

## ЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗЧИНЕННЯ ПОРОЖНИН У КАМ'ЯНІЙ СОЛІ ЗАТОПЛЕНИМИ СТРУМЕНЯМИ ВОДИ

Вадим Орел<sup>1</sup>, Оксана Мацієвська<sup>2</sup>, Іреней Балабух<sup>3</sup>

Національний університет «Львівська політехніка»  
12, вул С. Бандери, м. Львів, Україна, 79013

<sup>1</sup> канд. тех. наук, доцент, vadym.i.orel@lpnu.ua, orcid.org/0000-0002-3518-4597

<sup>2</sup> канд. тех. наук, доцент, oksana.o.matsiievska@lpnu.ua, orcid.org/0000-0001-5784-0236

<sup>3</sup> irenei.balabukh.bd.2018@lpnu.ua, orcid.org/0000-0002-4877-8677

DOI: 10.32347/2524-0021.2022.41.59-65

**Анотація.** Для створення порожнин при розчиненні кам'яної солі найдоцільніше подавати розчинник крізь сопла перфорованої труби у вигляді затоплених струменів. У статті розглянуто фізичне розчинення порожнини водою зі стаціонарного сопла діаметром 0,004 м за двох сталих значень швидкості на зрізі сопла. Ефективність розчинення порожнини, яка має практично циліндричну форму з півциліндричним дном, проаналізовано при швидкості на зрізі сопла 8,85 м/с. Одержані результати пояснено, виходячи з того, що утворена порожнина є коротким тупиковим каналом, в якому діє фактор поздовжнього стиснення. Течія в такому каналі зумовлена протитиском, який здійснює його торець. А протитиск, у свою чергу, перешкоджає розвитку струменя, який витікає зі стаціонарного сопла, не досягаючи при цьому своєї далекобійності. Припинення істотного розширення струменя опосередковано підтверджено використанням емпіричної формули для розподілу максимальної швидкості води по осі струменя. Її значення на кінці ділянки найінтенсивнішого розчинення порожнини стає меншою порівняно з швидкістю на зрізі сопла майже в 8,85 разів. Межі ділянки найінтенсивнішого розчинення порожнини визначено за залежністю між глибиною порожнини, діаметром сопла, швидкістю на його зрізі та часом розчиненням, за якою можна моделювати розчинення порожнин за різних значень швидкостей на зрізі сопла за його сталого діаметру. Отримано, що залежність між радіусом та глибиною порожнини є лінійною. Кут між границею зміни розмірів порожнини та віссю сопла становить 20°23'. Ці результати показують, що розчинення порожнин є ефективним в обмеженому діапазоні часу їх розчинення, межі якого залежать від швидкості розчинника на зрізі сопла. Для підтвердження отриманих результатів необхідно дослідити геометричні характеристики порожнин за інших значень діаметрів сопла.

**Ключові слова:** кам'яна сіль; розчинення порожнин; вільний затоплений струмінь; тупиковий канал; розміри порожнин.

### ВСТУП

Поклади кам'яної солі характеризують герметичністю, вони мають стабільні хімічні та механічні властивості [1–4]. Тому для зберігання енергоносіїв (продуктів переробки нафти, газу тощо) широко використовують підземні сховища, утворені в покладах кам'яної солі розчиненням [5–8].

Утворення порожнин водою в кам'яній солі являє собою фізичне розчинення [9, с.38].

Результати дослідження процесу утворення порожнини циліндричної геометрії для сховища газу в покладах кам'яної солі впорскуванням прісної води наведено в роботі [10].

Модель динамічного розчинення кам'яної солі за різних витрат розчинника досліджено в роботі [11]. Доведено, що зі збільшенням витрати води прискорюються процеси конвекції та дифузії кам'яної солі. А це, у свою чергу, збільшує швидкість розчинення кам'яної солі.

