

**НАГОРНИЙ**  
**Володимир Петрович** —  
доктор технічних наук,  
професор, академік Української  
нафтогазової академії,  
завідувач відділу інтенсифікації  
обмінних процесів Відділення  
геодинаміки вибуху Інституту  
геофізики ім. С.І. Субботіна  
НАН України,  
vgv\_nagorny@ukr.net

**ДЕНИСЮК**  
**Іван Іванович** —  
кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
Відділення геодинаміки вибуху  
Інституту геофізики  
ім. С.І. Субботіна НАН України,  
vgv\_igf@ukr.net

УДК 622.235+622.691

## **ІНТЕНСИФІКАЦІЯ СПОРУДЖЕННЯ ПІДЗЕМНИХ СХОВИЩ У ВІДКЛАДАХ КАМ'ЯНОЇ СОЛІ**

*Запропоновано імпульсний метод інтенсифікації спорудження підземних сховищ у кам'яній солі, в тому числі у складних гірсько-геологічних умовах. Наведено експериментальні результати з розуцілювання структури кам'яної солі в процесі нерівномірного динамічного навантаження. Розроблено методи руйнування відкладів нерозчинних гірських порід, що ускладнюють процес розмивання ємкості. Наведено результати промислових випробувань запропонованих технологій, що свідчать про їх високу ефективність.*

**Ключові слова:** експеримент, імпульс, інтенсифікація, кам'яна сіль, підземне сховище, пласт, розмивання, технологія.

### **Вступ**

На території України є п'ять соленосних басейнів: Дніпровсько-Донецький, Донецький, Закарпатський, Передкарпатський і Переддобруджинський. Дніпровсько-Донецький і Донецький басейни характеризуються значним поширенням соляних відкладів, потужність куполів і штоків яких сягає 2,0–3,5 км і є достатньою для спорудження підземних сховищ для продуктів різного виду. Причому об'єми сховищ не лімітуються геологічними умовами.

Кам'яна сіль Закарпатського соленосного басейну має пластовий характер за потужності шару до 100 м. У межах басейну можуть бути створені підземні сховища, проте вибір ділянки спорудження має здійснюватися на основі ретельних геологорозвідувальних робіт, оскільки в цьому басейні є інтенсивно розвинений поверхневий і глибинний соляний карст.

На площі Прикарпатського соленосного басейну умови залягання солей досить складні: круті складки, численні блоки. Вміст нерозчинних відкладів гірських порід становить 7–14% і більше. Будівництво підземних сховищ у цьому басейні можливе лише після ретельних геологорозвідувальних робіт.

Переддобруджинська соленосна площа розташована в межах Ізмаїльського і Кілійського районів Одеської області. Кам'яна

сіль за складом чиста і придатна для спорудження сховищ з об'ємами окремих ємкостей до 75,0 тис. м<sup>3</sup>.

Отже, Україна має достатню кількість соленосних басейнів, геологічні та гірничотехнічні умови яких дозволяють споруджувати в цих районах підземні сховища різних типів, у тому числі й великі (об'ємом понад 100 тис. м<sup>3</sup>) [1].

### Методи інтенсифікації розчинення кам'яної солі

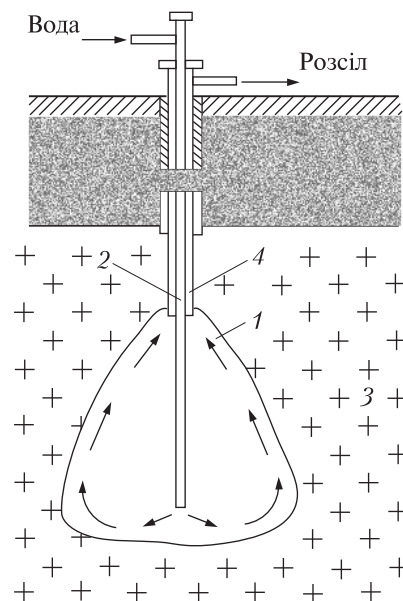
Можливість розроблення пластів кам'яної солі на великих глибинах і незначний обсяг підготовчих робіт сприяли розвитку методів спорудження підземних сховищ у кам'яній солі розмиванням через бурові свердловини (див. рис.). Проте традиційна технологія спорудження підземних сховищ, пов'язана з розмиванням кам'яної солі, має вагомні недоліки. Перший з них — початкова стадія розмивання відбувається з видаванням на поверхню розсолу малої концентрації (всього 20–45 г/л за граничної концентрації 310 г/л). Другий істотний недолік — відсутність активних заходів з обвалення нерозчинних міцних гірських порід (вапняків, пісковиків, ангідритів, аргілітів), які, екрануючи поверхню розмивання, суттєво знижують ефективність робіт зі спорудження ємкостей. Усе це потребує розроблення ефективних методів підготовки соляного масиву до початку технологічного процесу розмивання.

