

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ПІДЗЕМНОГО ЗБЕРІГАННЯ ВОДНЮ В ПОКЛАДАХ КАМ'ЯНОЇ СОЛІ

Отримано 09 бер. 2023; рекомендовано до публікації 22 бер. 2023
Доступно онлайн 31 бер. 2023

Ю. П. Морозов¹, А. А. Барило²

Автор для кореспонденції: Анастасія Барило,
e-mail: geotherm@ukr.net

¹ д-р техн. наук.
<https://orcid.org/0000-0003-1632-9735>

² наук. співр.
<https://orcid.org/0000-0001-7981-6464>

^{1, 2} Інститут відновлюваної енергетики НАН
України, м. Київ, Україна.

При зберіганні водню найчастіше використовують методи його стиснення або зрідження під дією низьких температур. Підземне зберігання водню вважається найекономічнішим і найбезпечнішим варіантом його зберігання у великих обсягах. Україна володіє значними запасами калійних, калійно-магнієвих та кухонних солей. Розвідані запаси кам'яної солі в Україні перевищують 2,3 млрд т. У статті визначено основні характеристики п'яти соленосних басейнів, надано перелік родовищ солі, які розвідані, розробляються або перебувають у стадії ліквідації. На підставі аналізу даних літератури визначено критерії вибору ділянок, що придатні для спорудження підземних сховищ водню у соляних покладах. Запропоновано спосіб виробництва водню за рахунок сонячних і вітрових джерел енергії з подальшим його акумулюванням у покладах кам'яної солі. Основною проблемою при цьому є суттєве збільшення температури водню на виході з компресора. Охолодження водню пропонується здійснювати за допомогою поверхневих або ґрунтових вод.

Бібл. 15, рис. 2, табл. 3.

Ключові слова: сховище водню; соленосні поклади; критерії вибору ділянок; електролізер; температура стиснення водню.

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF UNDERGROUND HYDROGEN STORAGE IN ROCK SALT DEPOSITS

Received 09 Mar. 2023; accepted 22 Mar. 2023
Available online 31 Mar. 2023

Yu. Morozov¹, A. Barylo²

Author for correspondence: Anastasiia Barylo,
e-mail: geotherm@ukr.net

¹ Doctor of Tech. Sciences.
<https://orcid.org/0000-0003-1632-9735>

² Researcher.
<https://orcid.org/0000-0001-7981-6464>

^{1, 2} Institute of Renewable Energy NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Methods of hydrogen compression or liquefaction under the influence of low temperatures are most often used to store hydrogen. Underground storage of hydrogen is considered the most economical and safe option for its storage in large volumes. Ukraine has significant reserves of potash, potash-magnesium and table salt. Explored reserves of rock salt in Ukraine exceed 2.3 billion tons. The article defines the main characteristics of five salt-bearing basins, provides a list of salt deposits that are explored, developed or are in the stage of liquidation. Based on the analysis of literature data, the criteria for the selection of sites suitable for the construction of underground hydrogen storage facilities in salt deposits have been determined. A method of hydrogen production at the expense of solar and wind energy sources with its subsequent accumulation in rock salt deposits is proposed. The main problem of this method is a significant decrease in the temperature of hydrogen at the compressor outlet. Cooling of hydrogen is proposed to be carried out with the help of surface or ground water.

Bibl. 15, fig. 2, table. 3.

Keywords: hydrogen storage; saline deposits; site selection criteria; electrolyzer; compression temperature of hydrogen.

Вступ. Україна обрала шлях енергетичної диверсифікації своєї економіки за рахунок розширення джерел і шляхів постачання енергоресурсів, які б не тільки надійно задовольняли енергетичні потреби суспільства, знизили рівень залежності від імпортованих поставок енергоносіїв, а й сприяли збереженню довкілля. Основною проблемою подальшого розвитку електроенергетики України є збалансованість енергетичної системи та створення резерву на випадок виникнення форс-мажорних обставин. Одним із варіантів розв'язання цієї проблеми є акумулювання електроенергії шляхом використання водню, отриманого за рахунок відновлюваних джерел енергії.

