УДК 66.047.37:66.045.1
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).26

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF THE DEHYDRATION PROCESS BY DIRECT ELECTRIC CURRENT

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ПРЯМИМ ВПЛИВОМ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Oleh V. Zamutskyi[1]
olegvladzam@knu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-8113-6369

Serhii O. Kradozhon[1]
kradozhon.so@knu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8286-1389

Anastasiia O. Serbina[2]
n22serbina@gmail.com
ORCID: 0009-0002-4484-0311

О. В. Замицький[1],
докт. техн. наук, професор

С. О. Крадожон[1],
докт. філос., старший викладач

А. О. Сербіна[2],
інженер

[1]Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih
[2]LLC Scientific and Production Association 'RAKURS', Kryvyi Rih
[1]Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг
[2]ТОВ НВО «РАКУРС», м. Кривий Ріг

Abstract. *Purpose*. Determination of optimal parameters of the process of dehydration of enrichment products under the combined influence of electric current and filtration mechanism in order to minimize the residual moisture of the material. *Method*. The study was performed using the method of experimental planning using steep ascent. The influence of the main factors was studied: compaction pressure, distance between electrodes, current exposure time, current density and material layer height. The results were processed using regression analysis. *Results*. A regression equation was obtained describing the dehydration process, and the significance of the factors was determined. The optimal process parameters were established, at which the minimum moisture content of the material is achieved: compaction pressure – 56 kPa, distance between electrodes – 12.8 cm, current exposure time – 34 s, current density – 0.26 A/cm^2, layer height – 15 cm. *Scientific novelty*. The effectiveness of the combined dehydration method, which involves the local effect of electric current on the surface layer of the material with the formation of steam and the creation of excess pressure, which intensifies the process of moisture removal, is substantiated. *Practical importance*. The proposed method allows to reduce energy consumption and increase the intensity of dehydration, which can be used in technological processes of processing enrichment products.
Key words: sludge dehydration; electric heating; combined method; experimental planning; parameter optimization; current density; moisture filtration.

Анотація. *Мета*. Визначення оптимальних параметрів процесу зневоднення продуктів збагачення при комбінованому впливі електричного струму та фільтраційного механізму з метою мінімізації залишкової вологості матеріалу. *Методика*. Дослідження виконано методом планування експерименту із застосуванням крутого сходження. Вивчено вплив основних факторів: тиску ущільнення, відстані між електродами, часу дії струму, щільності струму та висоти шару матеріалу. Обробка результатів здійснювалась із використанням регресійного аналізу. *Результати*. Отримано рівняння регресії, що описує процес зневоднення, та визначено значущість факторів. Встановлено оптимальні параметри процесу, за яких досягається мінімальна вологість матеріалу: тиск ущільнення – 56 кПа, відстань між електродами – 12,8 см, час дії струму – 34 с, щільність струму – 0,26 А/см^2, висота шару – 15 см. *Наукова новизна*. Обгрунтовано ефективність комбінованого методу зневоднення, що передбачає локальний вплив електричного струму на поверхневий шар матеріалу з утворенням пари та створенням надлишкового тиску, який інтенсифікує процес видалення вологи. *Практична значимість*. Запропонований метод дозволяє зменшити енерговитрати та підвищити інтенсивність зневоднення, що може бути використано в технологічних процесах переробки продуктів збагачення.
Ключові слова: зневоднення шламів; електричний нагрів; комбінований метод; планування експерименту; оптимізація параметрів; щільність струму; фільтрація вологи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У процесах переробки продуктів збагачення корисних копалин важливе значення має ефективне зневоднення шламів, оскільки підвищена вологість негативно впливає на подальші технологічні операції, транспортування та зберігання матеріалів. Традиційні методи зневоднення характеризуються значними енерговитратами та недостатньою інтенсивністю процесу, що зумовлює необхідність пошуку нових підходів до його удосконалення.

Одним із перспективних напрямів є застосування комбінованого методу, який передбачає використання електричного струму для локального нагрівання вологи у матеріалі з одночасним створенням умов для її фільтраційного видалення. При цьому ефективність процесу значною мірою залежить від режимних параметрів, зокрема тиску ущільнення, відстані між електродами, тривалості дії струму, щільності струму та геометричних характеристик шару матеріалу.

Незважаючи на наявність окремих досліджень у даній області, питання комплексного визначення оптимальних параметрів процесу з урахуванням їх взаємного впливу залишається недостатньо вивченим. Відсутність обґрунтованих рекомендацій щодо вибору режимів роботи зневоднювального обладнання обмежує ефективність впровадження комбінованих методів у промислових умовах.

