



Ю. М. Данченко¹, Є. О. Макаров², В. А. Андронов², О. Л. Мірус¹

¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

²Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3865-2496> – Ю. М. Данченко

<https://orcid.org/0000-0003-0785-3041> – Є. О. Макаров

<http://orcid.org/0000-0001-7486-482X> – В. А. Андронов

<https://orcid.org/0000-0002-3916-2360> – О. Л. Мірус



u_danchenko@ukr.net

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОКОАГУЛЯЦІЙНОЇ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД МОЛОКОЗАВОДІВ ШЛЯХОМ ДОДАВАННЯ ЛУГУ

Проведені експериментальні дослідження щодо підвищення ефективності електрокоагуляційної очистки стічних вод молокозаводів шляхом додавання лугу різної хімічної природи та агрегатного стану. Наведена порівняльна характеристика застосування натрію гідроксиду NaOH (у вигляді 5% водного розчину) та кальцію оксиду CaO (у вигляді порошку). Показано, що використання CaO є більш ефективним. Встановлено, що додавання в стічну воду порошку CaO після електрокоагуляції до pH = 9,0-9,5, в порівнянні з розчином NaOH, дозволяє підвищити ступінь очистки за такими показниками: хімічне споживання кисню (ХСК), прозорість, концентрація ортофосфат-іонів (PO₄³⁻), концентрація іонів амонію (NH₄⁺). При цьому практично повністю видаляються етеророзчинні речовини (ЕРР). Встановлено, що додавання CaO після електрокоагуляції зменшує густину електричного струму з 50 А/м² до 30 А/м² (на 40%). При цьому ступінь очистки від усіх досліджених забруднювачів залишається достатньо високим (98-99%). Це забезпечує економію електричної енергії та позитивно впливає на еколого-економічну оцінку технології. Встановлено, що для електрокоагуляційної очистки стічних вод молокозаводів оптимальними є такі технологічні параметри: густина електричного струму 30-50 А/м²; час обробки стічної води 5-7 хвилин; кількість доданого CaO 0,5 г/дм³; pH води після підлужування 9,0-9,5. В результаті проведених досліджень встановлені закономірності впливу кількості доданого CaO та показника pH стічної води на об'єм утвореного шламу після електрокоагуляції. Визначені математичні залежності цього впливу, які мають поліноміальний характер. Доведено, що використання порошкоподібного CaO в порівнянні з застосуванням розчину NaOH дозволяє покращити фізико-хімічні властивості утвореного шламу. Це пов'язано з природою доданого лугу, а також з тим, що тверді кристалічні частинки CaO, адсорбуючись на аморфних частинках коагулянту, зумовлюють підвищену здатність шламу до седиментації та ущільнення.

Ключові слова: стічні води; молокозавод; електрокоагуляція; луг; натрію гідроксид; кальцію оксид; pH; ступінь очистки; шлам.

Yu. M. Danchenko¹, Ye. O. Makarov², V. A. Andronov², O. L. Mirus¹

¹Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

²National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

IMPROVING THE EFFICIENCY OF ELECTROCOAGULATION TREATMENT OF DAIRY WASTEWATER BY ADDING ALKALI

Experimental studies have been conducted to increase the efficiency of electrocoagulation treatment of dairy wastewater by adding alkali of different chemical nature and physical states. The comparative characteristics of the use of sodium hydroxide NaOH (in the form of 5% aqueous solution) and calcium oxide CaO (in the form of powder) are given. It has been shown that the use of CaO is more effective. It is established that the addition of CaO powder to wastewater after electrocoagulation to pH = 9.0-9.5, compared with NaOH solution, can increase the degree of purification by the following indicators: chemical oxygen demand (COD), transparency, orthophosphate ion concentration (PO₄³⁻), the concentration of ammonium ions (NH₄⁺). This completely removes the ether-soluble substances (ESS). It was found that the addition of CaO after electrocoagulation can reduce the density of electric current from 50 A/m² to 30 A/m² (40%). The degree of purification remains quite high (98-99%). This saves electricity and has a positive effect on the environmental and economic assessment

of technology. It is established that the following technological parameters are optimal for electrocoagulation wastewater treatment of dairies: electric current density 30-50 A/m²; processing time 5-7 minutes; the amount of CaO 0.5 g/dm³; pH of water after alkalization 9.0-9.5. As a result of the conducted research regularities of influence of the quantity of the added CaO and indicator of pH of sewage on the volume of the formed slime after electrocoagulation are established. Mathematical dependences of this influence, which have a polynomial character, are determined. It is proved that the use of powdered CaO in comparison with the use of NaOH solution can improve the physicochemical properties of the formed sludge. This is due to the nature of the added alkali, as well as the fact that solid crystalline particles of CaO, adsorbed on amorphous particles of coagulant, cause increased ability of sludge to sedimentation and compaction.

Keywords: wastewater; dairy plant; electrocoagulation; alkali; sodium hydroxide; calcium oxide; pH; degree of purification; sludge.

Вступ. Виробництво молочної харчової продукції є джерелом небезпечних стічних вод, які при нераціональному і безвідповідальному поводженні з ними здатні суттєво впливати на стан екологічної безпеки поверхневих і підземних природних водойм. Надходження цих вод на міські очисні споруди без попередньої очистки може викликати порушення у роботі систем біологічного очищення та навіть спричинити загибель активного мулу [1-9].