Привабливість водню як універсального енергоносія визначається екологічною чистотою, гнучкістю й ефективністю процесів перетворення енергії з його участю. Технології різномасштабного виробництва водню досить добре освоєні й мають практично необмежену сировинну базу. Однак мала щільність газоподібного водню, низька температура його зрідження, а також висока вибухонебезпечність у поєднанні з негативним впливом на властивості конструкційних матеріалів висувають вимоги до використання економічно і технічно ефективних і безпечних систем його зберігання.

На теперішній час у світі розроблено та впроваджено безліч способів зберігання водню [1]. Деякі з них підходять для малогабаритного мобільного зберігання, інші – для великомасштабного стаціонарного. Але всі ці способи за принципом дії процесів, що відбуваються під час збереження водню, можна поділити на:

- механічні, тобто використання високого тиску для отримання водню у вигляді стиснутого газу або низьких температур, при яких водень переходить у стан криогенної рідини;
- хімічні, тобто використання для зберігання водню хімічних сполук, мінеральних речовин, наноматеріалів,

органічних структур та інших матеріалів, що здатні адсорбувати та вивільняти молекули водню в разі потреби.

Кожен з цих способів має свої недоліки та переваги, але економічні розрахунки доводять, що найдешевшим варіантом зберігання великих об'ємів водню на сьогодні є використання для цього штучно створених порожнин у соленосних покладах (140 євро/МВт-год на 2000 годин зберігання) [2].

Нині існує позитивний досвід підземного зберігання водню в пористих водоносних горизонтах та штучно створених кавернах у покладах кам'яної солі. У табл. 1 наводяться приклади успішної реалізації проєктів створення підземних сховищ водню в соляних покладах, які експлуатуються протягом десятків років. Аналогічний успішний проєкт існує у м. Кіль (Німеччина). Планується створення сховищ водню у країнах Євросоюзу, Великій Британії та Китаї. Всі ці приклади свідчать про можливість тривалого зберігання водню в соляних кавернах.

Більш широко у світі використовуються соляні поклади для створення сховищ природного газу. Так, за даними звіту CEDIGAZ [3], на кінець 2021 року у світі налічувалось 668 підземних сховищ газу, з яких приблизно 15 % були підземними сховищами в соляних кавернах, а решта – у виснажених родовищах вуглеводнів.

Україна має потужну мережу сховищ природного газу, яка за сукупністю технічних показників посідає провідні позиції не тільки в Європі, а й у світі. Сьогодні на балансі АТ «Укртрансгаз», що забезпечує функціонування системи, перебуває 13 підземних сховищ газу. Загальний обсяг підземних сховищ газу в нашій державі складає 62,3 млрд м³, активний об'єм перевищує 32 млрд м³. Два підземні сховища газу створені на базі водоносних структур, решта – на виснажених родовищах вуглеводнів.

Таблиця 1. Відомості щодо існуючих підземних сховищ водню у соляних покладах у світі [2]

Table 1. Information on existing underground hydrogen storages in salt deposits in the world [2]

	Тіссайд (Велика Британія)	Клеменс (США)	Мосс Блафф (США)	Спіндлтоп (США)
Тип покладу	Пластовий	Соляний купол	Соляний купол	Соляний купол
Оператор	Sabir Petroleum	ConocoPhillips	Praxair	Air Liquide
Рік уведення в експлуатацію	1972	1983	2007	2017
Об'єм, м ³	210 000 (3×70 000)	580 000	566 000	906 000
Середня глибина каверни, м	365	1000	1200	1340
Діапазон тиску, бар	45	70–137	55–152	68–202
Чиста накопичена енергія, ГВт-год	27	81	123	274
Можлива робоча газова потужність Н ₂ , 10 ³ т	0,83	2,56	3,72	н. в.

Зазначимо, що використання виснажених родовищ вуглеводнів для створення сховищ водню є менш перспективним через непередбачуваність реакції залишкового природного газу з воднем за рахунок невизначеності їх пропорцій. Крім того, середня вартість сховища, створеного у соляній каверні, значно нижча за вартість аналогічного сховища, що побудоване на основі виснаженого родовища природного газу (відповідно в 1,7 і 3,5 доларів США на 1 ГДж) [4–6].