Результати експериментів свідчать, що швидкість розчинення кам'яної солі зростає зі збільшенням витрати прісної води у певному діапазоні. Отже, ефективність розчинення мінералів кам'яної солі залежить від швидкості закачування води.

У роботі [12] встановлено вплив складу соляної породи, концентрації розсолу, кута нахилу поверхні солі, відстані між входом води та виходом розсолу, а також витрати розчину на швидкість розчинення породи.

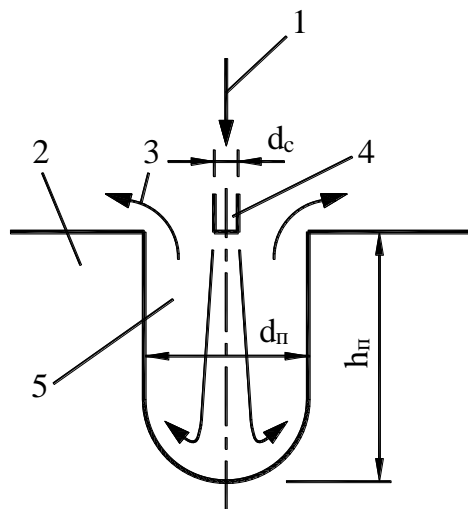
При розчиненні порожнин використовують гідравлічні пристрої, робочим органом яких є перфорована труба [13].

Для створення порожнин розчиненням доцільно подавати розчинник у вигляді затопленого струменя крізь отвори перфорації (сопла) [9, с.38].

Струмені води, які витікають з кожного сопла перфорованої труби, утворюють в кам'яній солі тупикові порожнини у вигляді каналів практично циліндричної форми діаметром  $d_{\text{п}}$  з напівсферичним дном (рис. 1) [13]. Тому процес розчинення каналу зводиться до процесу просування напівсферичного фронту вздовж осі сопла, що супроводжується постійним збільшенням діаметра порожнини [14]. Але, позаяк діаметр порожнини практично неможливо виміряти, оскільки її форма не є циліндричною [13], то діаметр  $d_{\text{п}}$  – радше еквівалентний діаметр.

Отримано формулу для визначення зміни радіуса півсфери в часі при розчиненні порожнини в покладах кам'яної солі затопленим струменем води, який витікає із нерухомого сопла діаметром  $d_c$  [14]. Проте, ця формула надається для використання лише з урахуванням кінетики розчинення.

Довжина тупикового каналу  $h_{\text{п}}$  є прямо пропорційною швидкості  $V_c$  та діаметру сопла  $d_c$  [9, с.25].



**Рис. 1.** Схема розчинення тупикового каналу у кам'яної солі затопленим струменем води: 1 – подача розчинника; 2 – кам'яна сіль; 3 – вихід сольового розчину; 4 – сопло; 5 – порожнина

**Fig. 1.** The scheme of dissolving a dead-end channel in rock salt with a flooded water stream: 1 – supply of solvent; 2 – rock salt; 3 – output of saline solution; 4 – nozzle; 5 – cavity

Зв'язок цих величин, згідно з методом аналізу розмірностей, описує залежність [15]:

$$\frac{h_{\text{п}}}{d_c} = A \cdot \left( \frac{V_c \cdot t}{d_c} \right)^n, \quad (1)$$

де  $A$  – емпіричний коефіцієнт;  
 $n$  – показник степеню;  
 $t$  – час розчинення порожнини.

Залежність (1) є подібною лише за діаметра сопла  $d_c = \text{const}$  [15]. Проте, за  $d_c = \text{const}$  геометричні та кінематичні характеристики струменя залежать від співвідношення радіуса  $r_{\text{п}}$  та довжини  $h_{\text{п}}$  тупикового каналу [16].

Тому практичний інтерес представляють закономірності зміни розмірів тупикового каналу в часі, необхідні для раціонального конструювання гідравлічних пристроїв [17].