Найбільш ефективними методами попередньої очистки стічних вод молокозаводів є електрохімічні, а саме: електрофлотація, електрокоагуляція та різні технологічні схеми, в яких поєднуються ці методи, наприклад, електрофлотокоагуляція. Електрохімічні методи очищення здатні забезпечити високий ступінь видалення розчинених, емульсованих та суспендованих забруднень; електрохімічні установки економічні, компактні та прості у використанні [10-26].

Ефективність електрохімічних методів залежить від особливостей технологічної схеми очистки стічних вод, облаштування та характеристик електрохімічних комірок, умов проведення процесу, а саме: хімічного складу стічних вод, рН середовища, наявності доданих речовин тощо. Для досягання необхідних умов використовуються різні хімічні речовини, які регулюють рН середовища (луги) та речовини, що здатні впливати на кількість, морфологію та природу утвореного внаслідок очистки шлам (флокулянти, полімерні речовини).

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

На ефективність процесу електрохімічної очистки стічних вод молокозаводів впливає багато факторів: матеріал та кількість електродів в електролізері, рН середовища, величина сили струму, наявність електролітів, електрична напруга, тривалість процесу електрокоагуляції, природа використовуваних флокулянтів тощо. Ефективність очистки зазвичай оцінюється за ступенем очистки стічних вод від конкретного виду забруднень, які характеризуються певним показником. Для стічних вод молокопереробних підприємств цими показниками, як правило, є хімічне споживання кисню (ХСК), кількість

етеророзчинних речовин, кількість завислих речовин тощо. В результаті електрокоагуляційної очистки утворюється шлам – суміш коагулянту з видаленими забруднювачами, який необхідно утилізувати. Тому ефективність процесу також безпосередньо пов'язана з кількістю, морфологією і природою утвореного шламу. Загалом для підвищення ефективності процесу електрокоагуляційної очистки стічних вод молокозаводів використовують декілька хіміко-технологічних прийомів: регулювання регламенту роботи електролізера, регулювання рН середовища стічних вод, регулювання процесу утворення шламу. Регулювання рН середовища стічних вод та процесу формування шламу здебільшого здійснюється методом додавання хімічних реагентів. Ефективність цього процесу залежить від природи і концентрації хімічного реагенту.

В дослідженні [10] електрокоагуляція стічних вод молокозаводів проводилась з використанням алюмінієвих електродів. Ефективність процесу оцінювалась за величиною ХСК та кількістю завислих речовин. Авторами запропоновані математичні моделі, які описують ефективність очистки стічних вод молокозаводів залежно від густини електричного струму, відстані між електродами, часу проведення електрокоагуляції та початкового значення рН. Встановлено, що при початковому значенні рН = 5 стічної води, при густині електричного струму 61,6 А/м² значення ХСК знизилось на 57%, а загальна кількість завислих речовин знизилась на 97%. При цьому, рН обробленої (очищеної) стічної води підвищився до 10.

В роботі [13] регулювання рН стічних вод здійснювалось додаванням розчинів H₂SO₄ та NaOH. Результати показали, що при рН = 5-10 ефективність видалення забруднень була оптимальною. Вважається, що це пов'язано з оптимальними умовами утворення молекул коагулянту Al(OH)₃, які мають найбільшу адсорбуючу та коагулюючу дію. Колоїдно-дисперсні частинки Al(OH)₃ мають велику питому поверхню, що спричиняє швидку адсорбцію розчинних органічних сполук та утворення колоїдних частинок [14, 15]. Авторами був обраний в якості оптимального значення рН = 7. При

значенні рН більше 10 ефективність видалення забруднювачів знижувалась, оскільки при високому рН головним чином утворюються іони $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, які, очевидно, не мають високої адсорбуючої та коагулюючої дії [16].

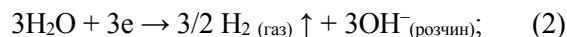
В роботі [17] були представлені результати лабораторних досліджень впливу початкового значення рН стічних вод на процес електрокоагуляційної очистки з алюмінієвими та залізними електродами. Регулювання рН здійснювалось додаванням водних розчинів H_2SO_4 та NaOH . Для експериментів були обрані різні початкові значення рН = 4 (початкове значення рН стічних вод), рН = 7 та рН = 9. Встановлено, що ефективність видалення ХСК зі стічних вод з алюмінієвими електродами з початковим значенням рН = 4, 7 та 9 дорівнює відповідно 80,9%, 65,4% та 40,5%. Вважається, що зниження ефективності очистки в нейтральному та лужному середовищі пов'язане з утворенням на алюмінієвих електродах гелевого шару, який перешкоджає гідролізу іонів алюмінію та утворенню коагулянту. Тому у випадку використання алюмінієвих электродів авторами вважається ефективним рН = 4. При використанні залізних электродів коагулянт є $\text{Fe}(\text{OH})_3$, що утворюється внаслідок реакції між іонами Fe^{3+} та OH^- , які відповідно з'являються на аноді та катоді під час роботи електролізера. В результаті експериментів встановлено, що ефективність видалення ХСК дорівнює 71,30%, 78,01% та 93,60% відповідно для початкових значень рН = 4, рН = 7 і рН = 9. Тому використання залізних электродів дозволяє забезпечити кращі показники видалення ХСК при більш високих значеннях рН. Цей результат корелюється з іншими дослідженнями і пояснює той факт, що більшість нерозчинних комплексів заліза (коагулянти) утворюються при більш високих значеннях рН [18]. Також було встановлено, що ефективність споживання енергії змінюється в залежності від початкового значення рН. Початкові значення рН, які забезпечують кращу ефективність видалення ХСК, також забезпечують кращі (нижчі) рівні енергоспоживання. Наприклад, якщо використовувались алюмінієві електроди, кислотне значення рН було більш ефективним для видалення ХСК та при цьому спостерігалось найнижче споживання енергії, яке дорівнювало 55,7 кВт·год/м³. В лужному середовищі при початковому значенні рН = 9, за якого спостерігався нижчий ступінь очистки, споживання електроенергії становило близько 63,5 кВт·год/м³. У випадку використання залізних электродів при початковому значенні рН = 9 забезпечувалось краще видалення ХСК з найменшим споживанням енергії, яке становило 47,1 кВт·год/м³. В кислому середовищі рівень споживання енергії становив 77,5 кВт·год/м³.