Тому розробка методів виробництва водню за рахунок сонячних і вітрових джерел енергії з подальшим його акумулюванням в покладах кам'яної солі є дуже актуальним і перспективним напрямом відновлюваної енергетики.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є обґрунтування енергоефективного методу акумулювання водню в

покладах кам'яної солі на підставі аналізу геолого-гідрологічних умов соленосних формацій України.

Постановка завдання. Для вирішення поставленої мети проаналізуємо поточний стан ресурсної бази щодо можливості створення сховищ водню в покладах кам'яної солі, а саме в покладах калійних, калійно-магнієвих та кухонних солей, які є найпридатнішими для побудови сховищ водню.

На території України розташовано п'ять соленосних басейнів, в межах яких існують соленосні поклади, а саме: Дніпровсько-Донецький, Донецький, Закарпатський, Передкарпатський і Переддобруджинський [7]. Карта розміщення цих басейнів наведена на рис. 1. Основні узагальнені характеристики соленосних покладів наведено в табл. 2.

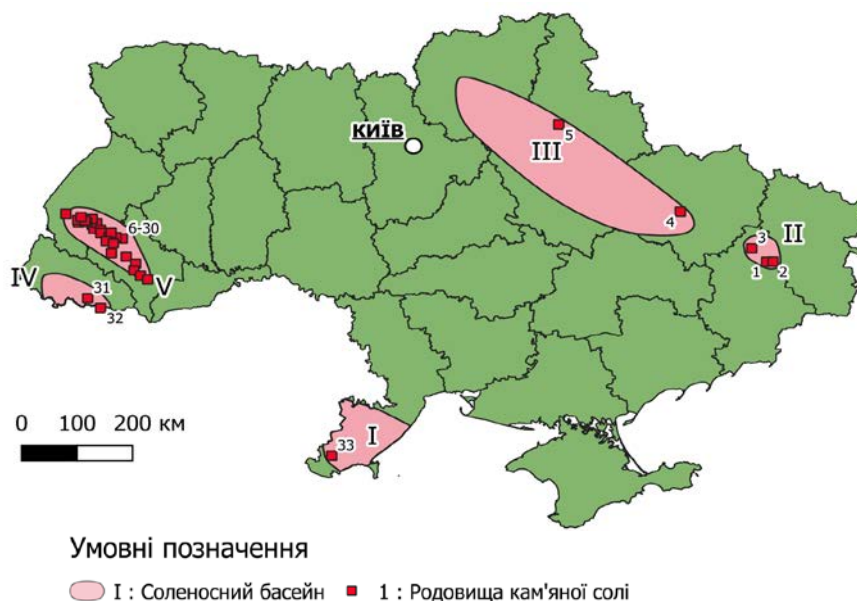


Рис. 1. Карта соленосних басейнів України та родовищ викопної солі

Fig. 1. Map of saline basins of Ukraine and deposits of fossil salt

Таблиця 2. Характеристика соленосних басейнів України [7]

Table 2. Characteristics of saline basins in Ukraine [7]

Назва	Площа, тис. км ²	Глибина залягання, м	Товщина комплексу, м	Тип структури	Геол. вік	Примітка
1. Дніпровсько-Донецький	50	3000	1600	штоки, купола	девон, перм	перешарування з ангідритом, доломітом, пісковиками
2. Донецький	6	600	250–900	пласти, купола	перм	
3. Переддобруджинський	10	300–500	30–70	пласти	юра	тонкі прошарки ангідриту
4. Закарпатський	7	1500	до 500	пласти, штоки	неоген	
5. Передкарпатський	15	60–700	до 150	пласти, лінзи	неоген	складні структури, поклади невитримані, карст

За своїми геолого-структурними особливостями та гірничо-технічними умовами найпридатнішими для створення газових сховищ є соляні поклади, що розташовані у Чернігівській, Харківській та Полтавській областях, де потужність штоків іноді досягає 2–3,5 км. Перспективними також можуть бути соляні поклади в межах Ізмайльського та Кілійського районів Одеської області (Переддобруджинський соляний басейн), де потужність пластів коливається від 30 до 60 м, а глибина залягання змінюється від 300 до 700 м. Кам'яна сіль за складом чиста й придатна для спорудження сховищ.

