УДК 661.8:66.06

Ресурсний потенціал техногенних сольових розчинів та енергоефективні технології їх перероблення

***Довгалюк І.Г.*[1]**, *ORCID ID 0009-0009-9303-5061, Samar2000@ukr.net*
***Хацевич О.М.*[1]**, *ORCID ID 0000-0003-0670-4909, khatsevich.olga@meta.ua*
***Кулик Г.М.*[1]**, *ORCID ID* 0009-0006-0618-3014**,** *gennadiy.n.kulik@gmail.com*
[1]*Державна установа «Державний науково-дослідний та проектний інститут основної хімії», м. Харків (філія в м. Калуш, вул. Фабрична, 5А), Україна*

Техногенні сольові розчини, накопичені внаслідок тривалої експлуатації родовищ калійних і кам'яних солей, є одночасно джерелом екологічного ризику та перспективною вторинною мінеральною сировиною. Особливе значення для України мають техногенні об'єкти Калуського промислового району та Стебницького калійного родовища. Метою роботи є обґрунтування ресурсного потенціалу техногенних розсолів і розроблення принципової енергоефективної технології їх комплексного перероблення з одержанням технічної солі та калійно-магнієвих продуктів. На основі опублікованих даних щодо складу техногенного сольового розчину (Калуського промислового району) проведено орієнтовний розрахунок п'ятикомпонентної системи Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-} || H_2O та запропоновано комбіновану схему, що включає попереднє очищення, нанофільтрацію, селективне осадження, концентрування, вакуум-випарювання та фракційну кристалізацію. Показано, що використання мембранного концентрування перед термічною стадією дозволяє зменшити навантаження на випарне обладнання та підвищити вихід NaCl. За розрахунковими даними із 1 м³ концентрованого сольового розчину потенційно може бути вилучено близько 163,6 кг NaCl, 41 кг KCl та до 85 кг сумарних магнієвих солей у вигляді цільових продуктів або напівпродуктів. Енергетична оцінка, виконана на основі сучасних даних для промислового виробництва випарної солі, що підтверджує доцільність інтеграції мембранних і випарно-кристалізаційних процесів.

Ключові слова: техногенні розсоли, Калуш, Стебник, калійно-магнієві добрива, кристалізація, нанофільтрація, вакуум-випарювання, енергоефективність.

Resource potential of technogenic brines and energy-efficient technologies for their processing

***Dovhaliuk Iryna*[1]**, *ORCID ID 0009-0009-9303-5061, Samar2000@ukr.net*
***Khatsevych Olha*[1]**, *ORCID ID 0000-0003-0670-4909, khatsevich.olga@meta.ua*
***Kulyk Hennadiy*[1]**, *ORCID ID* 0009-0006-0618-3014**,** *gennadiy.n.kulik@gmail.com*
[1]*State Institution "State Scientific Research and Design Institute of Basic Chemistry", Kharkiv (branch in Kalush, 5A Fabrychna St.), Ukraine*

Technogenic brines, accumulated from the long-term exploitation of potassium and rock salt deposits, are both a source of environmental risk and a promising secondary mineral resource. Of particular importance for Ukraine are the technogenic objects of the Kalusky industrial district and the Stebnytsky potash deposit. The aim of the work is to substantiate the resource potential of technogenic brines and develop a principled energy-efficient technology for their complex processing to obtain technical salt and potassium-magnesium products. Based on published data on the composition of technogenic saline solution (Kaluskiy industrial district), an approximate calculation of the five-component system Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, $SO4^{2-}$ || H_2O was performed, and a combined scheme was proposed, including preliminary purification, nanofiltration, selective precipitation, concentration, vacuum evaporation, and fractional crystallization. It is shown that using membrane concentration before the thermal stage reduces the load on the evaporation equipment and increases the yield of NaCl. According to the calculated data, from 1 m³ of concentrated salt solution, about 163.6 kg of NaCl, 41 kg of KCl and up to 85 kg of total magnesium salts can potentially be removed in the form of target products or intermediate products. Energy assessment, performed on the basis of modern data for the industrial production of evaporated salt, confirms the feasibility of integrating membrane and evaporation-crystallisation processes.

