

ЗНЕВОДНЕННЯ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД ЗА ДОПОМОГОЮ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Орест Вербовський¹, Вадим Орел², Оксана Мацієвська³, Давид Деркач⁴

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

¹ канд. тех. наук, orest.v.verbovskyi@lpnu.ua, orcid.org/0000-0002-0410-7871

² канд. тех. наук, vadym.i.orel@lpnu.ua, orcid.org/0000-0002-3518-4597

³ канд. тех. наук, oksana.o.matsiievska@lpnu.ua, orcid.org/0000-0001-5784-0236

⁴ davyd.derkach.mhbvi.2021@lpnu.ua, orcid.org/0000-0002-1084-8924

DOI: 10.32347/2524-0021.2022.40.16-25

Анотація. Під час очищення та доочищення комунальних стічних вод утворюються осади, які надзвичайно небезпечні у санітарно-гігієнічному відношенні, погано зневоднюються, мають високу вологість (понад 90 %), великі об'єми (до 3 % від витрати стічних вод), містять у собі органічні речовини, патогени, важкі метали тощо. В Україні на більшості каналізаційних очисних станцій осади стічних вод переважно нагромаджують на мулових майданчиках після мінімальної обробки. Ефективна обробка та утилізація осадів з метою зменшення негативного впливу на довкілля, а також використання осадів як вторинної сировини є актуальним, складним та невідкладним завданням. Ключовою ланкою в існуючому процесі обробки та утилізації осадів є їх зневоднення. При проектуванні споруд оброблення й утилізації осадів стічних вод слід застосовувати прогресивні технології, використання яких базується на науково-технічних дослідженнях. У статті оглянуто результати досліджень щодо інтенсифікації існуючих механічних способів обробки осадів. Одним із найефективніших способів інтенсифікації процесу зневоднення осадів стічних вод є електрозневоднення, яке передбачає застосування електричного поля під час механічного зневоднення осадів. Технологія електрозневоднення дає змогу зменшити вологість осадів до 20...40 %, зменшити концентрацію важких металів та патогенів в осадах тощо. Метою даної роботи є дослідження можливості електрозневоднення активного мулу із вторинних відстійників міських каналізаційних очисних споруд м. Львів. Використовували емпіричні методи дослідження. Для електрозневоднення осаду стічних вод запроєктовано лабораторний стенд. Досліджували активний мул вологістю 98%. Показано, що ефект зневоднення активного мулу залежно від тривалості його оброблення являє собою S-подібну криву, що нагадує кінетичну автокаталітичну реакцію з трьома періодами: індукції, основним, загасаючим. Доведено можливість електрозневоднення осадів стічних вод з максимальним ефектом зневоднення 60 %. Тому пропонується проводити механічне зневоднення осадів міських стічних вод із застосуванням електричного поля.

Ключові слова: каналізаційні очисні споруди, осади стічних вод, активний мул, зневоднення, електрозневоднення.

ВСТУП

Під час очищення та доочищення комунальних стічних вод утворюються осади, в яких сконцентрована основна маса домішок, вилучених зі стічних вод.

Сирий осад з первинних відстійників, надлишковий активний мул і надлишкова біоплівка загнивають з утворенням неприємних запахів. Вони надзвичайно небезпечні у санітарно-гігієнічному відношенні, погано зневоднюються, мають високу вологість (понад 90 %), великі об'єми (до 3 % від витрати стічних вод). Осади характеризують неоднорідністю складу та властивостей, вони містять у собі органічні речовини, патогени, важкі метали тощо.

Основними методами обробки осадів стічних вод є їх ущільнення, стабілізація, кондиціонування, зневоднення, термічне сушіння та спалювання.

Традиційно в Україні ущільнюють надлишковий активний мул вологістю 99,2...99,7 %. Вологість ущільненого мулу становить 94...98 %. В окремих випадках ущільнюють суміш надлишкового активного мулу та сирого осаду. Для цього використовують гравітаційні та флотаційні методи, а також згущення у полі відцентрових сил на центрифугах і сепараторах.

Зневоднення здійснюють природним підсушуванням стабілізованих осадів на мулових майданчиках до вологості 80...85 % або механічним зневодненням попередньо кондиціонованих стабілізованих або сирих осадів на вакуум-фільтрах, фільтрпресах або центрифугах до вологості 65...75 %.

Для додаткового зменшення вологості осадів до 5...40 % після механічного зневоднення здійснюють їх *термічне сушіння* у сушарках. За неможливості утилізації, нестачі територій для заховання або за вмісту в осадах токсичних домішок їх *спалюють* у спеціальних печах.