Передкарпатські соляні поклади характеризуються дуже складними умовами залягання, крутими складками, численними блоками, різкою зміною потужностей. Солі часто бувають роздробленими та високопроникними, містять значний відсоток нерозчинного залишку, який іноді перевищує 17–34 %. Такі характеристики ускладнюють будівництво підземних сховищ у цьому басейні й вимагають більш ретельного проведення геологорозвідувальних робіт.

У межах Закарпатського басейну соляні товщі мають витриманіший пластовий характер, їх потужність досягає 100 м, хоча трапляються штокові й діапірові структури. Основною проблемою цього району є інтенсивно розвинений поверхневий та глибинний соляний карст.

На сьогодні в межах соленосних басейнів відомо про існування 33 родовищ викопної солі (див. рис. 1 і табл. 3). З них на державному балансі корисних копалин України станом на 01.01.2020 перебувало 10 родовищ кухонної солі (6 перебували у розробці) та 13 родовищ калійної й калійно-магнієвої солі (2 родовища розроблялися) [7].

Як видно з рис. 1, переважна частина родовищ розташована в Закарпатському та Передкарпатському соленосних басейнах, хоча найвагоміші з них – у Донецькому басейні. Зазначимо, що пошук і оцінка запасів цих родовищ проводилася дуже давно (для більшості родовищ Передкарпаття у 1949–1968 роках), пошук нових родовищ практично не здійснювався, переоцінка запасів розвіданих родовищ не проводилась.

Внаслідок тривалого видобутку, природних катаклізмів (повені, зсуви), використання застарілих технологій та браку коштів на якісний моніторинг і реконструкцію рудників деякі родовища виведені з експлуатації й перебувають у стадії ліквідації чи консервації, зокрема Калуш-Голицьке, Ново-Карфагенське, Бориславське, Солотвинське та Стебницьке родовища. Якісна професійна ліквідація передбачає проведення детального вивчення технічного і гідрогеологічного стану родовища та усунення причин, що викликали негативні зміни природного середовища (деформація денної поверхні, затоплення рудників, підземні обвали, забруднення ґрунтових вод і поверхневих водоймищ). На цьому етапі було б доцільно провести дослідження можливості збереження виробленого простору рудника та перепрофілювання його у підземне сховище [8].

Проблемам, що пов'язані зі спорудженням підземних сховищ у соляних покладах, присвячено багато вітчизняних та зарубіжних робіт, в яких визначено критерії вибору ділянок для будівництва [9–14]. Показано, що вибір ділянки має ґрунтуватися на результатах детального й ретельного вивчення геолого-структурних особливостей родовища, фізико-механічних, літологічних, реологічних властивостей та характеристик міцності соленосних порід, має бути виконаний прогноз зміни властивостей при тривалому контакті цих порід з воднем. Окремо досліджують гідрогеологічні особливості родовища, визначають наявність у його межах водоносних горизонтів, параметри горизонтів та ізолювальних водоупорів, геотермічний режим підземних вод, гідравлічний зв'язок між водоносними горизонтами й поверхневими водами. Особливу увагу слід приділяти умовам карстоутворення, агресивності підземних вод. За результатами досліджень визначають спосіб спорудження підземних ємностей сховища. Існують такі способи спорудження сховищ: розмив соляних товщ (вилуговування), за допомогою вибухів або з використанням шахтних конвеєрів [9]. Зауважимо, що зараз в Україні найчастіше використовується перший спосіб, хоча він не завжди найкращий.

Крім цього, для вирішення питання про можливість та доцільність будівництва на певному родовищі кам'яної солі підземного сховища збирають і вивчають відомості про близькість до діючих джерел електричної енергії (сонячних і вітрових електростанцій), транспортні умови, джерела водопостачання з метою отримання водню, можливості забору прісної води для розмиву, а також визначають способи утилізації розсолу. У світовій практиці є варіанти скидання розсолу в море, оскільки розсоли за своїм мінеральним складом близькі до морських.