Аналіз традиційних способів інтенсифікації розчинення кам'яної солі (магнітне оброблення і підвищення температури води, використання поверхнево-активних речовин, застосування генераторів пружних імпульсів, створення штучної турбулізації в камері розмивання) свідчить про те, що вони неекономічні, а деякі з них потребують використання дорогого устаткування. Водночас динамічні методи дії на кам'яну сіль є перспективними і дозволяють не лише різко скоротити витрати часу на виконання технологічних операцій, обмежити використання складного і дорогого устаткування, а й значно підвищити ефективність розмивних робіт. Особливе місце серед

таких методів посідає використання енергії вибуху.

Перші спроби інтенсифікації розчинення солей на фізичній основі, зумовленій руйнівною дією вибуху, виявилися безуспішними. Застосування кумулятивних перфораторів ПКС-105 і фугасних торпед дає певне підвищення швидкості розмивання ємкості від 4,0 до 8,5 м<sup>3</sup>/год при збільшенні подавання розчинника в 1,5 раза [2]. Проте цей ефект нетривалий. Тому розроблення методів вибухового оброблення соляного масиву має ґрунтуватися на якісно іншій фізичній основі розуцільнення і знеміцнення як сольових, так і несольових порід для ефективного проведення розмивних робіт.

Установлено, що розвиток деформаційного процесу і подальшого розуцільнення структури гірських порід залежить не лише від їх вихідного фізичного стану, а й значною мірою від виду нерівномірності навантаження, що характеризується параметром  $\zeta = \sigma_3/\sigma_1$ , де  $\sigma_3$  і  $\sigma_1$  — найменше і найбільше головні напруження [3].



Розмивання кам'яної солі в процесі спорудження підземного сховища: 1 — ємкість розмивання; 2 — колона для подавання води; 3 — кам'яна сіль; 4 — колона для підймання розсолу на поверхню

## Запропоновані технології

В Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України розроблено експериментальний комплекс для вивчення поведінки гірських порід при нерівномірному динамічному навантаженні. Результати експериментальних досліджень деформації зразків кам'яної солі викладено в роботах [3, 4]. Фізико-механічні властивості досліджених зразків кам'яної солі наведено в табл. 1.

Встановлено, що нерівномірне динамічне навантаження кам'яної солі з показником  $\zeta = 0,3$  супроводжується ущільненням її структури. Зі збільшенням нерівномірності навантаження, вже при  $\zeta = 0,26$  спостерігається стійкий деформаційний процес розущільнення структури солі, що виявляється у збільшенні об'ємної деформації зразків. Отже, змінюючи нерівномірність напруженого стану, можна досягати зміни деформаційних характеристик кам'яної солі, що дає можливість ефективно керувати підготовкою соляного масиву до технологічного процесу розмивання ємкостей.

Уперше про необхідність вирішення проблеми руйнування і обвалення нерозчинних відкладів у процесі розмивання ємкостей у кам'яній солі йшлося в роботі О.М. Іванцова [5]. На підставі теоретичних досліджень і дослідно-промислових випробувань у роботі [6] запропоновано методи розрахунку потужності прошарків у разі їх самообвалення, а також методи керованого примусового обвалення під час спорудження ємкості.