У багатьох наукових працях вивчався вплив рН стічних вод на закономірності електрохімічного утворення коагулянтів [17-24]. Як відомо, основні хімічні реакції утворення, наприклад, алюміній гідроксиду, що відбуваються в процесі електрокоагуляції, такі:

- на анодах — окиснення алюмінію:



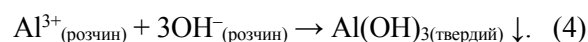
- на катодах — відновлення води:



- утворення коагулянту в нейтральному середовищі:



- утворення коагулянту в лужному середовищі:



Як стверджують автори робіт [11, 12, 19-21], в лужному середовищі утворюються мономерні $[\text{Al}(\text{OH})_2]^{2+}$, $[\text{Al}(\text{OH})_2]^+$, $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ та полімерні $[\text{Al}_2(\text{OH})_2]^{4+}$, $[\text{Al}_2(\text{OH})_5]^+$, $[\text{Al}_6(\text{OH})_{15}]^{3+}$, $[\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}]^{5+}$, іони гідроксоалюмінію, які здатні підвищувати ефективність електрокоагуляції завдяки тому, що мають як позитивні, так і негативні заряди. Однак існують експериментальні дані [17, 21], які показують, що підвищення початкового значення рН стічних вод може, навпаки, зменшити ефективність електрокоагуляції. При цьому, як стверджують автори [17], при рН > 7 на алюмінієвому аноді утворюється гелевий шар, який уповільнює процеси окиснення і, відповідно, утворення коагулянту. Отже, початкове значення рН стічних вод має визначальну роль для утворення коагулянтів і безпосередньо впливає на хімічну будову коагулюючих частинок.

Отже, хімічна природа утворених коагулянтів (гідроксидів металів, комплексних іонів) та ефективність електрокоагуляційної очистки стічних вод молокозаводів безпосередньо залежить від умов проведення процесу і, насамперед, від початкового показника рН стічних вод. Не до кінця з'ясовано які добавки, що регулюють рН, є найбільш ефективними і як природа таких добавок впливатиме на ступінь очистки та закономірності утворення шламу. Тому дослідження впливу рН та природи добавок, що дозволяють регулювати рН стічних вод, на процеси електрокоагуляційного очищення стічних вод молокопереробних підприємств є важливою та актуальною науково-практичною задачею.

Мета дослідження. Метою роботи є дослідження закономірностей впливу добавок лугу різної хімічної природи і агрегатного стану на ефективність електрокоагуляційної очистки стічних вод молокозаводів, об'єм та фізико-хімічні

характеристики утвореного шламу. Встановлення порівняльної характеристики застосування лугів – натрію гідроксиду NaOH (у вигляді 5% водного розчину) та кальцію оксиду CaO (у вигляді порошку). Визначення оптимальних технологічних параметрів для очистки стічних вод молокозаводів методом електрокоагуляції з використанням алюмінієвих электродів.

Матеріали та методи дослідження. Для дослідження використовувались стічні води молокопереробного підприємства Сумської області (Україна). Для проведення досліджень протягом двох робочих змін відбирались проби стічних вод з ділянки приймання молока, лабораторії, цеху виробництва сиру, апаратного відділення, цеху виробництва масла, цеху виробництва плавлених сирів та відділення реалізації. З урахуванням внеску у загальний стік кожної ділянки підприємства формувався загальний стік з усередненим складом стічних вод. Стічні води не консервувались та підлягали дослідженню протягом 24 годин.

Електрокоагуляційна обробка стічних вод проводилась на лабораторній установці, яка включає електролізер з органічного скла розмірами 18 см × 15 см × 4 см. Об'єм стічної води, що оброблявся, становив близько 1 дм³. Площа алюмінієвих электродів становила близько 250 см².

Для порівняльної характеристики використовувались луги: натрій гідроксид NaOH у вигляді 5% водного розчину та кальцію оксид CaO у вигляді сухого порошку. Для інтенсифікації процесів утворення шламу використовувався флокулянт неіонний поліакриламід (ПАА) у вигляді 0,05% водного розчину.