Як бачимо, вибір місця спорудження сховища дуже відповідальна і кропітка процедура, яка складається з багатьох етапів і яку повинні виконувати спеціалісти.

Матеріал і результати досліджень. Демонстрацію запропонованого методу видобування й акумулювання водню в покладах кам'яної солі виконаємо на основі умовного підземного сховища, розмір якого визначається конкретними умовами під час проектування.

Пропонується отримання водню шляхом електролізу води за допомогою електролізерів, що розташовані безпосередньо на території підземного сховища, за рахунок електричної енергії, яку вироблятимуть ВЕС та СЕС, та закачування його з метою зберігання в соляному покладі.

Для одержання кілограму водню таким шляхом необхідно витратити приблизно 50 кВт·год електроенергії. Електроживлення електролізерів відбувається за допомогою існуючих електричних мереж.

Принципова технологічна схема установки для видобування та акумулювання водню у соляних покладах наведена на рис. 2. За даними технічного опису на електролізні установки з виробітку водню (марки HySTATr-A серії

1000 компанії HYDROGENICS EUROPE N.V.), потреба води для здійснення електролізу становить $1,5 \text{ л/нм}^3 \text{ H}_2$. Ця установка комплектується системами підготовки води та осушення водню й кисню.

Згідно зі схемою підземна вода із видобувної свердловини через систему підготовки її до необхідної кондиції надходить в електролізери. Водень, який отримано електролізером, подається в систему осушування, після чого спрямовується на компресор, який забезпечує тиск, що дорівнює гідравлічному тиску на глибині розташування соляної каверни. З компресора водень надходить у

теплообмінник типу газ-вода, де охолоджується шляхом теплообміну з ґрунтовою водою, яка поступає із видобувної свердловини і закачується в нагнітальну свердловину за допомогою нагнітального насоса. Охолоджений водень надходить у підземну соляну каверну, де зберігається протягом заданого часу. В разі потреби відбувається відбір водню через свердловину споживачем.

Постачання води для роботи електролізера відбувається шляхом використання приповерхневих підземних вод, які використовують також для охолодження водню перед його закачуванням у соляну каверну.

Таблиця 3. Родовища кам'яної солі

Table 3. Rock salt deposits

Назва родовища	Тип родовища	Ступінь експлуатації	Розміщення
1. Артемівське	натрієве	розроблялось	Донецька область
2. Ново-Карфагенське	натрієве	розроблялось	Донецька область
3. Слов'янське	натрієве	розроблялось	Донецька область
4. Єфремівське	натрієве	розроблялось	Харківська область
5. Роменське	натрієве	не розробляється	Сумська область
6. Калуш-Голинське	калійно-магнієве	у стані ліквідації	Івано-Франківська область
7. Блажівське	калійно-магнієве	пошукові роботи	Львівська область
8. Бориславське	калійно-магнієве	не розробляється	Львівська область
9. Стебницьке	калійно-магнієве	у стані ліквідації	Львівська область
10. Уличнянське	калійно-магнієве	не розробляється	Львівська область
11. Довголука-Гірне	калійно-магнієве	не розробляється	Львівська область
12. Попелі	калійно-магнієве	не розробляється	Львівська область
13. Марково-Розсіллянське	калійно-магнієве	не розробляється	Івано-Франківська область
14. Надвірнянське	калійно-магнієве	не розробляється	Івано-Франківська область
15. Делятинське	калійно-магнієве	не розробляється	Івано-Франківська область
16. Ославське	калійно-магнієве	не розробляється	Івано-Франківська область
17. Нижній Березів Вижницьке	калійно-магнієве	не розробляється	Івано-Франківська область
18. Нежухівське	калійно-магнієве	не розробляється	Львівська область
19. Моршинське	калійно-магнієве	не розробляється	Львівська область
20. Лисовичі	калійно-магнієве	не розробляється	Львівська область
21. Болохівське	калійно-магнієве	розробку припинено	Івано-Франківська область
22. Тростянецьке	калійно-магнієве	не розробляється	Івано-Франківська область
23. Кадобнянське	калійно-магнієве	не розробляється	Івано-Франківська область
24. Велика Тур'я	калійно-магнієве	не розробляється	Івано-Франківська область
25. Верхньо-Струтинське	калійно-магнієве	не розробляється	Івано-Франківська область
26. Губицьке	калійно-магнієве	розробляється	Львівська область
27. Стебницьке	калійно-магнієве	розробку припинено	Івано-Франківська область
28. Долинське	натрієве	розробку припинено	Івано-Франківська область
29. Дрогобицьке	натрієвокалійно-магнієве	розробляється	Львівська область
30. Рошнятинське	калійно-магнієве	не розробляється	Івано-Франківська область
31. Терелянське	натрієве	розробку розпочато	Закарпатська область
32. Солотвинське	натрієве	розробляється	Закарпатська область
33. Ізмаїльське	натрієве	розвідане	Одеська область