Впровадження вказаних методів потребує застосування реагентів та обладнання, характеризується високою вартіс-

тю, трудовитратами, енергоємністю тощо. Тому в Україні на більшості каналізаційних очисних станцій осади стічних вод переважно нагромаджують на мулових майданчиках після мінімальної обробки. Такі осади займають значні площі земельних ділянок, не відповідають вимогам захисту довкілля, а отже є потенційним джерелом забруднення. Значна вологість осадів, а отже об'єм і маса, ускладнюють їх зберігання, обробку та безпосередньо призводять до значних затрат на їх транспортування. Зазвичай витрати на обробку та утилізацію осадів становлять 25...50% від усього бюджету експлуатації очисних споруд [1].

Тому ефективна обробка та утилізація осадів з метою зменшення негативного впливу на довкілля, а також використання осадів як вторинної сировини є актуальним, складним та невідкладним завданням. Ключовою ланкою в існуючому процесі обробки та утилізації осадів є їх зневоднення.

Згідно з ДБН В.2.5-75:2013 "Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування", під час проектування споруд водовідведення слід передбачати застосування прогресивних технологій обробки та утилізації осадів. При цьому нові технологічні процеси використовують під час проектування на підставі проведення науково-технічних досліджень.

Протягом останніх двох десятиліть проводили дослідження інтенсифікації існуючих механічних способів обробки осадів. Інтенсифікація процесу зневоднення може мати декілька форм: поєднання механічних (тиск) і теплових (температура) впливів [2; 3]; поєднання тиску та електричного поля [4–6]; накладання ультразвукового та/або магнітного полів [7; 8]; дія комбінованих полів (наприклад, одночасний вплив електричного та ультразвукового) [9].

Одним із найефективніших способів інтенсифікації процесу зневоднення осадів стічних вод є електрозневоднення, яке передбачає застосування електрич-

ного поля під час механічного зневоднення осадів [10–12]. Більшість процесів механічного зневоднення включає два етапи. Перший – утворення фільтраційної шару осаду, другий – стиснення, коли вільну та фізико-механічно зв'язану воду вичавлюють з кеку завдяки застосуванню тиску. Електричне поле може бути застосоване до однієї або обох стадій зневоднення, або до чи після процесу зневоднення осадів [10].

В оглянутих дослідженнях використовували обладнання у вигляді камер, колонок і резервуарів круглої або прямокутної форми різних розмірів. Досліджували різноманітне розташування електродів – горизонтальне, вертикальне, коаксіальне тощо.

Порівняно з методами електрозневоднення, які працюють у вертикальному електричному полі, методи горизонтального електрозневоднення мають переваги з точки зору простоти конструкції, високої ефективності та легкості експлуатації [13].

Виявлено, що більша напруга або електричне поле призводить до найкращого зневоднення осадів [14]. Проте, більш висока прикладена напруга призводить до більшого споживання енергії [4]. Також доведено енергоефективність електрозневоднення осадів порівняно з їх термічним сушінням [14].

Досліджено різноманітні варіанти інтенсифікації зневоднення осадів стічних вод за допомогою електричного поля як безпосередньо, так і під тиском – необроблених осадів, зброджених в анаеробних умовах, після механічного зневоднення тощо. Результати досліджень свідчать, що кінетика електрозневоднення під тиском значно краща, ніж електрозневоднення без тиску. Вміст сухих твердих речовин в електрозневоднених під тиском осадах значно більший порівняно з механічно зневодненими осадами. Ця величина сягає значення понад 40 % [4; 10; 15; 16].

В експериментах без тиску швидкість видалення води значно залежить від ти-

пу осаду та його рН. Найбільшу швидкість зневоднення одержано для анаеробно зброджених осадів [16].

Збільшення напруги під час електрозневоднення без тиску дало змогу зменшити тривалість електрозневоднення та досягти кращих показників вилучення води. Наприклад, збільшення напруги від 3 до 10 В збільшило вміст сухих речовин в осаді. Проте, збільшення напруги від 10 до 30 В істотно не вплинуло на їх вміст [1]. Але в експериментах з тиском одержано протилежну картину [4].

Цікаво, що прикладене електричне поле покращує кінетику зневоднення незалежно від кондиціонування осадів [17].

Також електрозневоднення дає змогу зменшити концентрацію мінеральних та органічних речовин в осадах стічних вод [108].

Доведено позитивний вплив електрозневоднення механічно зневоднених осадів (наприклад, на стрічковому фільтрпресі) на наступне їх сушіння за низької температури повітря. Така комбінована технологія дає змогу зменшити вологість осадів до 20 % та є енергоефективною [18].

В Європейському Союзі 30 % осадів стічних вод повторно використовують як добриво у сільському господарстві [19]. Вміст важких металів в осадах стічних вод обмежує їх утилізацію в сільському господарстві. Електрозневоднення значно зменшує концентрацію Zn, Mn, Pb, Cd, Ni в них [20].