Keywords: technogenic brines, Kalush, Stebnyk, potassium-magnesium fertilisers, crystallisation, nanofiltration, vacuum evaporation, energy efficiency.

Вступ

Тривала експлуатація калійних та родовищ кам'яної солі Карпатського регіону сформувала значні обсяги техногенної сольової сировини, представленої висококонцентрованими розсолами Домбровського кар'єру (більше 30 млн. м^3 всього, а концентрованих з сумою солей від 300 г/дм^3 - 4,2 млн. м^3,), хвостами збагачення (хвостосховище №1, площею 54 га, де заскладовані галітові відходи об'ємом 12-14 млн. м³; та хвостосховище №2, площею 48 га, де зберігається до 1,8 млн. м^3 розсолів та 8 млн. м^3

солевмістних відходів), соляними відвалами та шламами, затопленими гірничими виробками. Калуський промисловий район та Стебницьке родовище калійних солей є наймасштабнішими прикладами техногенних об'єктів регіону.

Сучасний підхід до таких об'єктів передбачає перехід від традиційної концепції їх ізоляції та утилізації до ресурсно орієнтованого управління техногенною сировиною. Особливо перспективними є висококонцентровані розчини, оскільки такі розчини є потенційною сировиною для технологій вилучення солей без проведення повного циклу гірничих і дробильно-збагачувальних операцій.

Дослідження [1] 2026 року для Калуського промислового району показало, що мінералізація розсолів Домбровського кар'єру та хвостосховища № 2 зростає з глибиною і в окремих горизонтах перевищує 400 г/дм³. Основними компонентами розсолів є NaCl, KCl, $MgCl_2$ та $MgSO_4$, що безпосередньо свідчить про можливість їх використання як вторинної соляної сировини. Розглядається комплексне перероблення таких розчинів з отриманням технічної солі та калійно-магнієвих добрив як один з найперспективніших напрямів зменшення екологічного навантаження. Стебницьке хвостосховище також містить висококонцентровані соляні розчини. Опубліковані дані [3, 4] свідчать про значні концентрації солей (NaCl, KCl, $MgSO_4$ та $MgCl_2$), у глибоких горизонтах загальна кількість розчинених солей перевищує 400 г/дм^3.

Отже, техногенні розчини можуть бути розглянуті як вторинне родовище натрієвих, калійних і магнієвих солей, а їх перероблення — як поєднання екологічної реабілітації та ресурсозбереження.

Принципова технологічна схема. З урахуванням складу техногенних розсолів та сучасних підходів до комплексного вилучення компонентів пропонується принципова схема:

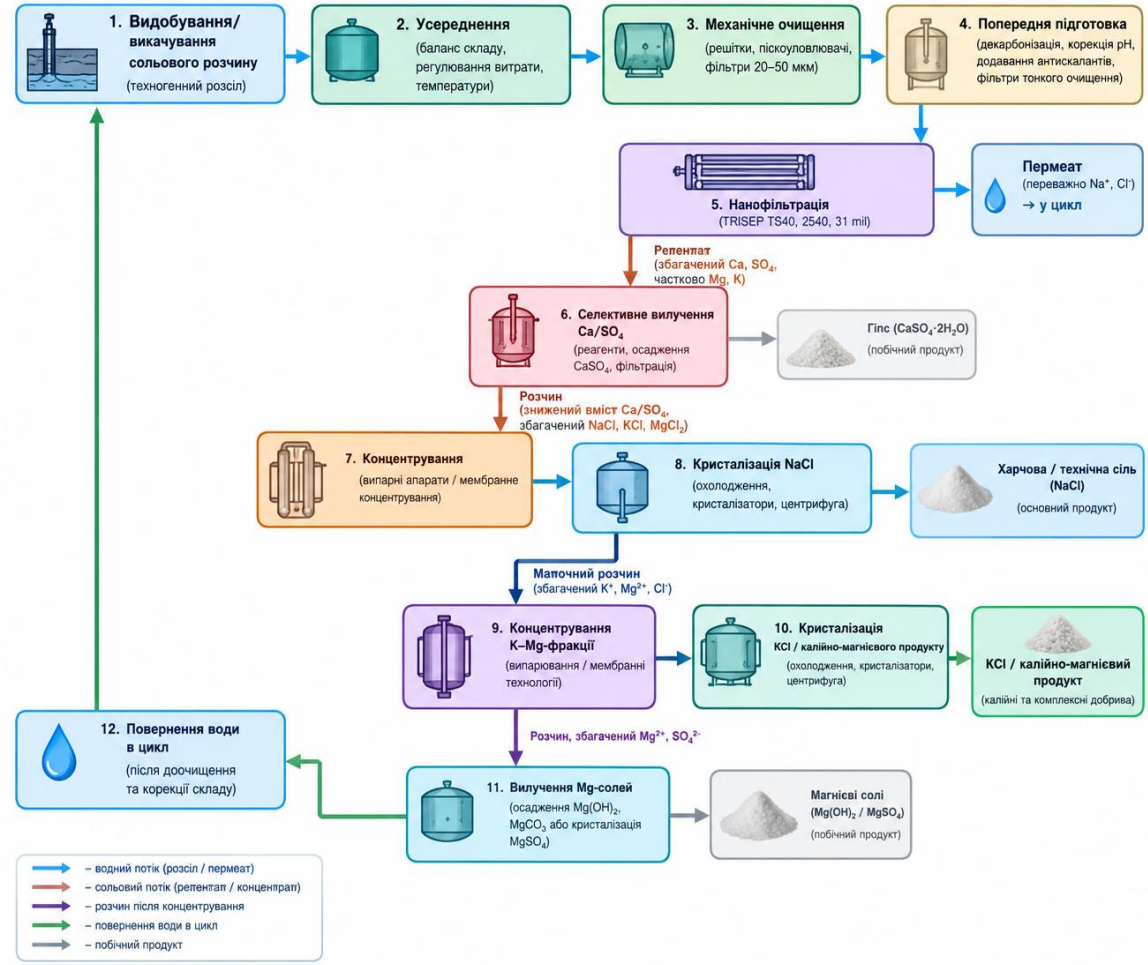

Рис. 1. Принципова блок-схема перероблення техногенного сольового розчину на важливі продукти (сіль технічна, калійно-магнієві добрива, магнійвмісні продукти та очищена вода).

На першій стадії передбачається усереднення розсолу для стабілізації його складу та видалення завислих частинок. Це особливо важливо для техногенних об'єктів, де склад

рідкої фази може істотно змінюватися залежно від глибини, метеорологічних умов та співвідношення поверхневих і підземних вод.

Наступною стадією доцільно передбачити нанофільтрацію. Її завданням є не повне знесолення, а зміна співвідношення одновалентних і двовалентних іонів та зменшення концентрації Ca^{2+}, Mg^{2+} і SO_4^{2-} перед кристалізацією NaCl. Ефективність такого підходу підтверджена промисловими дослідженнями виробництва випарної солі. Застосування двоступеневої нанофільтрації з проміжною кристалізацією гіпсу дозволяє збільшити вихід NaCl з 58,8 до 76,1 %, а питомі енерговитрати знизилися з 1350 до 1068 кВт·год/т солі. Обсяг висококонцентрованого маточного розчину при цьому зменшився на 66 %. [1] Після попередньої підготовки потік розчину NaCl подається на вакуум-випарювання та кристалізацію NaCl. Застосування вакууму дозволяє знизити температуру кипіння та створює можливість використання вторинної пари як джерела тепла на наступних стадіях. Маточний розчин після вилучення NaCl збагачується K^+ і Mg^{2+}. Саме цей потік доцільно використовувати для отримання калійно-магнієвих продуктів.

Сучасні дослідження показують принципову можливість такого підходу. У роботі [2] запропоновано інтегровану схему перероблення калійвмісного розчину, в якому магній вилучали хімічним осадженням, після чого методом випарної кристалізації з розчину отримували KCl. За оптимальних умов досягалося вилучення близько 88 % Mg у $Mg(OH)_2$ з чистотою близько 95 %, а чистота отриманого KCl становила 99,15 %. [1]

Для техногенних сольових розчинів Прикарпаття такий підхід може бути адаптований шляхом одержання комплексного калійно-магнієвого добрива, склад якого визначатиметься співвідношенням іонів K^+, Mg^{2+}, Cl^- і SO_4^{2-} у вихідній сировині.