У зв'язку з цим основною задачею даного дослідження є встановлення оптимальних значень основних факторів процесу зневоднення на основі методів планування експерименту з метою забезпечення мінімальної залишкової вологості матеріалу при зниженні енерговитрат та підвищенні продуктивності процесу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблема ефективного зневоднення шламів є однією з ключових у сучасних технологіях переробки відходів та продуктів збагачення, що обумовлено високим вмістом вологи та значними витратами на їх транспортування і утилізацію. За останні роки значна увага приділяється розвитку електрохімічних та комбінованих методів зневоднення, які забезпечують інтенсифікацію процесу та зниження енерговитрат.

У роботі Дєн В. (Deng W.) та інших [1] досліджено ефективність електрозневоднення осадів стічних вод при використанні переривчастої імпульсної напруги. Встановлено, що такий режим електричного впливу сприяє інтенсифікації процесів міграції вологи та зменшенню поляризаційних ефектів у шарі матеріалу. Показано, що застосування імпульсного живлення дозволяє знизити залишкову вологість осаду та одночасно скоротити питомі енергетичні витрати порівняно з традиційними режимами електрозневоднення.

У роботі Лю Ц. (Liu Z.) та інших [2] наведено критичний огляд сучасних фізичних методів кондиціювання шламів перед зневодненням. Розглянуто механічні, термічні та електрофізичні способи обробки, які спрямовані на руйнування структури зв'язаної вологи та покращення фільтраційних властивостей матеріалу. Автори підкреслюють, що попередня обробка є важливим етапом підвищення ефективності процесу зневоднення, особливо при поєднанні з електричними методами впливу.

У роботі Хуан С. (Huang X.) та інших [3] досліджено вплив складу електролітичних добавок на ефективність зневоднення осадів. Встановлено, що оптимізація співвідношення компонентів, зокрема відходів електролітичного виробництва марганцю, дозволяє покращити структурно-механічні властивості шламу та інтенсифікувати процес видалення вологи. Отримані результати свідчать про доцільність використання комбінованих фізико-хімічних підходів для підвищення ефективності зневоднення.

У роботі Ян А. (Yan A.) та інших [4] розглянуто процес зневоднення аеробного гранульованого шламу в умовах центрифугування. Показано, що ефективність видалення вологи суттєво залежить від структури гранул, швидкості обертання та тривалості обробки. Автори відзначають, що поєднання механічних методів із попередньою фізичною або електричною обробкою може значно підвищити ступінь зневоднення та стабільність отриманого продукту.

У роботі Джо С. (Jo S.) та інших [5] розглянуто сучасний стан розвитку технологій електрокоагуляції для обробки стічних вод та осадів. Детально проаналізовано механізми коагуляції під дією електричного струму, зокрема утворення коагулюючих агентів безпосередньо в об'ємі рідини та їх вплив на агрегацію частинок. Показано, що електрокоагуляція сприяє ефективному руйнуванню колоїдних структур і зменшенню вмісту зв'язаної вологи. Автори підкреслюють, що поєднання електрокоагуляції з подальшими процесами зневоднення дозволяє суттєво підвищити загальну ефективність обробки шламів і знизити витрати реагентів та енергії.

У роботі Чжан Ц. (Zhang Q.) та інших [6] досліджено вплив напруги та тиску на процес електрозневоднення шламів. Встановлено, що підвищення напруги сприяє інтенсифікації електроосмотичних потоків і прискоренню видалення вологи, однак надмірні значення можуть призводити до збільшення енергоспоживання та локального перегріву матеріалу. Показано, що оптимальне поєднання електричних та механічних параметрів, зокрема прикладеного тиску, дозволяє досягти максимального ступеня зневоднення. Отримані результати підтверджують необхідність комплексної оптимізації режимів процесу з урахуванням взаємодії факторів.

У роботі Олів'є Ж. (Olivier J.) та інших [7] досліджено основні закономірності процесу

електрозневоднення осадів стічних вод. Розглянуто механізми переносу вологи під дією електричного поля, включаючи електроосмос, джоулеве нагрівання та зміни структури порового простору матеріалу. Показано, що ефективність процесу визначається фізико-хімічними властивостями осаду, електропровідністю та умовами електричного впливу. Автори відзначають, що електрозневоднення є перспективним методом, однак потребує оптимізації конструкції обладнання та режимів роботи для зниження енерговитрат.