Утилізація осадів у сільському господарстві вимагає мінімізувати ризики для здоров'я людини, пов'язані із вмістом в осадах патогенів. Результати застосування електричного поля до кондиціонованих та механічно зневоднених осадів свідчать про значне зменшення активної бактеріальної популяції. Разом з тим концентрація поживних для ґрунту речовин (азот, фосфор і сірка) не змінилася [21].

МЕТА І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є дослідження можливості електрозневоднення осадів з міських каналізаційних очисних споруд (МКОС) м. Львів. Використовуватимуться емпіричні методи дослідження.

ОПИС ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Для електрозневоднення осадів стічних вод запроєктовано лабораторний стенд (рис. 1). Вертикальну циліндричну посудину 2 закріплюють на штативі 1. Катод 3 з неіржавіючої сталі встановлюють нерухомо на дніщі посудини 2. На кришці 5 за допомогою ущільнення 6 закріплюють рухомий графітовий анод 4 діаметром 8 мм з ізольованою поверхнею. Анод можна закріпити на різних відстанях від катода. До електродів від випрямляча струму 7 подають електричний струм певної напруги. Випрямляч 7 приєднують до електромережі змінного струму напругою 220 В.

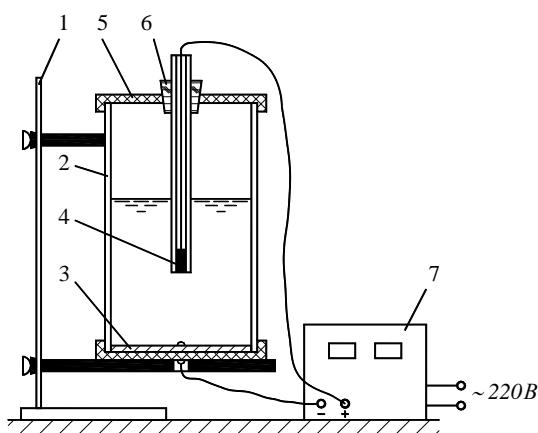


Рис. 1. Схема лабораторного стенду для електрозневоднення осадів стічних вод: 1 – штатив лабораторний; 2 – циліндрична посудина; 3 – катод; 4 – анод; 5 – кришка; 6 – ущільнювач; 7 – випрямляч електричного струму

Fig. 1. The laboratory-scale device for electro-dewatering of sewage sludge scheme: 1 – laboratory tripod; 2 – cylindrical capacity; 3 – cathode; 4 – anode; 5 – lid; 6 – sealing insert; 7 – electric-current rectifier

Електрозневоднення осаду стічних вод проводять за кімнатної температури. Заповнюють посудину 2 порцією осаду на певну висоту та закривають її кришкою 5. Виставляють відстань між катодом 3 та анодом 4. Вмикають випрямляч електричного струму 7 до електромережі. Виставляють струм з певною напругою. Одночасно розпочинають відлік тривалості оброблення осаду. Під дією електричного струму відбувається відстоювання осаду з досить чіткою границею між верхнім шаром мулу та нижнім шаром води (рис. 2). При цьому висоту шару проясненої води вимірюють через певні проміжки часу. Після заданої тривалості оброблення осаду випрямляч 7 вимикають.

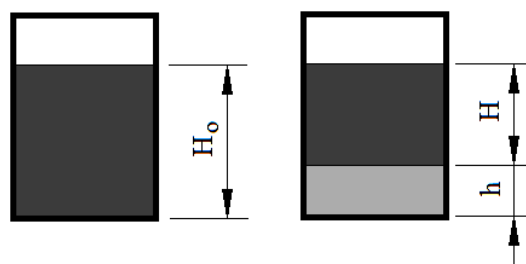


Рис. 2. Схема вимірювання висоти шару води в циліндричній посудині лабораторного стенду за тривалості оброблення осаду стічних вод $t_0 = 0$ (зліва) та t (справа)

Fig. 2. The scheme of measuring the height of the water layer in the cylindrical capacity of the laboratory-scale device for the duration of sewage sludge treatment $t_0 = 0$ (left) and t (right)

У дослідженні використовували пластмасову вертикальну циліндричну посудину з внутрішнім діаметром 70 мм; відстань між електродами становила 55 мм; електрична напруга – 12 В; тривалість оброблення осаду – 1 год; висоту шару проясненої води вимірювали кожні 15 хв.