Орієнтовний розрахунок. Попередню технологічну оцінку проводили враховуючи усереднений склад техногенного розчину з Хвостосховища № 2 (Калуського промислового району): NaCl — 204,51 г/л; KCl — 48,36 г/л; $MgSO_4$ — 94,14 г/л; $MgCl_2$ — 32,06 г/л, $CaSO_4$ — 1,67 г/л. Загальна концентрація солей становить 380,74 г/л. За розрахункову базу взято 1 м³ техногенного сольового розчину.

Таблиця 1. Розрахунок орієнтовного вилучення солей з 1 м³ техногенного розчину

Компонент	**Вихідний вміст, кг/м³**	**Прийнятий ступінь вилучення**	**Орієнтовно вилучено, кг/м³**
NaCl	204,51	80 %	163,61
KCl	48,36	85 %	41,11
$MgSO_4$	94,14	70 %	65,90
$MgCl_2$	32,06	60 %	19,24
$CaSO_4$	1,67	-	-
Разом	380,74	—	**289,86**

Наведені коефіцієнти вилучення є розрахунковими технологічними припущеннями, що зроблені після лабораторних досліджень, для попередньої оцінки потенціалу процесу. Вони мають бути перевірені або встановлені експериментально для техногенного сольового розчину в напівпромислових умовах на пілотних установках.

Отже, із 1 м³ такого розсолу потенційно може бути вилучено близько 163,6 кг NaCl, 41 кг KCl і близько 85 кг магнієвих солей ($MgSO_4$ та $MgCl_2$). При продуктивності установки, наприклад, 1000 м³/добу або 312 000, м³/рік (враховуючи час фабрикації 7488 годин, як прийнято в калійній галузі) це відповідатиме орієнтовному потенціалу наведеному в таблиці 2.

Таблиця 2. Розрахунок вилучення солей з техногенного розчину на добу або на рік

№	**Компонент (сіль)**	**тонн на добу**	**тонн на рік**
1	NaCl	163,61	51 046,32
2	KCl	41,11	12 826,32
3	$MgSO_4$	65,90	20 560,80
4	$MgCl_2$	19,24	6 002,88

При цьому наведені значення характеризують потенціал вилучення компонентів, а не гарантований вихід кінцевого продукту. Фактична продуктивність за кондиційними продуктами може бути визначена за результатами фазово-рівноважних і кристалізаційних

досліджень. Це особливо важливо для системи Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-} || H_2O, у якій під час концентрування можуть утворюватися не лише індивідуальні солі, а й подвійні та гідратовані фази. Сучасні дослідження фазових рівноваг п'ятикомпонентних систем морського типу (Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, SO_4^{2-} || H_2O), підтверджують можливість послідовного формування різних областей кристалізації NaCl, KCl, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ та подвійної солі (карналіту) $KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$ [1]. Тому для проєктування технології необхідне експериментальне визначення діаграми розчинності конкретного сольового розчину та встановлення оптимальної температурно-концентраційної траєкторії його випарювання.

Оцінка енергоефективності. Основні енергетичні затрати запропонованої технології припадають на випарювання. Тому принциповою відмінністю запропонованої схеми є винесення частини навантаження з випарної установки на мембранну стадію. За даними дослідження промислового виробництва випарної солі, [1] використання нанофільтрації дозволило знизити питомі енерговитрати з 1350 до 1068 кВт·год/т NaCl, тобто приблизно на 21 %. При цьому енергетичний внесок окремих операцій становив: нанофільтрація — 5,9 %, зворотний осмос — 7,1 %, випарювання — 65,2 %, кристалізація — 21,8 %. Якщо використати цей показник як орієнтир для попередньої оцінки, то отримання 163,61 кг NaCl з 1 м³ розсолу за аналогічної питомої енергоємності відповідало б приблизно: 163,61 кг × 1068 кВт·год/1000 кг ≈ 174,74 кВт·год/м³ розсолу. Це не є прогнозом фактичного споживання установки, оскільки енергоємність залежатиме від початкової мінералізації, густини розчину, ступеня попереднього концентрування, температури, способу випарювання, частки K–Mg-продуктів у товарному балансі. Водночас наведений розрахунок показує принципову перевагу запропонованого підходу: чим більша частина води вилучається мембранними методами до випарювання, тим менша кількість води буде випарена. Зниження енерговитрат може бути досягнуто за рахунок: багатокорпусного вакуум-випарювання; механічної рекомпресії вторинної пари; багаторазового використання вторинної пари; рекуперації тепла конденсату; оптимізації ступеня попереднього мембранного концентрування; організації замкненого водного циклу.