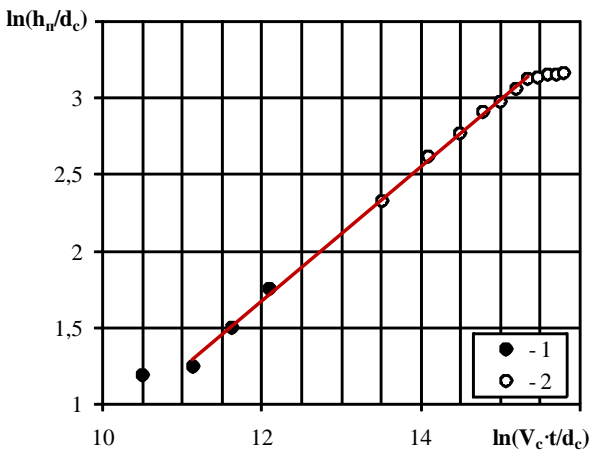
## МЕТА І МЕТОДИ

Метою даної роботи є виявлення закономірностей зміни розмірів порожнин у кам'яній солі при фізичному розчиненні

затопленими струменями води. Використовуватимуться емпіричні методи дослідження.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Проаналізуємо досліди з розчинення порожнини з сопла діаметром  $d_c = 4$  мм [15; 17], які проводили при  $V_c = \text{const}$ , а саме  $V_c = 2,39$  м/с [15] та  $V_c = 8,85$  м/с [17]. Як розчинник використовували воду за температури  $25^\circ\text{C}$ .



**Рис. 2.** Залежність  $\frac{h_p}{d_c} = f \left[ A \cdot \left( \frac{V_c \cdot t}{d_c} \right)^n \right]$  при  $d_c = 4$  мм та  $V_c = \text{const}$ : 1 – 2,39 м/с; 2 – 8,85 м/с

**Fig. 2.** Dependence  $\frac{h_p}{d_c} = f \left[ A \cdot \left( \frac{V_c \cdot t}{d_c} \right)^n \right]$  at  $d_c = 4$  mm and  $V_c = \text{const}$ : 1 – 2,39 m/s; 2 – 8,85 m/s

Лінійна залежність на рис. 2 вказує на найбільш інтенсивне розчинення порожнини у кам'яній солі затопленим струменем води. При цьому у залежності (1)  $A = 26,75 \cdot 10^{-3}$ ,  $n = 0,4405 \approx 0,44$ .

Оскільки залежність (1) є подібною для різних швидкостей  $V_c$ , то на кінцях її діапазону для  $V_c = 8,85$  м/с межі зміни  $h_p = 14,5 \dots 91$  мм при  $t = 0,5 \dots 35$  хв. Після часу  $t > 35$  хв розчинення порожнини є вже неефективним, тобто швидкість  $V$  розчинника на осі струменя має бути дуже малою. Це підтверджується емпіричною залежністю, яка добре описує розподіл швидкості води по осі струменя на відстані  $L$  від зрізу

сопла діаметром  $d_c = 2 \dots 6$  мм при її вимірювання трубкою Піто-Прандтля [9, с.15]:

$$V = V_c \cdot \frac{2,9 \cdot \frac{d_c}{L}}{1 + 2,9 \cdot \frac{d_c}{L}} \quad (2)$$

Так, при глибині порожнини  $h_p = 91$  мм ( $r_p/r_c = 17,575$ ;  $h_p/r_p = 2,60$ ;  $h_p/d_c = 22,75$ , де  $r_p, r_c$  – радіус порожнини та сопла відповідно;  $r_p = \frac{1}{2} \cdot d_p$ ,  $r_c = \frac{1}{2} \cdot d_c$ ) відношення швидкостей  $V/V_c = 0,113$ . Отже, зменшення швидкості на осі  $V$  порівняно зі швидкістю  $V_c$  на зрізі сопла є майже в 8,85 разів.