Ефективність обробки стічної води досліджувалась за такими показниками: хімічне споживання кисню (ХСК), водневий показник рН, прозорість, кількість етеророзчинних та завислих речовин, концентрація ортофосфат-іонів PO₄³⁻ та іонів амонію NH₄⁺ [1]. Визначення рН проводилось при температурі 18-20⁰С з використанням портативного рН-метра марки SX 711 (Китай) з

точністю вимірювання ±0,001рН. Прозорість води визначалась з використанням приладу Снеллена, який представляє собою скляний циліндр з плоским дном. Визначення кількості етеророзчинних речовин (ЕРР) – жирів та мінеральних олій – здійснювалось методом багатократної екстракції петролейним етером в якості екстрагента. Після випарювання етеру з екстракту ваговим методом визначалась маса усіх етеророзчинних речовин, що розчинились. Вміст ортофосфат-іонів та іонів амонію визначався фотометричним методом з використанням лабораторного фотометра марки КФК-3. Кількість завислих речовин у воді визначалась таким чином. Відміряний об'єм усередненої, добре перемішаної нефільтрованої проби стічної води фільтрувався через паперовий фільтр «синя стрічка», який був попередньо зважений з точністю до 0,001г. Фільтр з осадом висушувався у сушильній шафі при температурі 103-105⁰С, після чого охолоджувався в ексікаторі і знову зважувався. Операція повторювалась тричі для досягнення постійного значення маси. Кінцевий результат розраховувався як середнє значення з трьох паралельних визначень. Кількість вилучених завислих речовин (ЗР) розраховувалась за формулою $ZP = (m - m_1) \cdot 1000 / V$, де ЗР – концентрація завислих речовин, мг/дм³; m – маса фільтра з вилученими завислими речовинами, мг; m₁ – маса чистого фільтра, мг; V – об'єм води, взятий для випаровування, дм³; 1000 – коефіцієнт для перерахунку на 1дм³ води.

Обговорення результатів дослідження. Для дослідження обрано реально зібрані свіжі стічні води молокопереробного підприємства Сумської області (Україна). Луги NaOH або CaO додавались до стічної води після електрокоагуляції, що дозволило варіювати показник рН від 7,0 до 9,5. Кількість CaO у стічній воді становила 1 г/дм³. Концентрація ПАА, що додавався до стічної води після електрокоагуляції, становила 5 мг/дм³. Термін відстоювання обробленої води становив 1 годину. Отримані результати представлені в табл. 1-3.

Таблиця 1

Вплив показника рН на ефективність (ступінь) очистки стічних вод при використанні NaOH (початковий рН = 4,4; густина електричного струму 50 А/м²)

Час електрокоагуляції, хвилин	рН після додавання NaOH	Прозорість, см	ХСК, мгО/дм ³ / ступінь очистки, %	Концентрація у стічній воді, мг/дм ³ / ступінь очистки, %		
				ЕРР	Ортофосфат-іони	Іони амонію
-	-	0,6	5130	660	145	10
3	7,5	3,6	1387/73,0	16,5/97,5	4,1/97,2	8,6/14,0
5	7,5	10,8	1178/77,0	11,0/98,3	2,3/98,4	8,3/17,0
5	9,0	11,0	1178/77,0	11,0/98,3	2,3/98,4	8,3/17,0
7	7,5	11,7	1130/78,0	9,2/98,6	2,0/98,6	6,3/37,0
7	9,0	12,3	1100/78,6	9,0/98,6	2,0/98,6	6,1/39,0
10	7,5	12,5	1100/78,6	8,0/98,8	1,5/99,0	6,5/35,0
10	9,0	12,5	1085/78,8	8,0/98,8	1,4/99,0	6,1/39,0

Таблиця 2

Вплив показника рН на ефективність (ступінь) очистки стічних вод при використанні СаО (початковий рН = 4,0; густина електричного струму 30 А/м²)

Час електрокоагуляції, хвилини	рН після додавання СаО	ХСК, мгО/дм ³ / ступінь очистки, %	Вміст у стічній воді, мг/дм ³ / ступінь очистки, %		
			ЕРР	Ортофосфат-іони	Іони амонію
-	-	5600	391	125	20
5	9,0	1200/78,6	11,0/97,2	3,1/97,5	14,2/29,0
7	9,0	1110/80,2	5,0/98,7	2,2/98,2	11,7/41,5
10	9,0	1070/81,0	Відсутні	1,8/98,6	11,0/45,0

Таблиця 3

Вплив показника рН на ефективність (ступінь) очистки стічних вод при використанні СаО (початковий рН = 4,0; густина електричного струму 50 А/м²)

Час електрокоагуляції, хвилини	рН після додавання СаО	ХСК, мгО/дм ³ / ступінь очистки, %	Концентрація у стічній воді, мг/дм ³ / ступінь очистки, %		
			ЕРР	Ортофосфат-іони	Іони амонію
-	-	5600	391	125	20
5	9,0	1100/80,2	Відсутні	3,0/97,6	10,8/46,0
7	9,2	1110/80,2	Відсутні	2,2/98,2	11,0/45,0
10	9,5	1060/81,1	Відсутні	1,5/98,8	9,5/52,5

В результаті проведених досліджень встановлено, що додавання луку після електрокоагуляції прискорює процес осадження завислих речовин. Прозорість очищеної води підвищується при збільшенні часу електрообробки. Це свідчить про більш ефективне протікання процесів утворення коагулянтів, сорбції забруднюючих речовин та підвищену здатність утвореного шламу до коагуляції і седиментації. Одночасно зі зменшенням вмісту етеророзчинних речовин відбувається практично повне видалення фосфат-іонів та зниження концентрації іонів амонію, що надалі позитивно позначиться на процесах біологічного очищення стічних вод в подальшому.