У роботі Чжан С. (Zhang X.) та інших [8] наведено узагальнений аналіз сучасних досягнень у галузі зневоднення та утилізації шламів із використанням електрохімічних методів. Розглянуто різні підходи, зокрема електрокоагуляцію, електроокиснення та електрозневоднення, а також їх комбінації. Показано, що застосування електрохімічних процесів дозволяє не лише зменшити вологість матеріалу, але й покращити його подальші технологічні властивості. Особливу увагу приділено питанням енергоефективності та можливостям інтеграції таких методів у промислові системи.

У роботі Ван Ї. (Wang Y.) та інших [9] проаналізовано сучасні електрохімічні технології зневодненя шламів та визначено основні напрями їх розвитку. Розглянуто вплив електричних параметрів, складу матеріалу та умов проведення процесу на ефективність видалення вологи. Встановлено, що найбільш перспективними є комбіновані методи, які поєднують електричний вплив із механічними або термічними способами обробки. Автори наголошують на необхідності подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію режимів роботи та зниження енергетичних витрат процесу.

У роботі Чжан Х. (Zhang H.) та інших [10] досліджено особливості процесу електрозневоднення шламів із акцентом на механізми видалення вологи та зміну структури матеріалу під дією електричного поля. Показано, що поєднання електроосмотичних явищ та внутрішнього тепловиділення забезпечує ефективне зменшення вологості, а також сприяє ущільненню структури осаду. Автори відзначають, що ефективність процесу значною мірою залежить від початкових характеристик шламу, режимів подачі струму та умов дренування, що потребує індивідуального підбору параметрів для різних типів матеріалів.

У роботі Чень Л. (Chen L.) та інших [11] досліджено вплив основних технологічних параметрів на ефективність електрозневоднення. Встановлено, що такі фактори, як напруга, щільність струму, тривалість обробки та товщина шару матеріалу, мають визначальний вплив на кінцеву вологість осаду. Показано наявність нелінійної залежності між параметрами процесу та його результатами, що ускладнює вибір оптимальних режимів без застосування методів математичного планування експерименту. Автори підкреслюють доцільність комплексного підходу до оптимізації процесу з урахуванням взаємодії факторів.

Таким чином, аналіз сучасних наукових досліджень свідчить про високу ефективність електричних та комбінованих методів зневоднення шламів, а також про значний вплив режимних і конструктивних параметрів на кінцеві результати процесу. Разом із тим, питання визначення оптимальних умов проведення процесу з урахуванням взаємного впливу факторів залишається недостатньо дослідженим. Таким чином, тема є актуальною для вирішення задач підвищення ефективності зневоднення та зниження енергоємності процесу шляхом обґрунтування раціональних параметрів комбінованого електротермічного впливу.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених процесам зневоднення шламів, ряд важливих аспектів залишається недостатньо вивченим. Зокрема, у більшості робіт основна увага приділяється окремим методам впливу – електричним, механічним або фізико-хімічним, тоді як питання їх раціонального поєднання та взаємодії в рамках єдиного технологічного процесу розглянуто обмежено.

Недостатньо дослідженим є механізм локального впливу електричного струму на поверхневі шари матеріалу з утворенням пари та формуванням надлишкового тиску, який може інтенсифікувати процес видалення вологи. Відсутні системні дослідження, спрямовані на кількісну оцінку впливу цього явища на загальну ефективність зневоднення.

Крім того, існує проблема визначення оптимальних режимних параметрів процесу з урахуванням їх комплексної взаємодії. Більшість відомих підходів базується на варіюванні окремих факторів без урахування їх сумісного впливу, що обмежує точність отриманих результатів та ускладнює впровадження у промислових умовах.

Також недостатньо уваги приділено розробці енергоефективних режимів роботи обладнання, які забезпечують мінімальну залишкову вологість матеріалу при зниженні витрат енергії.

Таким чином, потребує подальшого дослідження задача визначення оптимальних параметрів комбінованого процесу зневоднення з урахуванням взаємодії електротермічних і фільтраційних механізмів впливу.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є визначення оптимальних параметрів процесу зневоднення продуктів збагачення при комбінованому впливі електричного струму та фільтраційних механізмів на основі методів планування експерименту з метою забезпечення мінімальної залишкової вологості матеріалу при зниженні енерговитрат і підвищенні інтенсивності процесу.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процес зневоднення продуктів збагачення в умовах комбінованого впливу електричного струму та фільтраційних механізмів.

Предметом дослідження є закономірності зміни вологості матеріалу залежно від режимних параметрів процесу, зокрема тиску ущільнення, відстані між електродами, часу дії струму, щільності струму та висоти шару матеріалу.