Отже, енергоефективна технологія повинна ґрунтуватися не тільки на випарюванні, а на комбінації мембранних і термічних процесів. Це актуально, якщо враховувати, що наявні техногенні сольові розчини мають різну густину та концентрацію. Для Калуського промислового району запропонована схема має особливу актуальність через високу мінералізацію сольових розчинів на глибині техногенних об'єктів та значно нижчі концентрації на поверхні. Сучасні дослідження показують, що такі розчини містять NaCl, KCl, $MgCl_2$, $MgSO_4$ у концентраціях, достатніх для розгляду їх як вторинну мінеральну сировину. Одночасно встановлено підвищений вміст небезпечних домішок, зокрема у розчинах Домбровського кар'єру [1], тому технологія повинна передбачати спеціальну стадію контролю та вилучення токсичних компонентів до отримання товарної продукції. Ресурсний потенціал Стебника визначається як рідкою фазою хвостосховища, так і твердими солевмісними відходами. Наявність значних концентрацій KCl та солей Mg робить доцільним перехід від схеми «відкачування та відведення розсолу» до схеми «відкачування → перероблення → вилучення солей → повернення очищеної води».

Висновки. Техногенні розсоли Калуша та Стебника за своїм складом можуть розглядатися як вторинна сировина для одержання NaCl, калійно-магнієвих добрив, магнійвмісних продуктів, що відповідає принципам циркулярної економіки. Для їх перероблення запропоновано принципову комбіновану схему: мембранне концентрування → селективне вилучення Ca/SO_4 → вакуум-випарювання → кристалізація NaCl → концентрування K–Mg-розчину → одержання калійно-магнієвого продукту. Енергоефективність процесу доцільно підвищувати шляхом перенесення частини операцій концентрування з термічної на мембранну стадію. Дані промислового дослідження показують можливість зменшення питомих енерговитрат виробництва випарної солі приблизно на 21 % — з 1350 до 1068 кВт·год/т NaCl — за використання нанофільтрації як попередньої стадії. Найбільш перспективним напрямом подальших досліджень є створення пілотної технологічної установки комплексного перероблення техногенного розсолу

Калуського об'єкта з експериментальним визначенням фазових рівноваг, кінетики кристалізації, ступенів вилучення солей, питомих енерговитрат і якості отриманих продуктів.

Отже, перероблення техногенних сольових розчинів може забезпечити одночасне вирішення двох взаємопов'язаних завдань — зменшення екологічного навантаження на території колишніх гірничо-хімічних підприємств та залучення накопичених сольових ресурсів до промислового обігу.

Список використаних джерел:

Amadghous, Y., Ait-Khouia, Y., Aboulaich, A., Zagriri, A., Ouabid, M., Raji, O., Mansouri, S., Elghali, A., Taha, Y., & Benzaazoua, M. (2025). Resource recovery from potash brine effluent: Integrated chemical precipitation and evaporative crystallization for zero liquid discharge and sustainable brine management. *Chemosphere, 388*, 144700. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144700

Dovhaliuk, I., Kuchera, Y., Khatsevych, O., Kulyk, H., Burak, A., & Derzhko, O. (2026). Resource potential and impact on the environment of technological facilities of the Kalush industrial district. *Chemistry & Chemical Technology, 20*(2), 363–376. https://doi.org/10.23939/chcht20.02.363