Представлені результати досліджень свідчать про той факт, що використання кальцій оксиду є більш ефективним. При додаванні СаО у стічну воду після електрокоагуляції до рН = 9,0-9,5 підвищується ступінь очистки за всіма показниками, а концентрація етеророзчинних речовин наближається до нуля (табл. 2.3). При чому цей результат досягається при тривалості обробки 10 хвилин та зниженні густини електричного струму з 50 А/м² до 30 А/м² (табл. 2). При густині струму 50 А/м² максимальний ефект очистки досягається вже через 5 хвилин проведення процесу електрокоагуляції. Встановлено, що

використання СаО дозволяє не тільки збільшити ступінь очистки стічної води за показниками ХСК, концентрації етеророзчинних речовин, ортофосфат-іонів та іонів амонію, але й підвищити економічний ефект електрокоагуляційної обробки завдяки зменшенню витраченого електричного струму, тобто сприяє економії електроенергії.

Отже, з отриманих даних (табл. 2,3) випливає, що оптимальними технологічними параметрами електрокоагуляційної очистки стічної води є: густина електричного струму 30-50 А/м²; час обробки 5-7 хвилин; рН води після підлужування кальцій оксидом 9,0-9,5.

Щоб з упевненістю рекомендувати отримані технологічні параметри для використання у схемах електрокоагуляційної очистки стічних вод молокозаводів ще необхідно дослідити ефективність визначених параметрів для очистки вод з підвищеним вмістом етеророзчинних речовин. Отримані результати представлені в табл. 4.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що для електрокоагуляційної очистки стічних вод молокозаводів можна рекомендувати такі оптимальні технологічні параметри: густина електричного струму 30-50 А/м²; час електрокоагуляції 5-7 хвилин; кількість СаО 0,5 г/дм³.

Вплив показника рН на ефективність (ступінь) очистки стічних вод при використанні СаО (початковий рН = 4,0; густина електричного струму 50 А/м²)

Час електрокоагуляції, хвилин	Вміст СаО, г/дм ³	рН після електрокоагуляції	рН після додавання СаО	ХСК, мг/дм ³ / ступінь очистки, %	Вміст у стічній воді, мг/дм ³ / ступінь очистки, %		
					ЕРР	Завислі речовини (ЗР)	Іони амонію
-	-	5,6	-	2058	1278	2643	6
5	0,5	6,2	9,5	800/61,1	11,0/99,1	30/98,9	4,0/33,3
7	0,5			800/61,1	6,0/99,5		3,7/38,3
10	0,5			760/63,1	4,0/99,7		3,9/35,0
5	1,0	6,2	10,6	800/61,1	Відсутні	30/98,9	3,9/35,0
7	1,0			760/63,1			3,8/36,7
10	1,0			740/64,0			3,7/38,3

Очевидно, що природа луку суттєво впливає на рН стічної води і закономірності утворення коагулянту, що пов'язано з ефективністю процесу електрокоагуляційної очистки. Також, очевидно, що колоїдно-хімічні характеристики утвореного коагулянту зумовлюють ефективність коагулюючої дії та властивості шламу. Окрім природи лужної

добавки велику роль відіграватиме вміст луку, що також пов'язано з рН стічної води та кількістю утвореного шламу. Тому було проведено дослідження впливу вмісту СаО на рН стічної води та об'єм утвореного шламу після електрокоагуляції. Отримані результати представлені на рис. 1.

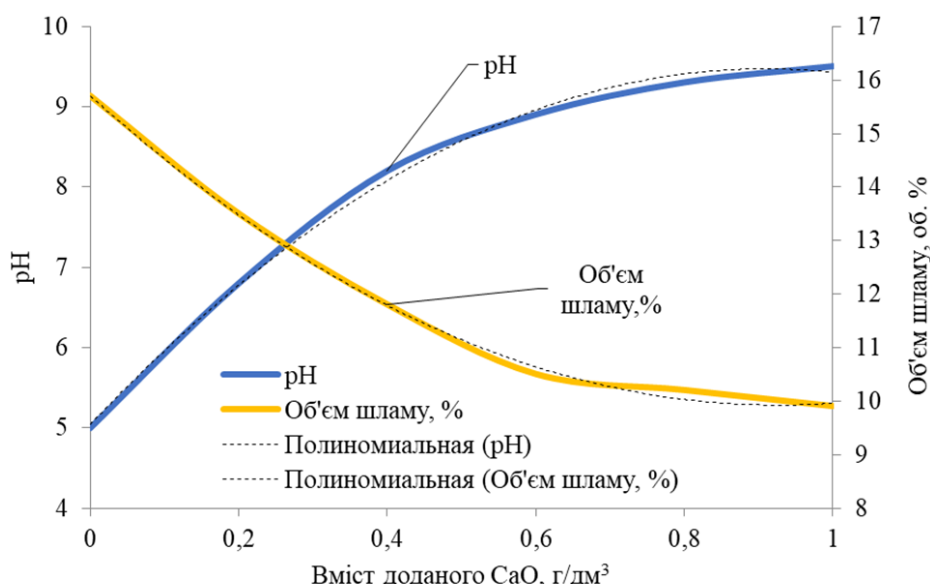


Рисунок 1 – Вплив вмісту доданого СаО на рН стічної води та об'єм шламу, що утворився після 1 години відстоювання

Як видно з представлених результатів, зі збільшенням концентрації кальцій оксиду зменшується об'єм утвореного в результаті електрокоагуляції шламу. Отже, використання порошкоподібного кальцій оксиду порівняно з застосуванням розчину натрій гідроксиду дає змогу не лише підвищити ступінь очистки стічної води, а й покращити фізико-хімічні властивості утвореного шламу. Це, очевидно, пов'язане не тільки з природою луку, а й з агрегатним станом, тобто з тим, що тверді кристалічні частинки кальцій оксиду, адсорбуючись на аморфних частинках коагулянту, зумовлюють підвищену здатність шламу до седиментації та ущільнення.