Експериментальні дослідження виконано на лабораторній установці, що включає систему пластинчастих електродів, герметичний корпус та фільтраційний вузол із перфорованою перегородкою. Живлення електродів здійснювалося від лабораторного автотрансформатора з можливістю регулювання напруги, контроль параметрів проводився за допомогою вимірювальних приладів.

Методика досліджень базується на методі планування експерименту із застосуванням крутого сходження. Для оцінки впливу факторів використано п'ятифакторний план із варіюванням параметрів у заданих інтервалах. Кількість дослідів та структура матриці планування відповідають сучасним підходам до багатофакторного аналізу та забезпечують достатню статистичну достовірність результатів.

Кожен експеримент проводився з дотриманням однакових початкових умов, включаючи початкову вологість матеріалу та стабільність електричних параметрів. Повторність дослідів забезпечувала зменшення випадкових похибок, а отримані результати перевірялися на відтворюваність.

Обробка експериментальних даних здійснювалася з використанням методів регресійного аналізу. Визначено коефіцієнти регресії, оцінено їх статистичну значущість та розраховано похибки експерименту. Отримане рівняння дозволяє адекватно описувати процес зневоднення в досліджуваному діапазоні параметрів.

Для мінімізації впливу сторонніх чинників враховано стабільність температурних умов, однорідність матеріалу, а також забезпечено рівномірність розподілу електричного поля в зоні обробки. Використані методи та підходи відповідають сучасним вимогам до експериментальних досліджень у галузі теплоенергетики та процесів зневоднення і забезпечують можливість відтворення отриманих результатів.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для дослідження закономірностей процесу зневоднення при комбінованому впливі електричного струму та фільтраційного механізму проведено серію експериментальних досліджень у лабораторних