Співвідношення  $h_p/r_c$  [18, с.107] та  $h_p/r_p$  [16] визначають довжину тупикового каналу. Для дослідів з  $V_c = 8,85$  м/с  $h_p/r_c = 20,53 \dots 47,29$  та  $h_p/r_p = 2,22 \dots 2,60$ , що відповідає короткому тупиковому каналу. Вплив торцевої стінки тупикового каналу на течію стає помітним при  $h_p/r_p \leq 3 \dots 4$  [18, с.105].

Для короткого тупикового каналу  $(h_p)_{\text{max}} < x_d$  [16], де  $x_d$  – далекобійність струменя, яку в розрахунках зазвичай приймають як відстань від зрізу сопла, де швидкість  $V = 0,01 \cdot V_c$  [18, с.104-105]. Переписавши формулу (2) як

$$\frac{x_d}{d_c} = 2,9 \cdot \left( \frac{1}{V/V_c} - 1 \right) \quad (3)$$

маємо  $x_d/d_c = 287,1 > (h_p)_{\text{max}}/d_c = 23,625$ , де  $(h_p)_{\text{max}}$  – найбільша глибина порожнини,  $(h_p)_{\text{max}} \approx 94,5$  мм. Це означає, що струмінь в тупиковому каналі ще не досяг своєї далекобійності.

Течія в короткому тупиковому каналі зумовлена протитиском, який здійснює його торець, тобто діє фактор поздовжнього стиснення. Цей протитиск, який перешкоджає розвитку струменя, є тим більший, що коротшим є тупиковий канал [16].

Течію в короткому тупиковому каналі можна умовно розбити на три характерні області: 1) турбулентний осесиметричний струмінь; 2) область взаємодії струменя з торцевою стінкою каналу; 3) кільцевий напівобмежений струмінь оберненої течії

[18, с.106]. Кінематика течії в тупиковому каналі істотно залежить від його довжини [16].

Область 1 являє собою вільний затоплений струмінь. Спочатку поверхня розчинення каналу являє собою циліндр, діаметр якого є ненабагато більшим за діаметр сопла [15, с.24-25]. Але при цьому струмінь розчинника є обмеженим, який розширюється інтенсивніше ніж вільний, і тим інтенсивніше, що коротшим є тупиковий канал [16].

Для вільного затопленого струменю діаметр зовнішньої межі початкової ділянки [19, табл.1.1]

$$D_{\text{поч}} = d_c + 2x \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{поч}}), \quad (4)$$

те саме, основної [19, табл.1.1]

$$D_{\text{осн}} = d_c + 2x \cdot \text{tg}(\gamma_{\text{осн}}), \quad (5)$$

де  $x$  – відстань від зрізу сопла;

$\gamma_i$  – кут між напрямком витікання струменя з сопла та його віссю; на початковій ділянці  $\gamma_{\text{поч}} \approx 8^\circ 20'$ , на основній ділянці  $\gamma_{\text{осн}} = 12^\circ 30'$  [19, табл.1.1].

Довжини відповідних ділянок струменя –  $L_{\text{поч}}/d_c \approx 4$  та  $L_{\text{осн}}/d_c > 6$  [19, табл.1.1].

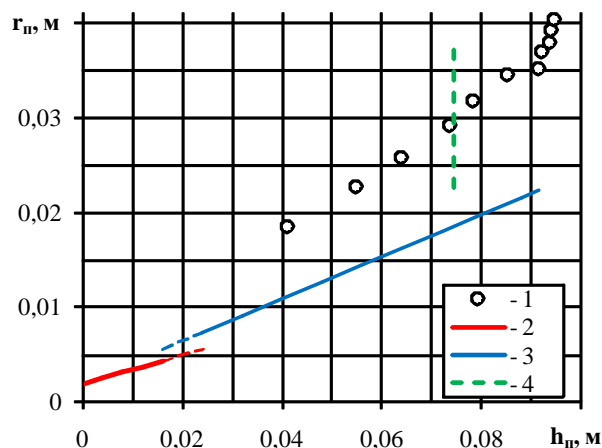
Обмежений розчинними стінками кам'яної солі струмінь має максимальну швидкість на поверхні пів сфери по осі каналу [5].

