	1	2	1	3	1	2	-	0	2	1	1	0	1	37
7	Хідновицьке	3	2	3	1	2	3	2	1	2	1	2	2	2	2	3	1	2	3	2	2	2	3	1	2	49
8	Садковицьке	3	2	3	3	1	3	2	1	2	1	2	1	1	2	3	1	2	1	1	1	2	3	1	2	44
9	Пинявське	3	2	2	1	2	3	2	1	3	1	2	2	2	2	3	1	2	3	2	1	1	3	2	2	48
10	Залужанське	3	2	2	2	2	3	2	1	2	1	2	2	1	2	3	1	3	1	2	1	1	1	-	2	42
11	Новосілівське	3	4	2	1	2	3	2	2	2	1	2	2	2	1	3	1	3	1	3	1	1	1	-	2	45

## **Розділ 6. Охорона навколишнього середовища**

Охорона навколишнього середовища є невід'ємною складовою проектування, створення та експлуатації підземних сховищ водню, оскільки такі об'єкти належать до потенційно небезпечних елементів енергетичної інфраструктури та можуть чинити вплив на геологічне середовище, водні ресурси, атмосферне повітря й екосистеми загалом. Реалізація проєктів підземного зберігання водню повинна здійснюватися з дотриманням принципів екологічної безпеки, раціонального природокористування та мінімізації антропогенного навантаження.

Основними потенційними джерелами негативного впливу на навколишнє середовище при створенні та експлуатації підземних сховищ водню є порушення цілісності геологічного середовища, можливі витіки газу, вплив на стан підземних і поверхневих вод, а також утворення техногенних навантажень у процесі буріння, реконструкції свердловин та роботи компресорного обладнання. Особливу увагу необхідно приділяти забезпеченню герметичності продуктивних горизонтів і покривних порід, оскільки неконтрольована міграція водню може призводити до змін фізико-хімічних умов у суміжних водоносних комплексах.

З метою захисту підземних вод передбачаються заходи з ретельного контролю технічного стану свердловин, обсадних колон і цементного каменю, а також проведення регулярного моніторингу гідрогеохімічних показників. Важливим є запобігання контакту водню з прісними водоносними горизонтами, що досягається правильним вибором глибини залягання сховища, наявністю надійних покривних порід і дотриманням проєктних параметрів тиску.

Вплив на атмосферне повітря при експлуатації підземного сховища водню є обмеженим, проте можливий у разі аварійних витоків або під час роботи компресорних станцій. Для зменшення такого впливу передбачається використання герметизованого обладнання, систем контролю витоків, автоматизованих систем сигналізації та своєчасне технічне обслуговування обладнання. Водень не є токсичним газом, однак його накопичення у повітрі може

створювати вибухонебезпечні концентрації, що потребує постійного контролю та дотримання норм безпеки.

Під час будівельних і бурових робіт можливе тимчасове порушення ґрунтового покриву та ландшафту. Для мінімізації негативного впливу передбачаються заходи з рекультивації порушених земель, відновлення рослинного покриву та обмеження площі техногенного втручання. Всі роботи повинні виконуватися з урахуванням вимог екологічного законодавства та відповідних нормативних документів.

Експлуатація підземних сховищ водню також потребує організації системи екологічного моніторингу, яка включає контроль стану геологічного середовища, підземних вод, атмосферного повітря та технічного стану інженерних споруд. Отримані дані дозволяють своєчасно виявляти відхилення від проєктних параметрів і вживати коригувальні заходи з метою запобігання негативному впливу на довкілля.

Таким чином, дотримання вимог охорони навколишнього середовища при створенні та експлуатації підземних сховищ водню забезпечує екологічну безпеку проєкту, знижує ризики техногенного впливу та сприяє сталому розвитку водневої енергетики. Комплексний підхід до екологічних питань є необхідною умовою інтеграції підземного зберігання водню в сучасну енергетичну систему України.

## **Підсумки**

У даній магістерській роботі виконано комплексне дослідження геологічних структур Передкарпатського прогину з метою обґрунтування їхньої придатності для підземного зберігання водню та вдосконалення системи критерійної оцінки

Глобальний перехід енергетики до низьковуглецевої моделі розвитку та зростаюча роль водню як перспективного енергоносія зумовлюють необхідність створення безпечних і надійних систем його довготривалого зберігання, особливо в умовах нерівномірного виробництва енергії з відновлюваних джерел. З урахуванням наявності в Україні розвиненої газотранспортної інфраструктури, значної кількості виснажених нафтових і газових родовищ і вигідного географічного положення дослідження можливостей використання геологічних структур для підземного зберігання водню є своєчасним і практично значущим.