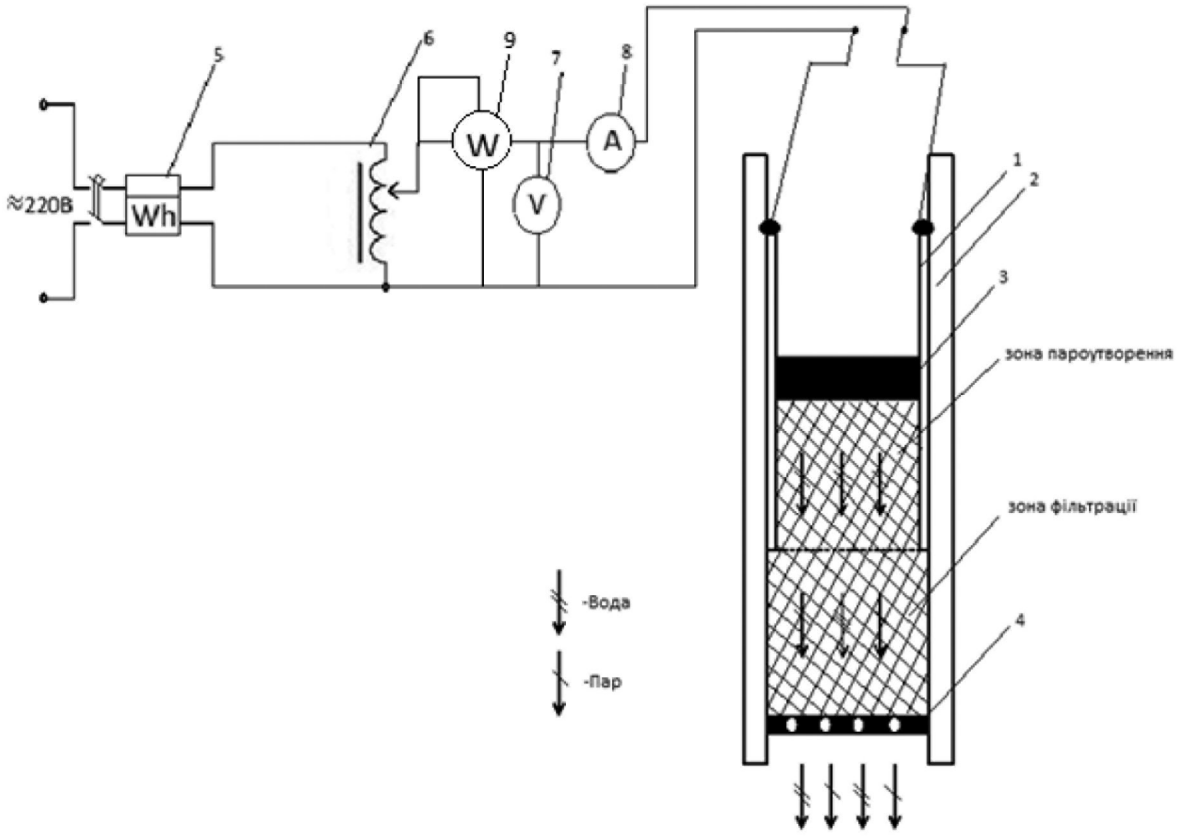


Рис. 1. Лабораторна установка для зневоднення продуктів збагачення комбінованим способом 1 – електроди, 2 – стінки, 3 – герметична прокладка, 4 – перфорована решітка, 5 – лічильник, 6 – лабораторний автотрансформатор, 7 – ватметр, 8 – амперметр, 9 – вольтметр

умовах. Особливу увагу приділено вивченню впливу режимних параметрів на кінцеву вологість матеріалу та визначенню умов інтенсифікації процесу.

Реалізація експериментів здійснювалася на спеціально розробленій лабораторній установці, що забезпечує можливість регулювання основних параметрів процесу.

На основі проведених досліджень запропоновано метод, суть якого полягає у підвищенні продуктивності процесу та зменшенні енерговитрат завдяки впливу електричного струму лише на поверхневий шар матеріалу. Утворена при цьому пара створює локальний надлишковий тиск у зоні пароутворення, що сприяє витісненню вологи в область фільтрації. Таким чином, процес видалення вологи реалізується комбінованим способом. Поєднання дії електричного струму та надлишкового тиску пари забезпечує високу інтенсивність зневоднення за мінімальної енергоємності.

Досягнення поставленої мети забезпечується конструкцією зневоднювального агрегату, який включає пластинчасті електроди, розташовані над матеріалом із можливістю їх занурення для контакту з ним, а також герметичний кожух, встановлений над електродами.

Розроблена лабораторна установка є фрагментом системи та складається з електродів, герметичного корпусу і перфорованої решітки з фільтрувальною тканиною.

Під час подачі напруги на електроди відбувається резистивне нагрівання капілярної вологи з її подальшим випаровуванням за рахунок внутрішніх джерел теплоти. Унаслідок цього у шарі матеріалу між електродами формується підвищений тиск.

У подальшому відбувається фільтрація: пара сприяє переміщенню крапельної вологи із шару матеріалу в зоні фільтрації через перфоровану перегородку, що дозволяє суттєво знизити енергетичні витрати процесу.

Лабораторна установка (рис. 1) є частиною конвеєрної транспортно-зневоднювальної системи, призначеної для сушіння подрібнених продуктів збагачення [12].

Отримані експериментальні дані свідчать про суттєвий вплив режимних параметрів на ефективність процесу зневоднення. Зокрема, встановлено, що збільшення щільності струму та часу його дії сприяє інтенсифікації процесу видалення вологи, що пояснюється підвищенням інтенсивності джоулевого нагрівання та активізацією процесів пароутворення в капілярно-пористій структурі матеріалу.

Визначення оптимальних параметрів процесу виконано за допомогою планування експериментів шляхом крутого сходження.

Необхідно визначити такі параметри процесу, за яких вологість матеріалу була б мінімальною.

Дослідженню підлягає:

Тиск ущільнення, Па – $\mathbf{X}_1$;

Відстань між електродами, см – $\mathbf{X}_2$;

Час дії струму, с – $\mathbf{X}_3$;

Щільність струму, А/см^2 – $\mathbf{X}_4$;

Висота шару матеріалу, см – $\mathbf{X}_5$.

Кодування змінних, їх рівні, одиниця варіювання та матриця планування дослідів представлені у таблиці 1.

За цією матрицею було поставлено вісім дослідів та визначено коефіцієнти регресії за формулою:

$$b_j = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_{ij} Y_i,$$

де b_j – коефіцієнт регресії j-тої колонки матриці;

i – номер досвіду;

j – номер колонки;

n – кількість дослідів у матриці;

Y_i – результат в і-тому досвіді;

X_{ij} – безрозмірна змінна j-тої колонки і-го досвіду.

Приймаємо, що описується поліномом першого ступеня.

Тоді похибка дослідів визначається за такою формулою:

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} W_i - n\sum_{j=1}^{k} b_j^2}{n-k-1}},$$

де σ_w – похибка дослідів;

W_i – Вологість матеріалу, отримана при проведенні і-го досліду;

n – число дослідів у матриці планування;

k – число лінійних членів у рівнянні регресії.

Помилка коефіцієнтів визначається за такою формулою:

$$\sigma_b = \frac{\sigma_w}{\sqrt{n}}.$$

В нашому випадку

$$\sigma_b = 0{,}016.$$

Усі коефіцієнти, крім п’ятого фактора (див. табл. 1), більше похибки.