В області 2 утворюється пристінний віяловий струмінь [18, с.106], а вплив торцевої стінки на зміну максимальної швидкості починає проявлятися на відстані приблизно  $0,5 \cdot r_{\text{п}}$  від стінки (для  $r_{\text{п}}/r_c = 19,6$ ) [18, с.107, с.108]. Для розглянутих досліджень  $r_{\text{п}}/r_c = 9,24 \dots 20,14$  для  $V_c = 8,85$  м/с.

В області 3 кільцевий напівобмежений струмінь розповсюджуються вздовж бічної стінки каналу [18, с.107]. При цьому, що менша довжина тупикового каналу, то більшою є швидкість оберненої течії [18, с.109].

Для розглянутих досліджень з  $V_c = 8,85$  м/с істотне розширення струменя припиняється від глибини порожнини  $h_{\text{п}} = 91$  мм (рис. 3), починається його розворот, формуючи обернену течію. Це узгоджується з дослідженнями [16]. Але поча-

ток цього був закладений раніше, в області 2, після  $h_{\text{п}} = 74$  мм, коли відбувся вплив торцевої стінки каналу на зміну максимальної швидкості на осі каналу. Ця відстань від торця становить  $r_{\text{п}}/r_c = 20,14$ ;  $h_{\text{п}}/r_{\text{п}} = 2,35$ ;  $h_{\text{п}}/d_c = 23,65$ , що згідно з лінійною залежністю на рис. 2, відповідає часу розчинення порожнини  $t \approx 21$  хв 23 с. Тоді розширення струменя починає поступово припинятися.



**Рис. 3.** Геометричні характеристики порожнини: 1 – експеримент при  $d_c = 4$  мм та  $V_c = 8,85$  м/с; 2 – межі початкової ділянки вільного струменя; 3 – те саме, основної; 4 – відстань від торця, з якої проявляється вплив на зміну максимальної швидкості по осі тупикового каналу

**Fig. 3.** Geometric characteristics of the cavity: 1 – experiment at  $d_c = 4$  mm and  $V_c = 8.85$  m/s; 2 – boundaries of the initial section of the free jet; 3 – the same, the main one; 4 – the distance from the end, from which the influence on the change of the maximum speed along the axis of the dead-end channel is manifested

Усе вище сказане стосується й ефективності розчинення порожнини.

Залежність  $r_{\text{п}} = f(h_{\text{п}})$  на основній ділянці вільного затопленого струменю, який витікає з сопла, до точки впливу торцевої стінки каналу є лінійною. Кут на основній ділянці вільного затопленого струменю до точки впливу торця каналу на зміну швидкості  $V$  між границею зміни геометричних розмірів порожнини та віссю сопла стано-

вить 20°23'. Це відповідає дослідженням [20].

Усе це, згідно зі вище згаданою залежністю (1), дає змогу визначити час  $t$  розчинення порожнини.

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У даній роботі показано, що:

1. За допомогою залежності (1) можна моделювати розчинення порожнин за різних значень швидкостей на зрізі сопла за його сталого діаметра.

2. Показано можливість визначення розмірів найінтенсивнішого розчинення порожнин.

3. Розчинення порожнин є ефективним в обмеженому діапазоні часу розчинення, межі якого залежать від швидкості розчинника на зрізі сопла.