Вміст твердих речовин в осаді стічних вод, %

$$M = 100 - W; \quad (1)$$

де W – вологість осаду, %; за [22]

$$W = W_0 - (h/H_0)/100; \quad (2)$$

W_0 – початкова вологість осаду, $W_0 = 98\%$; h/H_0 – ефект зневоднення осаду, $h/H_0 = f(t, U)$; t – тривалість оброблення осаду; U – електрична напруга, $U = 12$ В; h – висота шару води, мм (рис. 3);

$$h = H_0 - H; \quad (3)$$

H_0 – початкова висота шару невідстоюючого осаду за тривалості $t_0 = 0$, $H_0 = 100$ мм;

H – висота шару осаду за тривалості t .

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Об'єктом дослідження є активний мул з вторинних відстійників МКОС м. Львів вологістю 98%.

Зміна вмісту твердих речовин (рис. 3) являє собою S-подібну криву, що нагадує кінетичну автокаталітичну реакцію з трьома періодами: індукції, основним та загасаючим. За початкової тривалості оброблення до $t = 10$ хв висота шару води є малою, що вказує на період індукції утворення твердих речовин в осаді. За основного періоду спостерігається експоненційне збільшення утворення твердих речовин. Кінець цього періоду приблизно відповідає тривалості оброблення $t = 20$ хв. Після цього настає загасаючий період з виходом на асимптоту.

Під час оброблення кондиційованого активного мулу з МКОС Lescar (м. По, Франція) електричним струмом накопичення вмісту твердих речовин також описується S-подібною кривою (рис. 3). Період індукції починався після попередньої фільтрації/компресії за тиску 400 кПа тривалістю 2 год [4].

Вміст твердих речовин при обробленні мулу з вторинних відстійників МКОС м. Тернопіль вологістю 98% електричним струмом у лабораторних умовах в U-подібній пробірці з вугільними електродами за напруги $U = 30$ В за зміни тривалості оброблення з $t = 24$ год до $t = 48$ год [23] змінювався у загасаючому періоді S-подібної кривої в межах 32%...37%.

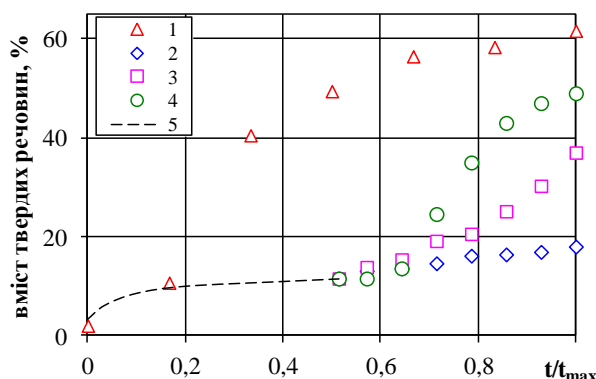


Рис. 3. Вміст твердих речовин під час електрозневоднення: 1 – активний мул з МКОС (м. Львів, Україна) при напрузі 12 В; 2 – 5 – кондиційований активний мул з МКОС Lescar (м. По, Франція) при напрузі 10 В (2); 20 В (3); 30 В (4) після попередньої фільтрації/компресії при тиску 400 кПа тривалістю 2 год (5) та з наступним сушінням при температурі 105°C упродовж 24 год [4] (t_{\max} – максимальна тривалість оброблення осаду стічних вод)

Fig. 3. Solids content during electro-dewatering of sewage sludge experiments at an applied voltage of: (1) 12 V, activated sludge sampled from the wastewater treatment plant (Lviv, Ukraine) and (2) 10 V, (3) 20 V, (4) 30 V, conditioned activated sludge sampled from the Lescar wastewater treatment plant (Pau, France) after (5) conventional filtration/compression under pressure of 400 kPa during 2 h and drying at 105°C during 24 h [4] (t_{\max} is maximum time of electrical conditioning of sewage sludge)

Результати з одержання вмісту твердих речовин після оброблення активного мулу МКОС Lescar, м. По та МКОС м. Львів і МКОС м. Тернопіль можна порівняти лише кількісно. Якісно це зробити неможливо, оскільки в першому випадку одержано вміст сухих твердих речовин.

Ефект зневоднення під час оброблення мулу з вторинних відстійників МКОС м. Львів за нашого дослідження можна також описати S-подібною кривою (рис. 4), що повністю нагадує зміну вмісту твердих речовин (рис. 3).