Так як планування проводилося в наведеній системі координат, то рівняння регресії в цій системі має вигляд:

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \ldots + b_jX_j,$$

де X_j – кодована змінна, вона пов’язана з оригінальною змінною X формулою:

$$X_j = \frac{X_j' - X_j}{S_j'},$$

де b_0; b_1; b_2 – коефіцієнти регресії;

Таблиця 1. Результати планування експериментів для визначення оптимальних параметрів процесу при зневодненні шламів аглофабрики НКГЗК з початковою вологістю 25,7 %

Параметри планування	Фактори, що вивчаються					Функція відгуку
	Тиск ущільнення, кПА X_1	Відстань між електродами, см X_2	Час зневоднення X_3	Щільність струму, А/см^2 X_4	Висота шару, см X_5	Вологість матеріалу %
Основний рівень	40	14	30	0,22	15	
Одиниці	10	2	2	0,02	1	
варіювання	30	12	28	0,2	14	
Нижній рівень	50	16	32	0,24	16	
Номери дослідів						13,2
1	–	–	–	–	–	
2	–	–	+	+	+	11,1
3	–	+	–	+	+	12,6
4	–	+	+	–	–	12,3
5	+	–	–	+	–	11,5
6	+	–	+	–	+	11,2
7	+	+	–	–	+	12,7
8	+	+	+	+	–	10,5
Коефіцієнти	+0,413	–0,138	+0,613	+0,463	0	
Одиничний крок	4	–0,3	1	0,01	0	
Номери дослідів						
9	44	13,7	31	0,23	15	10,1
10	48	13,4	32	0,24	–	–
11	52	13,1	33	0,25	–	10,0
12	56	12,8	34	0,26	–	9,9
13	60	12,5	35	0,27	–	9,9

X_1; X_2; X_j – значення факторів аргументів;

X_1^0; X_2^0; X_j^0 – нульове (базове) значення факторів при плануванні дослідів;

S_1; S_2; S_j – одиниця варіювання факторів.

Для нашого випадку рівняння, яке описує результати дослідів, має вигляд:

$$W = 11{,}887 - 0{,}413\frac{X_1 - 40}{10} + 0{,}138\frac{X_2 - 140}{20} - 0{,}613\frac{X_3 - 30}{2} - 0{,}463\frac{X_4 - 0{,}22}{0{,}02}.$$

Так як вологість матеріалу потрібно мінімізувати, то при визначенні одиничного кроку зміни факторів знак коефіцієнтів змінюємо зворотний.

Величина одиничного кроку зміни факторів визначається за такою формулою:

$$\Delta_j = Sb_j,$$

де Δ_j – величина одиничного кроку зміни j-го фактора.

Коефіцієнти регресії та поодинокі кроки для кожного фактора наведені у таблиці 1.

Досліди проведено через один крок зміни фактора. Відмінність результатів дослідів 12 та 13 не перевищує помилку експерименту; це свідчить про те, що досягнуто майже стаціонарної області.

Умови досліду 12 оптимальні для отримання низької вологості.

Таким чином, визначено оптимальні параметри процесу:

– Тиск ущільнення – 56 кПа;

– Відстань між електродами – 12,8 см;

– Час дії струму – 34 с;

– Щільність струму – 0,26 А/см^2;

– Висота шару матеріалу – 15 см.

Встановлено, що ключову роль у процесі відіграє формування локального надлишкового тиску пари у зоні між електродами. На відміну від класичних підходів, де переважає електроосмотичний перенос вологи, у даному випадку додатково реалізується механізм витіснення рідини під дією парового тиску. Це забезпечує більш інтенсивне переміщення вологи у напрямку фільтраційної поверхні.

Аналіз коефіцієнтів регресії показав, що найбільший вплив на кінцеву вологість матеріалу мають щільність струму та час його дії, тоді як висота шару матеріалу в досліджуваному діапазоні не є статистично значущим фактором. Це може бути пов'язано з тим, що основні процеси тепломасопереносу локалізуються у верхніх шарах матеріалу, де безпосередньо діє електричний струм.

Таким чином, наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні механізму комбінованого впливу електричного струму та парового тиску на процес зневоднення, а також у визначенні оптимальних режимних параметрів з урахуванням їх взаємодії.