Таблиця 1. Фізико-механічні властивості зразків кам'яної солі

Параметр	Значення
Густина $\rho$ ( $\times 10^3$ ), кг/м <sup>3</sup>	2,10–2,20
Швидкість поздовжніх хвиль $v_p$ ( $\times 10^3$ ), м/с	2,34–2,95
Коефіцієнт Пуассона $\nu$	0,22–0,30
Міцність на одновісне стискання $\sigma_0$ ( $\times 10^5$ ), Па	160–210
Модуль Юнга $E$ ( $\times 10^{10}$ ), Па	1,15–1,91

Для вирішення завдань моделювання напружено-деформованого стану та обвалення на моделях нерозчинних пластів в Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України розроблено стенд, що складається з випробувальної камери, системи контрольно-виміральної та реєструвальної апаратури, набору засобів градування та гідронасоса [7]. На стенді проведено дослідження напружено-деформованого стану різних за потужністю і фізико-механічними властивостями моделей нерозчинних пластів під дією статичних та імпульсних навантажень. Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що відмінність величин теоретичних напружень від експериментальних даних не перевищує 10%.

На основі проведених теоретичних, експериментальних і промислових досліджень розроблено методи і технології обвалення нерозчинних пластів у складних гірсько-геологічних умовах розмивання ємкостей у кам'яних солях [8]. Розроблені методи розподілено на три групи.

До першої групи відносять методи, що ґрунтуються на самообваленні нерозчинних пластів. Головна ідея таких методів полягає в тому, що пласт обвалюється під дією власної ваги. Основним недоліком цієї групи методів є те, що при неконтрольованому самообваленні пласта можливе обривання технологічних колон.

До другої групи належать методи обвалення пластів статичним навантаженням. Простим видом такого навантаження є гідростатичний тиск стовпа рідини на пласт, вага якого забезпечить потрібне навантаження. Слід взяти до уваги обмеженість можливостей методу, пов'язану з тим, що споруджувана ємкість не завжди може вміщати необхідну кількість рідини для забезпечення виконання умови обвалення пласта.

Найбільш перспективними є методи третьої групи – керованого обвалення нерозчинних пластів під дією імпульсних навантажень. Їх поділяють на два класи. Перший клас ґрунтується на розущільненні породи пласта для досягнення умов його самообвалення, другий пов'язаний з обваленням нерозчинних пластів.

Якщо методи першого класу використовують до початку, а в разі потреби й у процесі виконання робіт з розмивання ємкості, то методи другого класу застосовують лише за наявності оголення пласта у процесі її розмивання.

Різноманітність гірсько-геологічних умов будівництва і технічних можливостей підприємств зумовлює вибір того чи іншого методу. Рішення про застосування вибраного методу в кожному конкретному випадку приймають технічна рада підприємства і виконавець робіт. Безпосереднім виконавцем робіт є спеціалізована геофізична партія, яка має всі необхідні засоби — підйомники, геофізичні прилади, вибухові речовини і т. ін.

Промислові дослідження ефективності вибухового оброблення соляного масиву для прискорення початкової стадії розчинення солей проводили за таких вихідних даних. Соляний масив був представлений світло-сірою і темно-сірою сіллю, дрібно- і середньозернистою. Властивості солей: модуль Юнга  $E = 3,13 \cdot 10^{10}$  Па, міцність на одновісне стискання  $\sigma_0 = 164 \cdot 10^5$  Па, коефіцієнт Пуассона  $\nu = 0,264$ , кут внутрішнього тертя  $\phi = 31^\circ$ , величина зчеплення  $C = 4,8 \cdot 10^5$  Па. Застосовували два заряди вибухової речовини (гексогену) масою 4,85 кг кожен. При цьому інтервал уповільнення  $\Delta t$  між вибухами зарядів становив  $7,72 \cdot 10^{-4}$  с, що забезпечувало створення нерівномірності навантаження соляного масиву з показником  $\zeta = 0,1$ . Для забезпечення необхідного уповільнення використовували відрізок детонувального шнура завдовжки 5,0 м.