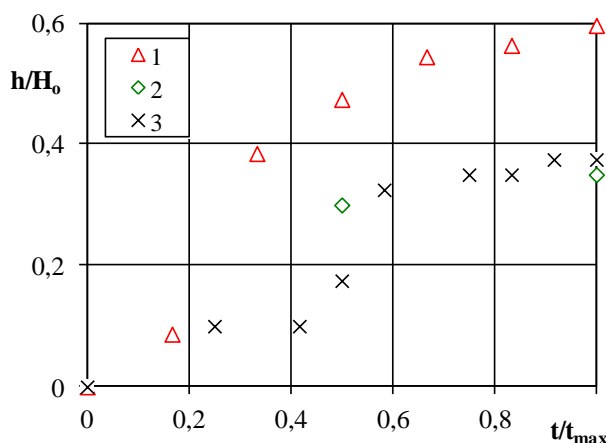


Рис. 4. Ефект зневоднення активного мулу з вторинних відстійників під час обробки електричним струмом: 1 – МКОС м. Львів (Україна) при напрузі 12 В; 2 – МКОС м. Тернопіль (Україна) при напрузі 30 В [23] та суміші первинного осаду та активного мулу НВЧ-випромінюванням потужністю 0,8 кВт; 3 – МКОС м. Тюмень (Росія) [25]

Fig. 4. Effect of dewatering in experiments with electrical current of activated sludge from secondary clarifiers of: (1) wastewater treatment plant (Lviv, Ukraine) at an applied voltage of 12 V; (2) wastewater treatment plant (Terнопil, Ukraine) at an applied voltage of 30 V [23] and (3) effect of dewatering in experiments with microwave radiation with a power of 0.8 kW of a mixture of primary sewage sludge and activated sludge from a wastewater treatment plant (Tyumen, Russia) [25]

Середній ефект зневоднення під час оброблення активного мулу з вторинних відстійників МКОС м. Львів у скляній вертикальній циліндричній посудині з внутрішнім діаметром 60 мм за відстані між електродами 50 мм (стаціонарний катод з неіржавіючої сталі, рухомий анод з графіту) за електричної напруги 20 В, тривалості оброблення мулу 1 год та вимірюванні висоти шару води кожні 10 хв становив 0,30...0,35 за тривалості оброблення $t = 30$ хв. Ефект мав S-подібну залежність з горизонтальною лінією при $t = 30$ хв, що свідчить про прихований період оптимальної тривалості електрозневоднення [24]. Подібне

спостерігалось під час зневоднення суміші сирого осаду та активного мулу МКОС м. Тюмень (Росія) НВЧ-випромінюванням потужністю 0,8 кВт [25], коли прихований період є після періоду індукції S-подібної кривої (рис. 4). Але тут тверді речовини осаджувалися на днище посудини.

Ефект зневоднення під час оброблення мулу з вторинних відстійників МКОС м. Тернопіль [23] є в загасаючому періоді (рис. 4).

Отже, оцінено, що можливість зневоднення осаду стічних вод після обробки електричним струмом може досягати 60%.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Доведено можливість електрозневоднення осадів МКОС м. Львів з максимальним ефектом зневоднення 60%. Тому пропонується проводити механічне зневоднення осадів міських стічних вод із застосуванням електричного поля.

Для впровадження даної пропозиції необхідні подальші експериментальні дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Pham, A. T., Sillanpää, M., Virkutyte, J.** Sludge dewatering by sand-drying bed coupled with electro-dewatering at various potentials // International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2010, 24(2), 151-162. <https://doi.org/10.1080/17480930903132620>
2. **Mahmoud, A., Fernandez, A., Chituchi, T. M., Arlabosse, P.** Thermally assisted mechanical dewatering (TAMD) of suspensions of fine particles: analysis of the influence of the operating conditions using the response surface methodology // Chemosphere, 2008, 72(11), 1765–1773. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.075>
3. **Couturier, S., Valat, M., Vaxelaire, J., Puiggali, J. R.** Enhanced expression of filter cakes using a local thermal supply // Separation and Purification Technology, 2007, 57(2), 321-328. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.04.020>
4. **Olivier, J., Mahmoud, A., Vaxelaire, J., Conrardy, J. B., Citeau, M., Vorobiev, E.**