Для споживання водню можуть бути використані спеціальні ємності, або водень може направлятися в трубопровідну газову мережу.

Згідно з технологічною схемою, наведеною на рис. 2, процес закачування в підземне сховище газу здійснюється шляхом використання компресора, який підвищує тиск і забезпечує подачу водню в соляні поклади під тиском 8,0 МПа. Цей агрегат може бути виготовлено на базі типового агрегату ГПА-Ц-16, який забезпечує тиск 7,5 МПа.

Основною проблемою при створенні сховищ водню в соляних покладах є збільшення температури водню на виході з компресора. Оцінити величину температури на виході з компресора можна за відомою залежністю адіабатичного стиснення [15].

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_n}{P_H} \right)^{\frac{K-1}{K}},$$

де T_1 , T_2 – відповідно початкова температура водню й температура водню у стисненому стані (°K);

P_n , P_H – відповідно тиск водню на вході в компресор та виході з нього (МПа);

K – показник адіабати, який дорівнює 1,40.

Якщо прийняти, що початкова температура водню дорівнює 10 °С, тоді при восьмикратному стисненні водню (від 1 до 8 МПа) температура на виході з компресора буде становити 244 °С. Така температура водню, що закачується у сховище, суттєво відрізняється від початкової температури соляного покладу і може створити проблеми з герметичністю і екологічними вимогами до сховища водню в соляних покладах. Тому температуру водню на

виході з компресора пропонується зменшувати за допомогою поверхневих (або ґрунтових) вод.

Висновки. Економічний аналіз світового досвіду із створення сховищ водню вказує на те, що найдешевшим способом його зберігання є використання для цієї мети штучних пустот та каверн у покладах кам'яної солі. Україна володіє достатньою ресурсною базою для цього способу збереження водню. На території України існує п'ять соленосних басейнів, а розвідані запаси кам'яної солі перевищують 2,3 млрд т. Однак соленосні басейни досліджені нерівномірно, а ступінь вивченості окремих соленосних басейнів недостатній. Запропоновано варіант отримання водню за рахунок електричної енергії, яку вироблятимуть ВЕС та СЕС, та охолодження його перед закачуванням з метою зберігання в соляному покладі. Проблему зменшення температури водню на виході з компресора пропонується вирішувати за допомогою поверхневих (або ґрунтових) вод. Для визначення оптимальних параметрів створення і експлуатації соляних покладів щодо зберігання водню необхідні додаткові дослідження.

Подяка. Автори вдячні науковому співробітнику відділу геотермальної енергетики, канд. техн. наук О. В. Лисаку за допомогу з графічним оформленням рис. 1.

ПОСИЛАННЯ

1. Zhou L. Progress and problems in hydrogen storage methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2005. № 9 (4). Pp. 395–408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.005>
2. Małachowska A., Łukasik N., Mioduska J., Gębicki J. Hydrogen storage in geological formations – The Potential of salt caverns. *Energie*. 2022. 15 (14), 5038; <https://doi.org/10.3390/en15145038>