Для підтвердження отриманих результатів необхідно дослідити геометричні характеристики порожнин за інших значень діаметрів сопла.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Liu, W., Muhammad, N., Chen, J., Spiers, C. J., Peach, C. J., Deyi, J., & Li, Y. Investigation on the permeability characteristics of bedded salt rocks and the tightness of natural gas caverns in such formations // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 35, 468–482. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.07.072>
2. Chen, X., Li, Y., Liu, W., Ma, H., Ma, J., Shi, X., & Yang, C. Study on sealing failure of wellbore in bedded salt cavern gas storage // *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(1), 215–228. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1571-5>
3. Chen, J., Ren, S., Yang, C., Jiang, D., & Li, L. Self-healing characteristics of damaged rock salt under different healing conditions // *Materials*, 2013, 6(8), 3438–3450. <https://doi.org/10.3390/ma6083438>
4. Li, Y., Liu, W., Yang, C., & Daemen, J. J. Experimental investigation of mechanical behavior of bedded rock salt containing inclined interlayer // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2014, 69, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2014.03.006>
5. Алексеев А. Д., Карпінська І. А. Концентрація розчину, що утворюється при розчиненні порожнин у покладах кам'яної солі // *Вісник Львівського політехнічного інституту*. Теплоенергетичні системи та пристрої. 1993. № 273. С. 3–5.
6. Zhang, N., Shi, X., Wang, T., Yang, C., Liu, W., Ma, H., & Daemen, J. J. K. Stability and availability evaluation of underground strategic petroleum reserve (SPR) caverns in bedded rock salt of Jintan, China // *Energy*, 2017, 134, 504–514. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.073>
7. Yang, C., Wang, T., Li, Y., Yang, H., Li, J., Xu, B., ... & Daemen, J. J. K. Feasibility analysis of using abandoned salt caverns for large-scale underground energy storage in China // *Applied Energy*, 2015, 137, 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.048>
8. Goulart, M. B. R., da Costa, P. V. M., da Costa, A. M., Miranda, A. C., Mendes, A. B., Ebecken, N. F., ... & Assi, G. R. Technology readiness assessment of ultra-deep salt caverns for carbon capture and storage in Brazil // *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2020, 99, 103083. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103083>
9. Молчанов А. Д., Тимофеев И. Л. Интенсификация геотехнологических процессов растворения и выщелачивания. Львов : Изд-во при Львов. ун-те, 1988. 144 с.
10. Reda, D. C., & Russo, A. J. Experimental studies of salt-cavity leaching by freshwater injection // *SPE Production Engineering*, 1986, 1(01), 82–86. <https://doi.org/10.2118/13308-PA>
11. Liu, X., Yang, X., Zhong, Z., Liang, N., Wang, J., & Huang, M. Research on dynamic dissolving model and experiment for rock salt under different flow conditions // *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/959726>
12. Wanyan, Q., Xiao, Y., & Tang, N. Numerical simulation and experimental study on dissolving characteristics of layered salt rocks // *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019, 27(5), 1030–1036. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.01.004>
13. Алексеев А. Д., Молчанов А. Д. Дослідження кінетики розчинення тупикового каналу // *Вісник Львівського політехнічного інституту*. Теплоенергетичні системи та пристрої. 1991. № 256. С. 3–5.
14. Тимофеев И., Галянчук И., Тазалова Н. Кінетика розчинення порожнини затопленим струменем води // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» : Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація*. 2002. № 460. С. 170–172.



15. Молчанов А. Д., Алексеев А. Д. Кінетика розчинення порожнин у кам'яній солі затопленими струменями води // Вісник Львівського політехнічного інституту. Теплоенергетичні системи та пристрої. 1992. № 266. С. 58–59.

16. Посохин В. Н., Кареева Ю. Р. Осесимметричная турбулентная струя в тупике // Известия вузов. Строительство. 2011. №3. С. 64–70.

17. Алексеев А. Д., Дзюба Е. З., Рыбкин А. В. Кинетика создания тупикового канала затопленной струей // Вестник Львовского политехнического института. Теплоэнергетические системы и устройства. 1989. № 237. С.5–6.