- Electro-Dewatering of Anaerobically Digested and Activated Sludges: An Energy Aspect Analysis // *Drying Technology*, 2014, 32(9), 1091–1103.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2014.884133>
5. Lee, J. E., Lee, J. K., Choi, H. K. Filter press for electro-dewatering of waterworks sludge // *Drying Technology*, 2007, 25(12), 1985–1993.
<https://doi.org/10.1080/07373930701727333>
6. Curvers, D., Maes, K. C., Saveyn, H., De Baets, B., Miller, S., Van der Meeren, P. Modelling the electro-osmotically enhanced pressure dewatering of activated sludge // *Chemical Engineering Science*, 2007, 62(8), 2267–2276.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.085>
7. Eichholz, C., Stolarski, M., Goertz, V., Nirschl, H. Magnetic field enhanced cake filtration of superparamagnetic PVAc-particles // *Chemical engineering science*, 2008, 63(12), 3193–3200.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.03.034>
8. Smythe, M. C., Wakeman, R. J. The use of acoustic fields as a filtration and dewatering aid // *Ultrasonics*, 2000, 38(1–8), 657–661.
[https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00147-X](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00147-X)
9. Wakeman, R. J., Smythe, M. C. Clarifying filtration of fine particle suspensions aided by electrical and acoustic fields // *Chemical Engineering Research and Design*, 2000, 78(1), 125–135.
<https://doi.org/10.1205/026387600526960>
10. Mahmoud, A., Olivier, J., Vaxelaire, J., Hoadley, A. F. Electrical field: a historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering // *Water research*, 2010, 44(8), 2381–2407.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.01.033>
11. Tuan, P.-A., Sillanpää, M., Isoaari, P. Sewage sludge electro-dewatering treatment – a review // *Drying Technology*, 2012, 30(7), 691–706.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2012.654874>
12. Olivier, J., Mahmoud, A., Vaxelaire, J., Conrardy, J.-B., Citeau, M., Vorobiev, E. Electro-dewatering of anaerobically digested and activated sludges: an energy aspect analysis // *Drying Technology*, 2014, 32 (9), 1091–1103.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2014.884133>
13. Zhou, J., Liu, Z., She, P., Ding, F. Water removal from sludge in a horizontal electric field // *Drying Technology*, 2001, 19(3–4), 627–638.
<https://doi.org/10.1081/DRT-100103939>
14. Saveyn, H., Van der Meeren, P., Pauwels, G., Timmerman, R. Bench- and pilot-scale sludge electro-dewatering in a diaphragm filter press // *Water science and technology*, 2006, 54(9), 53–60.
<https://doi.org/10.2166/wst.2006.725>
15. Yuan, C., Weng, C. H. Sludge dewatering by electrokinetic technique: effect of processing time and potential gradient // *Advances in Environmental research*, 2003, 7(3), 727–732.
[https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00030-8)
16. Tuan, P. A., Jurate, V., Mika, S. Electro-dewatering of sludge under pressure and non-pressure conditions // *Environmental technology*, 2008, 29(10), 1075–1084.
<https://doi.org/10.1080/09593330802180294>
17. Saveyn, H., Pauwels, G., Timmerman, R., Van der Meeren, P. Effect of polyelectrolyte conditioning on the enhanced dewatering of activated sludge by application of an electric field during the expression phase // *Water research*, 2005, 39(13), 3012–3020.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.002>
18. Lv, H., Xiong, Q., Liu, D., Wu, X. Coupling electro-dewatering and low-temperature air-drying for efficient dewatering of sludge // *Scientific reports*, 2021, 11(1), 19167.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-98477-9>
19. Sánchez, C. H., Gutiérrez, Á., Galindo, J. M., González-Weller, D., Rubio, C., Revert, C., ... Hardisson, A. Heavy metal content in sewage sludge: a management strategy for an Ocean Island // *Revista de salud ambiental*, 2017, 17(1), 3–9.
20. Hwang, S., Min, K. S. Improved sludge dewatering by addition of electro-osmosis to belt filter press // *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2003, 2(2), 149–153.
<https://doi.org/10.1139/s03-013>
21. Rumky, J., Visigalli, S., Turolla, A., Gelmi, E., Necibi, C., Gronchi, P., Sillanpää, M., Canziani, R. Electro-dewatering treatment of sludge: Assessment of the influence on relevant indicators for disposal in agriculture // *Journal of environmental management*, 2020, 268, 110689.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110689>
22. Молчанов А. Д., Вербовський О. В., Швед Г. Б., Фльорко В. А. Про можливість електрохімічного кондиціювання осадів стічних вод // *Вісник Державного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Теплоенер-

гетика. Інженерія доквілля. Автоматизація, 1999, №378, С.90–92. (Короткі повідомлення).

23. **Вербовський О. В., Косик В. П., Швед Г. Б.** Кондиціонування осаду стічних вод випрямленим електричним струмом // Вісник Державного університету «Львівська політехніка». Серія: Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматика, 1996, №304, С. 9–11.

24. **Молчанов А., Вербовський О., Карпінська І.** Оцінка можливостей використання безреагентного зневоднення осадів стічних вод // Збірник матеріалів VI Міжнародної наукової конференція "Актуальні проблеми будівництва та інженерії доквілля" Львів – Кошице – Жешув. Ч. II. Інженерія доквілля. Львів: Нац. ун-т "Львів. політехніка", 2001. С. 148–149.

25. **Обухова М. В.** Повышение эффективности обработки осадков сточных вод с применением СВЧ-излучения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04. Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО "СПбГАСУ", 2021. 25 с. URL:

<https://www.disserscat.com/content/povyshenie-effektivnosti-obrabotki-osadkov-stochnykh-vod-s-primeneniem-svch-izlucheniya> (дата звернення: 05.09.2022).