Апроксимація отриманих результатів експериментів (рис. 1) дозволила встановити математичні вирази закономірностей зміни рН та об'єму шламу ($V_{\text{шламу}}$) залежно від вмісту доданого кальцій оксиду (x). Ці закономірності мають поліноміальний характер:

$$\text{pH} = -5,4 \cdot x^2 + 9,7 \cdot x + 5; \quad (1)$$

$$V_{\text{шламу}} = 6,7 \cdot x^2 - 12,5 \cdot x + 15,7. \quad (2)$$

Величина достовірності апроксимації результатів експериментів дорівнює $R^2_1 = 0,9976$ та $R^2_2 = 0,998$ відповідно до рівнянь (1) та (2).

Висновки. Проведені експериментальні дослідження ефективності використання лугів

різної хімічної природи та агрегатного стану в процесі електрокоагуляційної очистки стічних вод молокозаводів. Наведена порівняльна характеристика застосування натрій гідроксиду (у вигляді водного розчину) та кальцій оксиду (у вигляді порошку). Представлені результати показують, що використання кальцій оксиду є більш ефективним. При додаванні у стічну воду кальцій оксиду після електрокоагуляції до рН = 9,0-9,5 дає змогу підвищити ступінь очистки за всіма показниками та зменшити концентрацію етеророзчинних речовин до нуля. Встановлено, що додавання кальцій оксиду після проведення електрокоагуляції є більш ефективним та зменшує густину електричного струму з 50 А/м² до 30 А/м² (на 40%). При цьому ступінь очистки стічної води залишається достатньо високим (98-99%). Це забезпечує економію електроенергії та позитивно вплине на еколого-економічну оцінку технології. Встановлено, що для електрокоагуляційної очистки стічних вод молокозаводів оптимальними є такі технологічні параметри: густина електричного струму 30-50 А/м²; час електрокоагуляції 5-7 хвилин; кількість СаО 0,5 г/дм³; рН води після підлужування кальцій оксидом 9,0-9,5. Встановлені закономірності впливу вмісту доданого СаО на рН стічної води та об'єм утвореного шламу після електрокоагуляції. Визначені математичні вирази цих залежностей, які мають поліноміальний характер. Доведено, що використання порошкоподібного кальцій оксиду порівняно із застосуванням розчину натрій гідроксиду не тільки підвищить ступінь очистки стічної води, а й покращить фізико-хімічні властивості утвореного шламу. Це пов'язано не лише з природою лужної добавки, а й з тим, що тверді кристалічні частинки кальцій оксиду, адсорбуючись на аморфних частинках коагулянту, зумовлюють підвищену здатність шламу до седиментації та ущільнення.

Список літератури:

1. Andronov V.A., Danchenko Yu.M., Makarov Ye.O., Obizhenko T.M. Research of the regularities of forming and chemical composition of sewage water of a dairy processing company. Technogenic and ecological safety. 2020. 7 (1/2020). P. 13–21.
2. Макаров Є.О. Екологічна небезпека висококонцентрованих стічних вод молокопереробних підприємств. Сталій розвиток – стан та перспективи: Матеріали II Міжнародного симпозіуму SDEV'2020. Львів, 2020. С. 235-236.
3. Коневич М., Гудь В. Особливості стічних вод молокозаводів. Матеріали XV наукової конференції ТНТУ імені Івана Пулюя. Тернопіль, 2011. С. 309.
4. Andronov Vladimir, Makarov Yevhen, Danchenko Yuliya, Obizhenko Tatyana, Colloid-

chemical regularities of reagent wastewater treatment of dairies. Materials Science Forum. 2021. 1038. P. 235-241.

5. Гіроль М.М., Гіроль А.М. Технології водовідведення промислових підприємств: Навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2013. 625 с.
6. Гівлюд А.М., Сабадаш В.В., Гумницький Я.М. Обґрунтування можливості використання природного цеоліту для очищення стічних вод молокозаводів. Вісник ЛДУ БЖД. Збірник наукових праць. 2015. №12. С. 185-190.
7. Мальований М.С., Петрушка І.М. Очищення стічних вод природними дисперсними сорбентами: монографія. Львів: Вид-во «Львівська політехніка», 2012. 180 с.
8. Степова К.В., Дерун О.О. Застосування методу «найкращої практики» в управлінні стоками виробництв рослинної олії. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2019. 19. С. 128-132.
9. Босак П.В. Фізико-хімічні властивості стічних вод з технологічних відвалів Нововолинського гірничопромислового району. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. 2018. 18. С. 117-124.
10. Gerson de Freitas Silva Valente, Regina Celia Santos Mendonca, Jose Antonio Marques Pereira. The efficiency of electrocoagulation using aluminum electrodes in treating wastewater from a dairy industry. Ciencia Rural. Santa Maria. 2015. 45(9). P. 1713–1719.
11. Chezeau B., Boudriche L., Vial C. and Boudjemaa A. Treatment of dairy wastewater by electrocoagulation process: Advantages of combined iron/aluminum electrodes (published online 15.07.2019), Separation Science and Technology. 2019. 15. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01496395.2019.1638935>
12. Shariff Ibrahim, Nur Syuhaidah Mohd Aris, Borhannuddin Ariffin, Yahaya Hawari and Megat Ahmad Kamal Megat Hanafiah. Application of electrocoagulation process for decolourisation of palm oil mill effluent (POME). Nature Environment and Pollution Technology, 2018. 17(4). P. 1267-1271.
13. Izadi A., Hosseini M., Darzi G.N., Bidhendi G.N., Shariati F.P. Treatment of paper-recycling wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. Journal of Environmental Heals Science and Engineering. 2018. 16. P. 257-264.
14. Aoudj S., Khelifa A., Drouiche N., Hecini M., Hamitouche H. Electrocoagulation process applied of wastewater containing dyes from textile industry. Chem. Eng. Process Intensif. 2010. 49(11). P. 1176–1182.
15. Bayramoglu M., Kobya M., Can O.T., Sozbir M. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. Separation and Purification Technol. 2004. 37(2). P. 117–125.