Результати проведених робіт оцінювали за концентрацією розсолу, що видавався на поверхню в процесі розмивання ємкості. Виконаний комплекс робіт зі створення штучної тріщинуватості в білясвердловинній ділянці соляного масиву забезпечив інтенсифікацію процесу розмивання. Так, початкова концентрація розсолу становила 42,7 г/л з подальшим підвищенням її до 190 г/л наприкінці 2-го місяця і 275 г/л наприкінці 3-го місяця, тоді як у традиційному розмиванні без попереднього вибухового оброблення соляного масиву значення концентрації становлять 87 і 137 кг/м<sup>3</sup>

відповідно. Отже, розущільнення структури кам'яної солі в процесі її вибухового оброблення до початку розмивання значно прискорює початкову стадію розчинення солі та спорудження підземних сховищ.

Випробування рекомендацій у складних гірсько-геологічних умовах за наявності в контурі розмивання нерозчинних відкладів гірських порід проводили на свердловині, закладеній для спорудження підземних сховищ методом розмивання. У процесі спорудження сховища нерозчинні відклади ангідриту і аргіліту істотно знизили швидкість розмивання, у зв'язку з чим постала необхідність проведення вибухових робіт з метою їх руйнування. Нерозчинні відклади мали такі характеристики: ангідрит —  $E = 1,32 \cdot 10^{10}$  Па,  $\sigma_0 = 350 \cdot 10^5$  Па,  $\rho = 2610$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 0,26$ ; аргіліт —  $E = 1,24 \cdot 10^{10}$  Па,  $\sigma_0 = 320 \cdot 10^5$  Па,  $\rho = 2540$  кг/м<sup>3</sup>,  $\nu = 0,28$ .

Для знеміцнення нерозчинних відкладів застосовували вибухові пристрої, що склалися з двох рівновеликих зарядів масою 4,3 кг кожен. Час уповільнення підривання зарядів один відносно одного становив  $4,5 \cdot 10^{-4}$  с і реалізувався відрізком детонувального шнура завдовжки 3,0 м, що забезпечувало нерівномірне

Таблиця 2. Показники розмивання ємкості

Показник	Традиційна технологія	Запропонована технологія
Об'єм камери розмивання в зоні дії вибуху, тис. м <sup>3</sup>	—	17,2
Фактична подача розчинника (води), м <sup>3</sup> /год	61,7–64,5	33,3–38,9
Концентрація розсолу, г/л	74,2–129,8	197,5–275,0
Швидкість розмивання, м <sup>3</sup> /год	2,1–3,5	5,5–7,5
Тривалість розмивання, доба	666	461
Скорочення чистого часу розмивання, доба	—	205
Витрата розчинника, м <sup>3</sup>	487 000	170 000
Економія розчинника, м <sup>3</sup>	—	317 000
Економія електроенергії, млн кВт·год	—	3,78

навантаження нерозчинних відкладів з показником  $\zeta = 0,1$ . Вибухові роботи проводили на глибинах 965–980 м. У результаті виконаних робіт концентрація розсолу одразу підвищилася в 10 разів і досягла майже граничного значення (250–310 г/л), залишаючись на такому рівні протягом усього наступного періоду розмивання, що значно підвищило ефективність розмивання ємкості. Нерозчинні відклади в процесі розмивання самообвалилися, що дало змогу сформувати підземне сховище проектного об'єму [9].

Технологічні показники розмивання ємкості об'ємом 100 тис. м<sup>3</sup> із застосуванням технології вибухового оброблення соляного масиву для створення штучної тріщинуватості порівняно з традиційною технологією розмивання наведено в табл. 2 [10].

## Висновки

У результаті виконаних робіт з інтенсифікації спорудження підземних сховищ у відкладах кам'яної солі методом розмивання встановлено:

- у процесі спорудження підземних сховищ у кам'яній солі до початку виконання робіт із розмивання ємкості в зоні гідроврубу і частково 1-го ступеня розмивання доцільне виконання вибухових робіт, спрямованих на попереднє розущільнення структури солі. Це дає змогу збільшити швидкість розмивання ємкості у його найбільш трудомісткій початковій стадії;
- у складних гірсько-геологічних умовах спорудження сховищ за наявності нерозчинних відкладів гірських порід здійснення вибухових робіт з розущільнення відкладів створює умови для їх самообвалення і дозволяє отримувати камери проектних об'ємів;
- завдяки простоті практичної реалізації застосування вибухових методів інтенсифікації спорудження підземних сховищ у відкладах кам'яної солі, заснованих на знеміцненні та розущільненні структури солей і супутніх нерозчинних відкладів, забезпечує значне скорочення термінів будівництва, зменшення витрат матеріалів, економію електроенергії, що сприяє підвищенню техніко-економічних показників споруджуваних підземних сховищ.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Краткая объяснительная записка к карте соленосных площадей, пригодных для сооружения подземных хранилищ. — К.: Ин-т Союзгазпроект, 1983. — 20 с.
2. Давыдов В.М., Дубровский Л.К., Нечаев Ю.А. Опыт строительства подземных емкостей в каменных солях // Взрывные работы в геотехнологии. — К.: Наук. думка, 1991. — С. 87–93.
3. Михалюк А.В. Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов. — К.: Наук. думка, 1986. — 208 с.
4. Михалюк А.В., Нагорный В.П. Неравномерное динамическое нагружение солевых и нерастворимых пород при сооружении подземных хранилищ в каменно-соляных структурах. — К., 1995. — 16 с. (Препр. АН Украины. Ин-т геофизики им. С.И. Субботина).
5. Иванцов О.М. Подземное хранение жидких углеводородных газов. — М.: Гостоптехиздат, 1961. — 148 с.
6. Белоцерковская Г.В., Белоцерковский Е.А. О создании подземных хранилищ жидких углеводородов в соляных пластах, содержащих прослой нерастворимых пород // Нефтяное хозяйство. — 1967. — № 12. — С. 46–48.
7. Нагорный В.П., Кондратенко А.Ю., Пекарь Н.Н. Исследования взрывного обрушения нерастворимых пластов при строительстве подземных емкостей в соли // Взрывные работы в геотехнологии. — К.: Наук. думка, 1991. — С. 37–44.
8. Нагорный В.П., Глоба В.М., Денисюк И.И. Взрывные работы при добыче природных углеводородов, строительстве магистральных трубопроводов и подземных хранилищ. — К.: Поліграфіст, 2009. — 330 с.
9. Михалюк А.В., Нагорный В.П. Взрывные работы при строительстве подземных хранилищ в каменной соли методом размыва. — К., 1995. — 26 с. (Препр. АН Украины. Ин-т геофизики им. С.И. Субботина).
10. Нагорный В.П., Глоба В.М. Сооружение и эксплуатация подземных хранилищ углеводородов в отложениях каменной соли. — К.: Эссе, 2010. — 176 с.

Стаття надійшла 19.03.2014.

*В.П. Назорный, И.И. Денисюк*

Институт геофизики им. С.И. Субботина Национальной академии наук Украины  
просп. Палладина, 32, Киев, 03680, Украина

#### ИНТЕНСИФИКАЦИЯ СООРУЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ В ОТЛОЖЕНИЯХ КАМЕННОЙ СОЛИ

В статье предлагается импульсный метод интенсификации сооружения подземных хранилищ в каменных солях, в т. ч. в сложных горно-геологических условиях. Изложены экспериментальные результаты по разуплотнению структуры каменной соли в процессе неравномерной динамической нагрузки. Разработаны методы разрушения отложений нерастворимых горных пород, осложняющих процесс размыва емкости. Приведенные результаты промышленных испытаний предложенных технологий свидетельствуют об их высокой эффективности.

**Ключевые слова:** эксперимент, импульс, интенсификация, каменная соль, подземное хранилище, пласт, размывание, технология.

*V.P. Nagorny, I.I. Denisyuk*

Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of Ukraine  
32 Akademika Palladina Prospekt, Kyiv, 03680, Ukraine

#### INTENSIFICATION OF UNDERGROUND STORAGE CONSTRUCTION WITHIN ROCK SALT

Impulse method of intensification of underground storage construction within rock salt including the cases of complicated geological conditions is proposed in the article. Experimental results on decompaction of rock salt structure during the process of irregular dynamic loading have been set forth. Destruction methods of insoluble rocks deposits complicating the process of tank erosion have been elaborated. Results of industrial testing of proposed technologies prove their high effectiveness.

**Keywords:** experiment, impulse, intensification, rock salt, underground storage, stratum, erosion, technology.