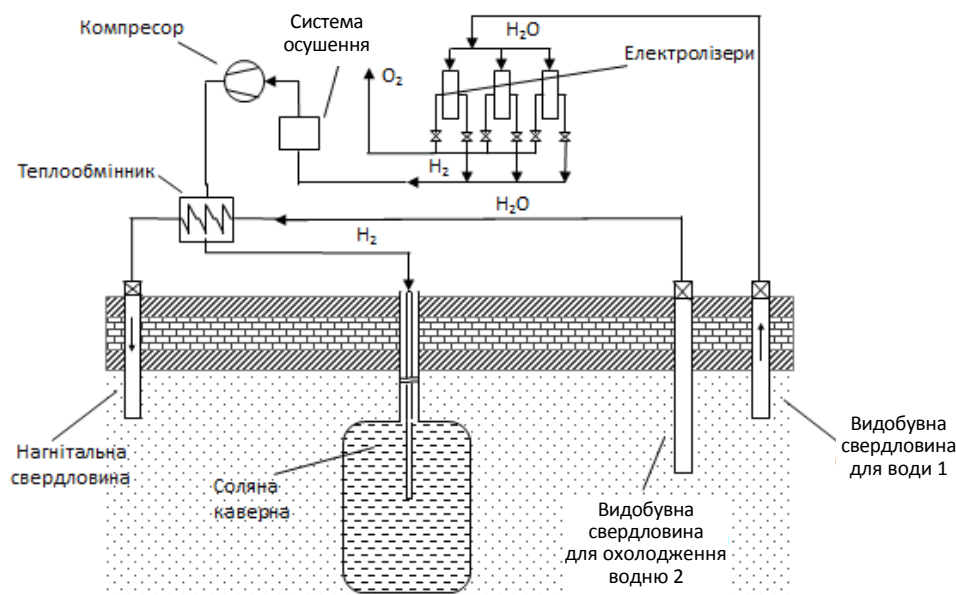


Рис. 2. Схема підземного сховища газу з використанням соляних покладів
Fig. 2. Scheme of underground gas storage using salt deposits

3. Cedigaz Underground Gas Storage in the World – 2020 Status. Available online: <https://www.cedigaz.org/underground-gas-storage-in-the-world-2020-status/>
4. Taylor J. B., Alderson J. E. A., Kalyman K. M., Lyle A. B., and Phillips L. A. Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen Int J. Hydrogen Energy, 11 (1986). Pp. 5–22.
5. Stone H. B. J., Veldhuis I., and Richardson R. N. An Investigation into Large-Scale Hydrogen Storage in the UK. Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2005. Istanbul. Turkey, 13–15 July 2005.
6. Nasiru Salahu Muhammed, Bashirul Haq, Dhafer Al Shehri, Amir Al-Ahmed, Mohammed Mizanur Rahman, Ehsan Zaman. A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook. *Energy Reports*. Vol. 8. November 2022. Pp. 461–499. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721014414#tbl1>
7. Мінеральні ресурси України: щорічник. Державне науково виробниче підприємство «Геоінформ України». 2020. <https://geoinf.kiev.ua/publikatsiyi/shchorichnyky/>
8. Барях А. А., Евсеев А. В. Ликвидация калийных рудников и соляных шахт: обзор и анализ проблемы. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 9. С. 5–29. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29>.
9. Нагорный В. П., Глоба В. М. Сооружение и эксплуатация подземных хранилищ углеводородов в отложениях каменной соли: монография / заг. ред. В. П. Нагорного. К.: Эссе. 2019. 176 с.
10. Нагорный В. П., Денисюк І. І. Інтенсифікація спорудження підземних сховищ у відкладаннях кам'яної солі. *Вісник НАН України*. 2014. С. 54–59. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/69822/08-Nagorny.pdf?sequence=1>
11. Литологические критерии оценки участков и перспективы строительства подземных сооружений различного целевого назначения в соляных толщах: Ин-т геол. наук АН УРСР. 1989. 46 с. (Препринт. АН УРСР. Ин-т геол. наук АН УРСР).
12. Шехунова С. Б. Особливості літогенезу соленосних формацій та проблеми їх використання: автореф. дис. ... д-ра. геол. наук, ІГН НАН України. Київ. 2011. 43 с.
13. Лобасов О. П., Сюмар Н. П., Шехунова С. Б. Побудова та аналіз літологічної моделі нижньопермської соленосної формації Дніпровсько-Донецької западини за даними ГІС. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2010. Вип. 3. С. 294–305. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/59461>
14. Болобан В. М. Умови формування та методи дослідження соляного карсту у зв'язку з використанням соляних масивів для підземного будівництва. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2009. Вип. 2. С. 20–28. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/13506>
15. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1971. 784 с.