18. Турбулентные струйные течения в каналах / Алемасов В. Е., Глебов Г. А., Козлов А. П., Щёлков А. Н. Казань : Казанский филиал АН СССР, 1988. 172 с.

19. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

20. Gechter, D., Huggenberger, P., Ackerer, P., & Waber, H. N. Genesis and shape of natural solution cavities within salt deposits // Water resources research, 2008, 44(11). <https://doi.org/10.1029/2007WR006753>

#### REFERENCES

1. Liu, W., Muhammad, N., Chen, J., Spiers, C. J., Peach, C. J., Deyi, J., & Li, Y. (2016). Investigation on the permeability characteristics of bedded salt rocks and the tightness of natural gas caverns in such formations. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 468–482. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.07.072>

2. Chen, X., Li, Y., Liu, W., Ma, H., Ma, J., Shi, X., & Yang, C. (2019). Study on sealing failure of wellbore in bedded salt cavern gas storage. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(1), 215–228. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1571-5>

3. Chen, J., Ren, S., Yang, C., Jiang, D., & Li, L. (2013). Self-healing characteristics of damaged rock salt under different healing conditions. *Materials*, 6(8), 3438–3450. <https://doi.org/10.3390/ma6083438>

4. Li, Y., Liu, W., Yang, C., & Daemen, J. J. (2014). Experimental investigation of mechanical behavior of bedded rock salt containing inclined interlayer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 69, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.03.006>

5. Aleksieiev, A. D., & Karpinska, I. A. (1993). Kонтсентратиїа розчynu, shcho utvoriuietsia pry rozchynenni porozhnyn u pokladakh

kam'ianoї soli. *Visnyk Lvivskoho politekhnichnoho instytutu. Serii: Teploenerhetychni systemy ta prystroi*, 273, 3–5. (in Ukrainian)

6. Zhang, N., Shi, X., Wang, T., Yang, C., Liu, W., Ma, H., & Daemen, J. J. K. (2017). Stability and availability evaluation of underground strategic petroleum reserve (SPR) caverns in bedded rock salt of Jintan, China. *Energy*, 134, 504–514.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.073>

7. Yang, C., Wang, T., Li, Y., Yang, H., Li, J., Xu, B., ... & Daemen, J. J. K. (2015). Feasibility analysis of using abandoned salt caverns for large-scale underground energy storage in China. *Applied Energy*, 137, 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.048>

8. Goulart, M. B. R., da Costa, P. V. M., da Costa, A. M., Miranda, A. C., Mendes, A. B., Ebecken, N. F., ... & Assi, G. R. (2020). Technology readiness assessment of ultra-deep salt caverns for carbon capture and storage in Brazil. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 99, 103083.

<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103083>

9. Molchanov, A. D., & Timofeev, I. L. (1988). Intensifikacija geotekhnologicheskikh processov rastvorenija i vyshhelachivaniija. *Izdatel'stvo pri Lvovskom universitete*. (in Russian)

10. Reda, D. C., & Russo, A. J. (1986). Experimental studies of salt-cavity leaching by freshwater injection. *SPE Production Engineering*, 1(01), 82–86. <https://doi.org/10.2118/13308-PA>

11. Liu, X., Yang, X., Zhong, Z., Liang, N., Wang, J., & Huang, M. (2015). Research on dynamic dissolving model and experiment for rock salt under different flow conditions. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/959726>

12. Wanyan, Q., Xiao, Y., & Tang, N. (2019). Numerical simulation and experimental study on dissolving characteristics of layered salt rocks. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(5), 1030–1036. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.01.004>

13. Aleksieiev, A. D., & Molchanov, A. D. (1991). Doslidzhennja kinetiki rozchinnnja tupikovogo kanalu. *Visnyk Lvivskoho politekhnichnoho instytutu. Serii: Teploenerhetychni systemy ta prystroi*, 256, 3–5. (in Ukrainian)