На відміну від існуючих підходів, запропонований метод передбачає локалізований вплив струму, що дозволяє суттєво знизити енерговитрати при збереженні високої інтенсивності процесу.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Отримані результати підтверджують загальні закономірності процесів електрозневоднення, наведені в сучасних дослідженнях. Зокрема, встановлений суттєвий вплив щільності струму та тривалості його дії узгоджується з висновками робіт [6, 11], де показано, що саме електричні параметри визначають інтенсивність процесів тепломасопереносу та кінцеву вологість матеріалу.

Разом з тим, на відміну від класичних підходів до електрозневоднення, у яких основний механізм пов'язаний з електроосмосом [7], у даному дослідженні встановлено значну роль локального пароутворення. Це узгоджується з результатами робіт [10], де відзначається вплив внутрішнього тепловиділення на зміну структури матеріалу, однак у представленій роботі додатково показано, що саме утворення пари створює надлишковий тиск, який інтенсифікує фільтраційне видалення вологи.

Порівняння з дослідженнями [3, 5] свідчить, що досягнутий рівень зниження вологості є співставним або вищим, ніж у випадках застосування фізико-хімічних методів обробки. При цьому запропонований підхід не потребує використання додаткових реагентів, що є його суттєвою перевагою з точки зору енергоефективності та технологічної простоти.

Отримані залежності також підтверджують висновки роботи [11] щодо нелінійного характеру впливу параметрів процесу. Виявлена відсутність значущого впливу висоти шару матеріалу в межах досліджуваного діапазону може бути пояснена локалізацією зони активного тепловиділення поблизу електродів, що обмежує вплив геометричних характеристик шару на кінцевий результат.

Слід зазначити, що результати дослідження отримано для конкретного типу матеріалу та лабораторних умов, що може обмежувати їх безпосереднє перенесення на промислові об'єкти без додаткової перевірки. Разом з тим, встановлені закономірності мають загальний характер і можуть бути використані як основа для подальших досліджень і масштабування процесу.

Таким чином, гіпотеза про можливість інтенсифікації процесу зневоднення за рахунок комбінованого впливу електричного струму та фільтраційного механізму повністю підтверджується. Зокрема, доведено, що локальний електричний нагрів призводить до утворення пари та формування надлишкового тиску, який суттєво підсилює процес видалення вологи. Крім того, підтверджено доцільність комплексної оптимізації режимних параметрів, що забезпечує досягнення мінімальної вологості матеріалу при зниженні енергетичних витрат.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що комбінований вплив електричного струму та фільтраційного механізму забезпечує інтенсифікацію процесу зневоднення за рахунок додаткового ефекту локального пароутворення, яке формує надлишковий тиск і прискорює видалення вологи з капілярно-пористої структури матеріалу.

Доведено, що визначальними параметрами процесу є щільність струму та тривалість його дії, тоді як вплив геометричних характеристик шару в досліджуваному діапазоні є обмеженим. Це уточнює існуючі уявлення про домінуючі механізми електрозневоднення, в яких переважно враховується електроосмотичний перенос.

Визначено оптимальні режимні параметри процесу, що забезпечують мінімальну залишкову вологість матеріалу при знижених енергетичних витратах, що підтверджує ефективність використання методів багатофакторного планування експерименту для задач оптимізації.

Отримані результати розширюють сучасні підходи до електрозневоднення, доповнюючи їх уявленням про суттєву роль пародинамічних ефектів у зоні дії електричного струму, що частково пояснює розбіжності між теоретичними та експериментальними даними, наведеними в попередніх дослідженнях.

Практичне значення результатів полягає у можливості створення енергоефективних технологій зневоднення без застосування додаткових реагентів, що спрощує технологічну схему та знижує експлуатаційні витрати.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вивчення масштабування процесу в промислових умовах, аналіз впливу властивостей різних типів шламів.

REFERENCES

[1] Deng, W., Xie, X., Zhou, J., Wang, L., Chen, G., & Su, Y. (2024). Electro-dewatering performance of sewage sludge under interrupted pulsating voltage. *Chemosphere, 358*, 142265. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142265

[2] Liu, Z., Luo, F., He, L., Wang, S., Wu, Y., & Chen, Z. (2024). Physical conditioning methods for sludge deep dewatering: A critical review. *Journal of Environmental Management, 360*, 121207. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121207

[3] Huang, X., Wang, J., Xue, F., Zhao, X., Shi, Z., Liang, Q., & Wang, H. (2024). Investigating the dewatering efficiency of sewage sludge with optimized ratios of electrolytic manganese residue components. *Materials, 17*(14), 3605. https://doi.org/10.3390/ma17143605