REFERENCES

1. **Pham, A. T., Sillanpää, M., & Virkutyte, J. (2010).** Sludge dewatering by sand-drying bed coupled with electro-dewatering at various potentials. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 24(2), 151-162. <https://doi.org/10.1080/17480930903132620>
2. **Mahmoud, A., Fernandez, A., Chituchi, T. M., & Arlabosse, P. (2008).** Thermally assisted mechanical dewatering (TAMD) of suspensions of fine particles: analysis of the influence of the operating conditions using the response surface methodology. *Chemosphere*, 72(11), 1765–1773. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.075>
3. **Couturier, S., Valat, M., Vaxelaire, J., & Puiggali, J. R. (2007).** Enhanced expression of filter cakes using a local thermal supply. *Separation and Purification Technology*, 57(2), 321-328. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.04.020>
4. **Olivier, J., Mahmoud, A., Vaxelaire, J., Conrardy, J. B., Citeau, M. & Vorobiev, E.**

(2014). Electro-Dewatering of Anaerobically Digested and Activated Sludges: An Energy Aspect Analysis, *Drying Technology*, 32(9), 1091–1103.

<https://doi.org/10.1080/07373937.2014.884133>

5. **Lee, J. E., Lee, J. K., & Choi, H. K. (2007).** Filter press for electro-dewatering of waterworks sludge. *Drying Technology*, 25(12), 1985-1993.

<https://doi.org/10.1080/07373930701727333>

6. **Curvers, D., Maes, K. C., Saveyn, H., De Baets, B., Miller, S., & Van der Meeren, P. (2007).** Modelling the electro-osmotically enhanced pressure dewatering of activated sludge. *Chemical Engineering Science*, 62(8), 2267-2276.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.085>

7. **Eichholz, C., Stolarski, M., Goertz, V., & Nirschl, H. (2008).** Magnetic field enhanced cake filtration of superparamagnetic PVAc-particles. *Chemical engineering science*, 63(12), 3193-3200.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.03.034>

8. **Smythe, M. C., & Wakeman, R. J. (2000).** The use of acoustic fields as a filtration and dewatering aid. *Ultrasonics*, 38(1-8), 657-661. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00147-X](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00147-X)

9. **Wakeman, R. J., & Smythe, M. C. (2000).** Clarifying filtration of fine particle suspensions aided by electrical and acoustic fields. *Chemical Engineering Research and Design*, 78(1), 125-135.

<https://doi.org/10.1205/026387600526960>

10. **Mahmoud, A., Olivier, J., Vaxelaire, J., & Hoadley, A. F. (2010).** Electrical field: a historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering. *Water research*, 44(8), 2381–2407.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.01.033>

11. **Tuan, P.-A., Sillanpää, M., & Isoaari, P. (2012).** Sewage sludge electro-dewatering treatment – a review. *Drying Technology*, 30(7), 691–706.

<https://doi.org/10.1080/07373937.2012.654874>

12. **Olivier, J., Mahmoud, A., Vaxelaire, J., Conrardy, J.-B., Citeau, M., & Vorobiev, E. (2014).** Electro-dewatering of anaerobically digested and activated sludges: an energy aspect analysis. *Drying Technology*, 32(9), 1091–1103.

<https://doi.org/10.1080/07373937.2014.884133>

13. **Zhou, J., Liu, Z., She, P., & Ding, F. (2001).** Water removal from sludge in a horizontal electric field. *Drying Technology*, 19(3-