16. Holt P.K., Barton G.W., Wark M., Mitchell C.A. A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. *Colloids and Surfaces A. Physicochemical and Eng. Asp.* 2002. 211(2–3). P. 233–248.
17. Yilmaz S., Estra Gerek E., Yavuz Y. and Koparal A.S. Treatment of vinegar industry wastewater of electrocoagulation with monopolar aluminum and iron electrodes and toxicity evaluation. *Water Science & Technology*, in press 2019. 11 p. <https://www.semanticscholar.org/paper/Treatment-of-vinegar-industry-wastewater-by-with-Yilmaz-Gerek/5486fc1f2ab0d9e8ebab979cf881c51a52b74bda>
18. Bassam Al Aji, Yusuf Yavuz, A. Savaş Koparal. Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes. *Separation and Purification Technology*. 2012. 86. P. 248-254.
19. Quaiassa Y. A., Chabani M., Amrane A. and Bensmaili A. Removal of tetracycline by electrocoagulation: Kinetic and isotherm modeling through adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2014. 2(1). P. 177-184.
20. Marugananthan M., Bhaskar Raju G., Prabhakar S. Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation. *Separation and Purification Technology*. 2004. 40(1). P. 69-75.
21. Zongo I., Maiga A. H., Wethe J., Valentin G., Leclerc J. P., Paternotte G., Lapique F. Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: compared variations of COD levels, turbidity and absorbance. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. 169(1-3). P. 70-76.
22. Changmai M., Pasawan M. & Purkait M. K. Separation and purification technology treatment of oily wastewater from drilling site using electrocoagulation followed by microfiltration. *Separation and Purification Technology*. 2019. 210. P. 463-472.
23. Уряднікова І. В. Аналіз і визначення техногенних ризиків при штатній роботі у процесі водоочищення методом реагентної коагуляції і електрокоагуляції. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2020. 5-6/2020(124-125). С. 60-66.
24. Андронов В.А., Макаров Є.О., Данченко Ю.М., Обіженко Т.М. Колоїдно-хімічні аспекти реагентної очистки стічних вод молокозаводів. *Problems of Emergency Situations: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2021. С. 236-237.
25. Андронов В.А., Данченко Ю.М., Макаров Є.О. Обґрунтування використання електрохімічних методів для попередньої очистки стічних вод молокопереробних підприємств. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: збірник наукових статей XV Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: УКРНДІЕП. ПП «Стиль-Іздат», 2019. С. 9-13
26. Benazzi T.L., Luccio M.D., Dalladgo R.M., Steffens J., Mores R., Do Nascimento M.S., Krebs J. and Ceni G. Continuous flow electrocoagulation in the treatment of wastewater from dairy industries. *Water Science & Technology*. 2016. 73(6). P. 1418–1425.

References:

1. Andronov, V.A., Danchenko, Yu.M., Makarov, Ye.O., Obizhenko, T.M. (2020). “Research of the regularities of forming and chemical composition of sewage water of a dairy processing company”, *Technogenic and ecological safety*, Vol. 7 (1/2020), pp. 13-21.
2. Makarov, Ye.O. (2020). “Ecological danger of highly concentrated wastewater of milk processing enterprises”. *Stalyi rozvytok – stan ta perspektyvy: Materialy II Mizhnarodnoho sympoziumu SDEV’2020 [Sustainable Development - Status and Prospects: Proceedings of the II International Symposium SDEV’2020]*. Lviv, February 26-28, 2020, pp. 235-236.
3. Konevych, M., Hud, V. (2011). “Features of dairy wastewater”. *Materialy XV naukovoї konferentsii TNTU imeni Ivana Pulyia [Proceedings of the XV Scientific Conference of TNTU named after Ivan Pulyuy]*. Ternopil, December 14-15, 2011, p. 309.
4. Andronov, V., Makarov, Ye., Danchenko, Yu., Obizhenko, T. (2021). “Colloid-chemical regularities of reagent wastewater treatment of dairies”, *Materials Science Forum*, Vol. 1038, pp. 235-241.
5. Hirol, M.M., Hirol, A.M. (2013). *Tekhnolohii vodovodvedennia promyslovykh pidpruemstv: navchalnyi posibnyk [Drainage technologies of industrial enterprises: Textbook]*. Rivne, Ukraine.
6. Hivlud, A.M., Sabadash, V.V., Humnytskyi, Ya.M. (2015). “Substantiation of the possibility of using natural zeolite for wastewater treatment of dairies”, *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, Vol. 12, pp. 185-190.
7. Malovanyy, M.S., Petrushka, I.M. (2012). *Ochyshchennia stichnykh vod pryrodnyimi dyspersnyimi sorbentamy: monografiia [Wastewater treatment with natural dispersed sorbents: monograph]*. Lviv, Ukraine.
8. Stepova, K.V, Derun, O.O. (2019). “Best practice approach for wastewater management in the edible oil industry”, *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, Vol. 19, pp. 128-132.
9. Bosak, P.V. (2018). “Physico-chemical properties of wastewater from technological waste dumps of Novovolinsk mining district”, *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, Vol. 18, pp. 117-124.
10. Gerson de Freitas, Silva Valente, Regina Celia, Santos Mendonca, Jose Antonio, Marques Pereira (2015). “The efficiency of electrocoagulation using aluminum electrodes in treating wastewater from a dairy

industry”, *Ciencia Rural*. Santa Maria, Vol. 45(9), pp. 1713–1719.