14. Tymofeiev, I., Halianchuk, I., & Tazalova, N. (2002). Kinetyka rozchynennia porozhnyny zatoplenym strumenem vody. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska*

*politekhniky*. Seriya: *Teplotnerhetyka. Inzheneriia dovkillia. Avtomatyzatsiia*, 460, 170–172. (in Ukrainian)

15. Molchanov, A. D., & Aleksieiev, A. D. (1992). Kinetyka rozchynennia porozhnyn u kam'ianii soli zatoplenymy strumeniamy vody. *Visnyk Lvivskoho politekhnichnoho instytutu. Seriya: Teplotnerhetychni systemy ta prystroi*, 266, 58–59. (in Ukrainian)

16. Posohin, V. N., & Kareeva, J. R. (2011). Axisymmetric turbulent jet in the dead-end. *News of universities. Construction*, 3, 64–70. (in Russian)

17. Alekseev, A. D., Dzjuba, E. Z., & Rybkin, A. V. (1989). Kinetika sozdaniia tupikovogo kanala zatoplennoj struej. *Vestnik L'vovskogo*

*politehnicheskogo instituta. Serija: Teplojenergeticheskie sistemy i ustrojstv*, 237, 5–6. (in Russian)

18. Aemasov, V. E., Glebov, G. A., Kozlov, A. P., & Shhjolkov, A. N. (1988). Turbulentnye strujnye techenija v kanalah. *Kazanskij filial AN SSSR*. (in Russian)

19. Idel'chik I. E. (1992). Spravochnik po gidravlicheskim soprotivlenijam. *Mashinostroenie*. (in Russian)

20. Gechter, D., Huggenberger, P., Ackerer, P., & Waber, H. N. (2008). Genesis and shape of natural solution cavities within salt deposits. *Water resources research*, 44(11). <https://doi.org/10.1029/2007WR006753>

### Efficiency of cavity dissolution in rock salt by water submerged jets

Vadym Orel, Oksana Matsiyevska, Irenei Balabukh

**Abstract.** To create cavities when dissolving rock salt, it is most expedient to supply the solvent through the nozzles of a perforated pipe in the form of submerged jets. This article examines the physical dissolution of a cavity with water from a stationary nozzle with a diameter of 0.004 m at two constant velocities at the nozzle cross-section. The efficiency of cavity dissolution, which has an almost cylindrical shape with a semi-cylindrical bottom, was analyzed at a nozzle cross-section speed of 8.85 m/s. The obtained results are explained on the basis of the fact that the formed cavity is a short dead-end channel where longitudinal compression acts. The flow in such a channel is caused by the back pressure exerted by its end. And the back pressure, in turn, hinders the development of the jet that flows out of the stationary nozzle, limiting its range. The cessation of significant expansion of the jet is indirectly confirmed by the use of an empirical formula for the distribution of the maximum water velocity along the axis of the jet. Its value at the end of the section of the most intense dissolution of the cavity becomes 8.85 times smaller compared to the speed at the nozzle cross-section. The boundaries of the area of the most intense dissolution of the cavity are determined by the relationship between the depth of the cavity, the diameter of the nozzle, the velocity at its cross-section, and the time of dissolution, which can be used to model the dissolution of cavities at different values of the velocity at the cross-section of the nozzle at its constant diameter. It was found that the relationship between the radius and depth of the cavity is linear. The angle between the boundary of the cavity size change and the axis of the nozzle is 20°23'. These results show that the dissolution of cavities is effective in a limited range of their dissolution time, the limits of which depend on the velocity of the solvent at the nozzle section. To confirm the obtained results, it is necessary to investigate the geometric characteristics of the cavities for other values of the nozzle diameters.

**Key words:** rock salt; cavity dissolution; submerged free jet; dead-end channel; sizes of cavity.

Стаття надійшла до редакції 29.11.2022