У ході дослідження виконано детальну геологічну характеристику одинадцяти родовищ Передкарпатського прогину з урахуванням їхньої тектонічної будови, літолого-стратиграфічних особливостей, типів колекторів, фільтраційно-ємнісних властивостей, глибин залягання продуктивних горизонтів, стану покришок та гідрогеохімічних умов.

На основі проведеного аналізу розроблено систему критерійної оцінки, що включає двадцять чотири показники та охоплює геологічні, геотехнічні, гідрогеохімічні й економічні аспекти, що дозволило здійснити кількісне порівняння досліджуваних об'єктів і обґрунтовано звузити коло потенційних структур до найбільш придатних для практичної реалізації проєктів підземного зберігання водню.

За результатами критерійної оцінки та комплексного аналізу геологічних і гідрогеохімічних умов як основні кандидати для створення підземного сховища водню обрано Никловицьке, Хідновицьке та Вижомлянське родовища, які характеризуються сприятливими колекторськими властивостями, надійною покришкою та прийнятними термобаричними умовами.

Проведена оцінка можливих ризиків і екологічних аспектів показала, що за умови дотримання технологічних вимог, контролю тискових режимів та

впровадження систем постійного моніторингу вплив підземного зберігання водню на навколишнє природне середовище може бути мінімізований. Отримані результати мають практичне значення та можуть бути використані при плануванні пілотних і промислових проєктів підземного зберігання водню, а також у подальших наукових дослідженнях у сфері розвитку водневої енергетики в Україні.

## **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Атлас родовищ нафти і газу України./ Під ред. М.М. Іванюти, В.О. Федина, Б.І. Денегі та ін.. В 6 томах.Т. -.- Львів: УНГА, 1998. (на всі родовища)
2. ДСТУ та нормативні документи щодо геологічного вивчення надр.
3. EnefCities. 50 відтінків: сірий, синій і зелений водню. Доступно за посиланням: <https://enefcities.org.ua/novyny/50-vidtinkiv-siryi-syniy-i-zelenyy-vodnyu/>
4. Зберігання CO<sub>2</sub>: як працює УЗВ [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://bellona.org/pro-tekhnohyyu-uzv/yak-pratsyuye-uzv/zberihannya-co2>
5. Зелений водень. Що це таке та які перспективи виробництва в Україні. <https://suspilne.media/176557-zelenij-voden-so-ce-take-ta-aki-perspektivi-virobnictva-v-ukraini/>
6. Міністерство енергетики України. Воднева стратегія України до 2050 року [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf>
7. Перспективи розвитку водневої енергетики в Україні // Міністерство енергетики України.
8. Фондові матеріали.
9. Caglayan D. G., Weber N., Heinrichs H. U., Linßen J., Robinius M., Kukla P. A., Stolten D. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45, No. 11. P. 6793–6805. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.161. URL:
10. Caglayan D. G., Weber N., Heinrichs H. U., Linßen J., Robinius M., Kukla P. A., Stolten D. Technical potential of salt caverns for hydrogen storage in Europe // International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45, No. 11. P. 6793–6805. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.161. URL: [https://juser.fz-juelich.de/record/866635/files/HE-D-19-05898\\_R1-pages-1%2C6-29.pdf](https://juser.fz-juelich.de/record/866635/files/HE-D-19-05898_R1-pages-1%2C6-29.pdf).
11. CCS в Україні: енергетична безпека та промисловість [Електронний ресурс]. — Режим доступу:

[https://bellona.org/assets/sites/4/UKRAINE\\_CCS\\_Energy\\_Security\\_Industry\\_Ukrainian.pdf](https://bellona.org/assets/sites/4/UKRAINE_CCS_Energy_Security_Industry_Ukrainian.pdf)

12. CO2GeoNet. CO<sub>2</sub> Geological Storage in Ukraine [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://co2geonet.com/media/31688/ukrainian.pdf>
13. Geological storage of hydrogen: A technical review / Caglayan D.G., Weber N., Heinrichs H. // *Applied Energy*.
14. Harati, Saeed, et al. “Multi-criteria Site Selection Workflow for Geological Storage of Hydrogen in Depleted Gas Fields: A Case for the UK.” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 51, 2023, pp.
15. Hydrogen storage in geological formations: Current state and future outlook / Tarkowski R. // *International Journal of Hydrogen Energy*.
16. Hydrogen Storage in Depleted Oil and Gas Reservoirs // U.S. Department of Energy.
17. Underground Hydrogen Storage: A Review of Global Projects and Geological Requirements / Heinemann N., Alcalde J., Miocic J. et al. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.