11. Chezeau, B., Boudriche, L., Vial, C. and Boudjemaa, A. (2019). “Treatment of dairy wastewater by electrocoagulation process: Advantages of combined iron/aluminum electrodes”, (published online 15.07.2019), *Separation Science and Technology*. Vol. 15. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01496395.2019.1638935>

12. Shariff, Ibrahim, Nur Syuhaidah, Mohd Aris, Borhannuddin, Ariffin, Yahaya, Hawari and Megat Ahmad Kamal, Megat Hanafiah (2018). “Application of electrocoagulation process for decolourisation of palm oil mill effluent (POME)”, *Nature Environment and Pollution Technology*, Vol. 17(4), pp. 1267-1271.

13. Izadi, A., Hosseini, M., Darzi, G.N., Bidhendi, G.N., Shariati, F.P. (2018). “Treatment of paper-recycling wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes”, *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, Vol. 16, pp. 257-264.

14. Aoudj, S., Khelifa, A., Drouiche, N., Hecini, M., Hamitouche, H. (2010). “Electrocoagulation process applied of wastewater containing dyes from textile industry”, *Chem. Eng. Process Intensif*. Vol. 49(11), pp. 1176–1182.

15. Bayramoglu, M., Kobya, M., Can, O.T., Sozbir, M. (2004). “Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater”, *Separation and Purification Technol.*, Vol. 37(2), pp. 117–125.

16. Holt, P.K., Barton, G.W., Wark, M., Mitchell, C.A. (2002). “A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation”, *Colloids and Surfaces A. Physicochemical and Eng. Asp.*, Vol. 211(2–3), pp. 233–248.

17. Yilmaz, S., Estra Gerek, E., Yavuz, Y. and Koparal, A.S. (2019). “Treatment of vinegar industry wastewater of electrocoagulation with monopolar aluminum and iron electrodes and toxicity evaluation”, *Water Science & Technology*, in press 2019, 11 p. <https://www.semanticscholar.org/paper/Treatment-of-vinegar-industry-wastewater-by-with-Yilmaz-Gerek/5486fc1f2ab0d9e8ebab979cf881c51a52b74bda>

18. Bassam, Al Aji, Yusuf, Yavuz, Savaş Koparal, A. (2012). “Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes”, *Separation and Purification Technology*, Vol. 86, pp. 248-254.

19. Quaisa, Y. A., Chabani, M., Amrane, A. and Bensmaili, A. (2014). “Removal of tetracycline by

electrocoagulation: Kinetic and isotherm modeling through adsorption”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 2(1), pp. 177-184.

20. Marugananthan, M., Bhaskar Raju, G., Prabhakar, S. (2004). “Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation”, *Separation and Purification Technology*, Vol. 40(1), pp. 69-75.

21. Zongo, I., Maiga, A. H., Wethe, J., Valentin, G., Leclerc, J. P., Paternotte, G., Lapique, F. (2009). “Electrocoagulation for the treatment of textile wastewaters with Al or Fe electrodes: compared variations of COD levels, turbidity and absorbance”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 169(1-3), pp. 70-76.

22. Changmai, M., Pasawan, M. & Purkait, M. K. (2019). “Separation and purification technology treatment of oily wastewater from drilling site using electrocoagulation followed by microfiltration”, *Separation and Purification Technology*, Vol. 210, pp. 463-472.

23. Uriadnikova, I.V. (2020). “Analysis and determination of man-caused risks during regular work in the process of water purification by the method of reagent coagulation and electrocoagulation”, *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrogradskogo*, Vol. 5-6/2020(124-125), pp. 60-66.

24. Andronov, V.A., Danchenko, Yu.M., Makarov, Ye.O., Obizhenko, T.M. (2021). “Colloid-chemical aspects of reagent wastewater treatment of dairies”. *Problems of Emergency Situations: Materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii [Problems of Emergency Situations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]*. Kharkiv. May, 20, 2021, pp. 236-237.

25. Andronov, V.A., Danchenko, Yu.M., Makarov, Ye.O. (2019). “Rationale for the use of electrochemical methods for pre-treatment of wastewater from dairy plants”. *Ekolohichna bezpeka: problem I shliakhy vyrishennia: zbirnyk naukovykh statei XV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii [Environmental safety: problems and solutions: collection of scientific articles of the XV International scientific-practical conference]*. Kharkiv. September 9-13, 2019, pp. 9-13.

26. Benazzi, T.L., Luccio, M.D., Dalladgo, R.M., Steffens, J., Mores, R., Do Nascimento, M.S., Krebs, J. and Ceni, G. (2016). “Continuous flow electrocoagulation in the treatment of wastewater from dairy industries”, *Water Science & Technology*, Vol. 73(6), pp. 1418–1425.

© Ю. М. Данченко, Є. О. Макаров,
В. А. Андронов, О. Л. Мірус, 2022.

Науково-методична стаття.

Надійшла до редакції 06.05.2022.

Прийнято до публікації 27.05.2022.