- 4), 627-638. <https://doi.org/10.1081/DRT-100103939>
14. **Saveyn, H., Van der Meeren, P., Pauwels, G., & Timmerman, R. (2006).** Bench and pilot-scale sludge electro-dewatering in a diaphragm filter press. *Water science and technology*, 54(9), 53–60. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.725>
15. **Yuan, C., & Weng, C. H. (2003).** Sludge dewatering by electrokinetic technique: effect of processing time and potential gradient. *Advances in Environmental research*, 7(3), 727-732. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00030-8](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00030-8)
16. **Tuan, P. A., Jurate, V., & Mika, S. (2008).** Electro-dewatering of sludge under pressure and non-pressure conditions. *Environmental technology*, 29(10), 1075–1084. <https://doi.org/10.1080/09593330802180294>
17. **Saveyn, H., Pauwels, G., Timmerman, R., & Van der Meeren, P. (2005).** Effect of polyelectrolyte conditioning on the enhanced dewatering of activated sludge by application of an electric field during the expression phase. *Water research*, 39(13), 3012–3020. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.002>
18. **Lv, H., Xiong, Q., Liu, D., & Wu, X. (2021).** Coupling electro-dewatering and low-temperature air-drying for efficient dewatering of sludge. *Scientific reports*, 11(1), 19167. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-98477-9>
19. **Sánchez, C. H., Gutiérrez, Á., Galindo, J. M., González-Weller, D., Rubio, C., Revert, C., ... & Hardisson, A. (2017).** Heavy metal content in sewage sludge: a management strategy for an Ocean Island. *Revista de salud ambiental*, 17(1), 3-9.
20. **Hwang, S., & Min, K. S. (2003).** Improved sludge dewatering by addition of electro-osmosis to belt filter press. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2(2), 149-153. <https://doi.org/10.1139/s03-013>
21. **Rumky, J., Visigalli, S., Turolla, A., Gelmi, E., Necibi, C., Gronchi, P., Sillanpää, M., & Canziani, R. (2020).** Electro-dewatering treatment of sludge: Assessment of the influence on relevant indicators for disposal in agriculture. *Journal of environmental management*, 268, 110689. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110689>
22. **Molchanov, A. D., Verbovskii, O. V., Shved, H. B., Florko, V. A. (1999).** Pro mozhylyvist elektrokhimichnoho kondytsiuvannia osadiv stichnykh vod. *Visnyk Derzhavnoho universytetu "Lvivska politekhnikha". Serie: Teploenerhetyka. Inzheneriia dovkillia. Avtomatyzatsiia*, 378, 90–92. – (Korotki povidomlennia). [in Ukrainian]
23. **Verbovskii, O. V., Kosyk V. P., Shved, H. B. (1996).** Kondytsiuvannia osadu stichnykh vod vypriamlenym elektrychnym strumom. *Visnyk Derzhavnoho universytetu "Lvivska politekhnikha". Serie: Teploenerhetyka. Inzheneriia dovkillia. Avtomatyka*, 304, 9–11. [in Ukrainian]
24. **Molchanov, A., Verbovskii, O., Karpinska I. (2001).** Otsinka mozhylyvostei vykorystannia bezreahantnoho znevodnennia osadiv stichnykh vod. *Collection of science works of VI International scientific conference 'Current issues of civil and environmental engineering' Lviv – Košice – Rzeszów. P. II – Environmental engineering.* Lviv: Lviv Polytechnic National University. 148–149. [in Ukrainian]
25. **Obukhova M. V. (2021).** *Povyshenie jeffektivnosti obrabotki osadkov stochnykh vod s primeneniem SVCh-izluchenija* (Doctor of philosophy thesis, Saint Peterburg: Saint Peterburg State University of Architecture and Civil Engineering). [in Russian] Retrieved from <https://www.dissercat.com/content/povyshenie-effektivnosti-obrabotki-osadkov-stochnykh-vod-s-primeneniem-svch-izlucheniya> (Retrieved: September 05, 2022)

Sewage sludge dewatering by electric field

Orest Verbovskyi, Vadym Orel, Oksana Matsiyevska, Davyd Derkach

Abstract. During the cleaning and further treatment of municipal wastewater, sediments are formed, which are extremely dangerous from a sanitary and hygienic point of view, poorly dewatered, have high humidity (over 90%), large volumes (up to 3% of wastewater consumption), contain organic substances, pathogens, heavy metals, etc. In Ukraine, at most wastewater treatment plants, sewage sludge is mostly piled up on sludge sites after minimal treatment. Effective processing and disposal of sewage sludge in order to reduce the negative impact on the environment, as well as the use of sewage sludge as secondary raw materials, is an actual, complex and urgent task. The key link in the existing process of treatment and disposal of sewage sludge is their dewatering. When designing facilities for the treatment and disposal of sewage sludge, advanced technologies should be used, the use of which is based on scientific and technical research. The article reviews the results of research on the intensification of existing mechanical methods of sewage sludge. One of the most effective methods of intensifying the process of dewatering sewage sludge is electro-dewatering, which involves the application of an electric field during mechanical dewatering of sludge. Electro-dewatering technology makes it possible to reduce the humidity of sediments to 20...40%, reduce the concentration of heavy metals and pathogens in sediments, etc. The purpose of this work is to study the possibility of electro-dewatering of activated sludge from secondary settling tanks of municipal wastewater treatment plants in Lviv. Empirical research methods were used. A laboratory scale has been designed for electro-dewatering of sewage sludge. Activated sludge with a moisture content of 98% was studied. It is shown that the effect of activated sludge dewatering, depending on the duration of its treatment, is an S-shaped curve that resembles a kinetic autocatalytic reaction with three periods: induction, main, and fading. The possibility of electro-dewatering of sewage sludge with a maximum dewatering effect of 60% has been proven. Therefore, it is proposed to carry out mechanical dewatering of city sewage sludge using an electric field.

Key words: wastewater treatment plant, sewage sludge, activated sludge, dewatering, electro-dewatering.

Стаття надійшла до редакції 20.09.2022