Хевпа, З. З. (2026). Оцінка деформації земної поверхні після формування постмайнінгового ландшафту в межах Стебницького калійного родовища. Мінеральні ресурси України, (2), 31–36. https://doi.org/10.31996/mru.2026.2.31-36

Хевпа, З., Кицмур, І., & Дяків, В. (2023). Хвостосховище Стебницького ГХП «Полімінерал»: сучасний стан, шляхи покращення стану довкілля та забезпечення екологічної безпеки. Вісник Львівського університету. Серія геологічна, 37, 56–71. https://doi.org/10.30970/vgl.37.05

Lee, C.-H., Ho, H.-J., Chen, W.-S., & Iizuka, A. (2024). Total resource circulation of desalination brine: A review. *Advanced Sustainable Systems, 8*(7), 2300460. https://doi.org/10.1002/adsu.202300460

Scelfo, G., Battaglia, G., Cardella, M., Filingeri, A., Culcasi, A., Volpe, F., Craveri, L., Bertozzi, E., Tiraferri, A., & Micale, G. (2026). The CARMEn project: A sustainable and circular brine treatment chain. *Desalination, 621*, 119641. https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119641

Turek, M., Mitko, K., Skóra, P., Dydo, P., Jakóbik-Kolon, A., Warzecha, A., & Tyrała, K. (2022). Improving the performance of a salt production plant by using nanofiltration as a pretreatment. *Membranes, 12*(12), 1191. https://doi.org/10.3390/membranes12121191

Wu, J., & Hoek, E. M. V. (2025). Current opportunities and challenges in membrane-based brine management. *Current Opinion in Chemical Engineering, 47*, 101079. https://doi.org/10.1016/j.coche.2024.101079

References:

Amadghous, Y., Ait-Khouia, Y., Aboulaich, A., Zagriri, A., Ouabid, M., Raji, O., Mansouri, S., Elghali, A., Taha, Y., & Benzaazoua, M. (2025). Resource recovery from potash brine effluent: Integrated chemical precipitation and evaporative crystallization for zero liquid discharge and sustainable brine management. *Chemosphere, 388*, 144700. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144700

Dovhaliuk, I., Kuchera, Y., Khatsevych, O., Kulyk, H., Burak, A., & Derzhko, O. (2026). Resource potential and impact on the environment of technological facilities of the Kalush industrial district. *Chemistry & Chemical Technology, 20*(2), 363–376. https://doi.org/10.23939/chcht20.02.363

Khevpa, Z. Z. (2026). Assessment of land surface deformation after the formation of the post-mining landscape within the Stebnyk potassium deposit. *Mineral Resources of Ukraine*, (2), 31–36. https://doi.org/10.31996/mru.2026.2.31-36 [in Ukrainian]

Khevpa, Z., Kytsmur, I., & Dyakiv, V. (2023). Tailings storage facility of the Stebnyk Mining and Chemical Enterprise "Polymineral": Current state, ways to improve the environmental condition and ensure environmental safety. *Visnyk of Lviv University. Series Geology, 37*, 56–71. https://doi.org/10.30970/vgl.37.05 [in Ukrainian]

Lee, C.-H., Ho, H.-J., Chen, W.-S., & Iizuka, A. (2024). Total resource circulation of desalination brine: A review. *Advanced Sustainable Systems, 8*(7), 2300460. https://doi.org/10.1002/adsu.202300460

Scelfo, G., Battaglia, G., Cardella, M., Filingeri, A., Culcasi, A., Volpe, F., Craveri, L., Bertozzi, E., Tiraferri, A., & Micale, G. (2026). The CARMEn project: A sustainable and circular brine treatment chain. *Desalination, 621*, 119641. https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119641

Turek, M., Mitko, K., Skóra, P., Dydo, P., Jakóbik-Kolon, A., Warzecha, A., & Tyrała, K. (2022). Improving the performance of a salt production plant by using nanofiltration as a pretreatment. *Membranes, 12*(12), 1191. https://doi.org/10.3390/membranes12121191

Wu, J., & Hoek, E. M. V. (2025). Current opportunities and challenges in membrane-based brine management. *Current Opinion in Chemical Engineering, 47*, 101079. https://doi.org/10.1016/j.coche.2024.101079