[4] Yan, A., Chen, Y., Li, N., Ma, T., Qi, Y., & Xu, D. (2024). Dewatering performance of aerobic granular sludge under centrifugal conditions. *Frontiers in Microbiology, 15*, 1386557. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1386557

[5] Jo, S., Kadam, R., Jang, H., Seo, D., & Park, J. (2024). Recent advances in wastewater electrocoagulation technologies. *Energies, 17*(23), 5863. https://doi.org/10.3390/en17235863

[6] Zhang, Q., Cui, G., He, X., Wang, Z., Tang, T., Zhao, Q., & Liu, Y. (2022). Effects of voltage and pressure on sludge electro-dewatering process. *Environmental Research, 212*, 113490. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113490

[7] Olivier, J., Conrardy, J.-B., Mahmoud, A., & Vaxelaire, J. (2015). Electro-dewatering of wastewater sludge. *Water Research, 82*, 66–77. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.006

[8] Zhang, X. et al. (2025). Progress of sludge dewatering and disposal based on electrochemical treatment processes. *Chemical Engineering Journal, 524*, 168774. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.168774

[9] Wang, Y. et al. (2023). Recent advances in electrochemical treatment technologies for sludge dewatering. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 100341. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100341

[10] Zhang, H. et al. (2020). Electro-dewatering treatment of sludge. *Journal of Environmental Management, 268*, 110689. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110689

[11] Chen, L. et al. (2020). Impact of process parameters on electro-dewatering performance. *Drying Technology, 40*(1), 213–225. https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1806864

[12] Zamytskyi O. V., Bondar N. V., Kradozhon S. O. Laboratory studies of the combined method of dehydration by internal heat sources under electric heating conditions. Bulletin of the Institute of Informatics. Issue 1. P. 21–27, Berez. 2022. DOI: 10.31649/1997-9266-2022-160-1-21-27

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Deng, W., Xie, X., Zhou, J., Wang, L., Chen, G., & Su, Y. (2024). Electro-dewatering performance of sewage sludge under interrupted pulsating voltage. *Chemosphere, 358*, 142265. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142265

[2] Liu, Z., Luo, F., He, L., Wang, S., Wu, Y., & Chen, Z. (2024). Physical conditioning methods for sludge deep dewatering: A critical review. *Journal of Environmental Management, 360*, 121207. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121207

[3] Huang, X., Wang, J., Xue, F., Zhao, X., Shi, Z., Liang, Q., & Wang, H. (2024). Investigating the dewatering efficiency of sewage sludge with optimized ratios of electrolytic manganese residue components. *Materials, 17*(14), 3605. https://doi.org/10.3390/ma17143605

[4] Yan, A., Chen, Y., Li, N., Ma, T., Qi, Y., & Xu, D. (2024). Dewatering performance of aerobic granular sludge under centrifugal conditions. *Frontiers in Microbiology, 15*, 1386557. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1386557

[5] Jo, S., Kadam, R., Jang, H., Seo, D., & Park, J. (2024). Recent advances in wastewater electrocoagulation technologies. *Energies, 17*(23), 5863. https://doi.org/10.3390/en17235863

[6] Zhang, Q., Cui, G., He, X., Wang, Z., Tang, T., Zhao, Q., & Liu, Y. (2022). Effects of voltage and pressure on sludge electro-dewatering process. *Environmental Research, 212*, 113490. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113490

[7] Olivier, J., Conrardy, J.-B., Mahmoud, A., & Vaxelaire, J. (2015). Electro-dewatering of wastewater sludge. *Water Research, 82*, 66–77. https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.006

[8] Zhang, X. et al. (2025). Progress of sludge dewatering and disposal based on electrochemical treatment processes. *Chemical Engineering Journal, 524*, 168774. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.168774

[9] Wang, Y. et al. (2023). Recent advances in electrochemical treatment technologies for sludge dewatering. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 100341. https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100341

[10] Zhang, H. et al. (2020). Electro-dewatering treatment of sludge. *Journal of Environmental Management, 268*, 110689. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110689

[11] Chen, L. et al. (2020). Impact of process parameters on electro-dewatering performance. *Drying Technology, 40*(1), 213–225. https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1806864

[12] Замицький О. В., Бондар Н. В., Крадожон С. О. Лабораторні, дослідження комбінованого методу зневоднення внутрішніми джерелами теплоти в умовах електричного нагріву. Вісник ВПІ. Вип. 1. С. 21–27. Берез. 2022. DOI: 10.31649/1997-9266-2022-160-1-21-27.

© Замицький О. В., Крадожон С. О., Сербіна А. О.
Дата першого надходження статті до видання: 23.06.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.07.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)