REFERENCES

1. Mineralni resursy Ukrainy: shchorichnyk. Derzhavne naukovy vyrobnyche pidpriemstvo «Heoinform Ukrainy», 2020.
2. Zhou L. Progress and problems in hydrogen storage methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2005. № 9 (4). P. 395–408. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.005>
3. Cedigaz Underground Gas Storage in the World – 2020 Status. Available online: <https://www.cedigaz.org/underground-gas-storage-in-the-world-2020-status/>
4. Taylor J. B., Alderson J. E. A., Kalyman K. M., Lyle A. B., and Phillips L. A. Technical and economic assessment of methods for the storage of large quantities of hydrogen Int J. Hydrogen Energy. 11. (1986). Pp. 5–22.
5. Stone H. B. J., Veldhuis I., and Richardson R. N. An Investigation into Large-Scale Hydrogen Storage in the UK. Proceedings International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2005. Istanbul. Turkey. 13–15 July 2005.
6. Malachowska A., Lukasik N., Mioduska J., Gębicki J. Hydrogen storage in geological formations – The Potential of salt caverns. *Energies*. 2022. 15 (14), 5038; <https://doi.org/10.3390/en15145038>
7. Bariakh A. A., Evseev A. V. Lykvydatsiya kalyinikh rudnykov y solianikh shakht: obzor i analiz problemy. *Horniy ynformatsyonno-analytycheskyi biulleten*. 2019. № 9. S. 5–29. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-5-29>.
8. Nahorni V. P., Hloba V. M. Sooruzhenye y ekspluatatsiya podzemnykh khranylyshch uhlevodorodov v otlozheniyakh kamennoi soly: monohrafiia / zah. red. V.P. Nahornoho. K.: Esse. 2019. 176 s.
9. Nahorny V. P., Denysiuk I. I. Intensyfikatsiia sporudzhennia pidzemnykh skhovyshch u vidkladaniakh kamianoi soli. *Visnyk NAN Ukrainy*. 2014. S. 54–59. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/69822/08-Nagorny.pdf?sequence=1>
10. Lytolohycheskye krytery y otsenky uchastkov y perspektyvi stroytelstva podzemnykh sooruzheniy razlychnoho tselevoho naznacheniya v solianikh tolshchakh: Yn-t heol. nauk AN URSR. 1989. 46 s. (Preprynt. AN URSR. Yn-t heol. nauk AN URSR).

11. Shekhunova S. B. Osoblyvosti litohenezu solenosnykh formatsii ta problemy yikh vykorystannia: avtoref. dys. ... d-ra. heol. nauk, IHN NAN Ukrainy. Kyiv. 2011. 43 s.
<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/13506>
12. Lobasov O. P., Siumar N. P., Shekhunova S. B. Pobudova ta analiz litolohichnoi modeli nyzhnopermskoi solenosnoi formatsii Dniprovsko-Donetskoi zapadyny zasobamy HIS. Zbirnyk naukovykh prats Instytutu heolohichnykh nauk NAN Ukrainy. 2010. Vyp. 3. S. 294–305.
<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/59461>
13. Boloban V.M. Umovy formuvannia ta metody doslidzhennia solianoho karstu u zviazku z vykorystanniam solianykh masyviv dlia pidzemnoho budivnytstva. Zbirnyk naukovykh prats Instytutu heolohichnykh nauk NAN Ukrainy. 2009. Vyp. 2. S. 20–28.
14. Nasiru Salahu Muhammed, Bashirul Haq, Dhafer Al Shehri, Amir Al-Ahmed, Mohammed Mizanur Rahman, Ehsan Zaman. A review on underground hydrogen storage: Insight into geological sites, influencing factors and future outlook. Energy Reports. Vol. 8. November 2022. P. 461–499.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721014414#tbl1>
15. Kasatkyn A.H. Osnovny protsessy y apparaty khymycheskoy tekhnolohyy. M.: Khymyia, 1971. 784 s.