

УДК 644.6:541.183
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.4\(502\).49](https://doi.org/10.15589/znp2025.4(502).49)

INTEGRATED COAGULATION-SORPTION PROCESS FOR REMOVING ORGANIC CONTAMINANTS FROM INDUSTRIAL EFFLUENTS

ІНТЕГРОВАНІЙ ПРОЦЕС КОАГУЛЯЦІЇ-СОРБЦІЇ ДЛЯ ВИДАЛЕННЯ ОРГАНІЧНИХ ЗАБРУДНЕНЬ ІЗ ПРОМИСЛОВИХ СТОКІВ

Volodymyr O. Lariushkin¹
v.aleksandrov.arch@gmail.com
ORCID: 0009-0002-4195-3353

Halyna V. Sakalova¹
sakalova@vntu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-9610-0967

Tamara M. Vasylynych²
tvasylynych@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7148-9312

Tetiana M. Dabizhuk²
dabiguk@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-3432-0398

Rostyslav D. Kryklyvyi²
kryklyvyir@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1470-9531

В. О. Ларюшкін¹,
аспірант
Г. В. Сакалова¹,
докт. техн. наук, професор
Т. М. Василінич²,
канд. техн. наук, доцент
Т. М. Дабіжук²,
канд. біол. наук, доцент
Р. Д. Крикливий²,
канд. техн. наук, доцент

¹*Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia*

²*Vinnitsia Mykhailo Kotsiubynskyi State Pedagogical University, Vinnitsia*

¹ *Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця*

² *Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, м. Вінниця*

Abstract. Purpose. The purpose of the study was to find the optimal combination of coagulation and sorption processes and technological parameter settings for treating wastewater from milk processing plants.

Method. The methodology was based on a comparative analysis of the effectiveness of three coagulants in specified optimal amounts. The optimal amount of dosed coagulant was determined based on the turbidity and color of the model solutions. The sorption efficiency for removing residual pollutant concentrations was determined by comparing the activity of regenerated activated carbon and pure activated carbon. Triglycerides, alanine, and lactic acid were used as contaminants in the model solutions at concentrations close to those found in real wastewater from dairy processing plants.

Results. The optimal combination of coagulation and sorption processes and effective technological parameters for wastewater treatment from milk processing plants were determined. The findings indicated a correlation between the ratio of fats to proteins in wastewater and the optimal dosage of the sorbent. The study included an investigation into the adsorption of the primary dye (methylene blue) by activated carbon. The observed efficiency of regeneration supports the recommendation of using of activated carbon sorbents for treating wastewater in food industry enterprises.

Scientific novelty. The scientific novelty of the work lies in deepening the understanding of the mechanisms of interaction between pollutants and coagulants and sorbents, as well as obtaining optimal combinations and modes of technological parameters for wastewater of a certain composition.

Practical importance. The practical significance of the research is improving the wastewater treatment technology at a milk processing plant using a combination of coagulation and sorption methods. With optimal combination of coagulation and sorption processes, more efficient wastewater treatment can be expected, along with a reduction in process cost and duration.

Key words: dairy industry; wastewater; coagulants; activated carbon; regeneration.

Анотація. Мета. Мета дослідження полягала у пошуку оптимальної комбінації процесів коагуляції і сорбції та режимів технологічних параметрів для очищення стічних вод молокопереробних підприємств.

Методика. Методологія базувалася на порівняльному аналізі ефективності трьох коагулянтів визначеної оптимальної кількості. Оптимальну кількість дозованого коагулянту визначали за значенням каламутності

та забарвленості модельних розчинів. Ефективність сорбції для видалення залишкових концентрацій полію-тантів визначали при порівнянні активності регенованого активованого вугілля і чистого. Як забрудники в модельних розчинах використовували тригліцерини, аланін та молочну кислоту в концентраціях, наближених до реальних стічних вод молокопереробного виробництва.

Результати. Було визначено оптимальне поєднання процесів коагуляції та сорбції та ефективні технологічні параметри процесів для очищення стічних вод з молокопереробних заводів. Визначено, що співвідношення жирів та білків у стічних водах корелюється з оптимальною дозою сорбента. Дослідження включало вивчення адсорбції первинного барвника (метилового синього) активованим вугіллем. Спостережувана ефективність регенерації підтверджує доцільність використання сорбентів на основі активованого вугілля для очищення стічних вод на підприємствах харчової промисловості.

Наукова новизна. Наукова новизна роботи полягає у поглибленні розуміння механізмів взаємодії забруднювачів із коагулянтами та сорбентами та отриманні оптимальних комбінацій та режимів технологічних параметрів для стічних вод певного складу.

Практичне значення. Практичне значення дослідження полягає в удосконаленні технології очищення стічних вод на молокопереробному підприємстві за допомогою комбінації методів коагуляції та сорбції. При оптимальному комбінуванні процесів коагуляції і сорбції варто очікувати більш ефективного очищення стічних вод, зниження собівартості процесу і його тривалості.

Ключові слова: молокопереробна промисловість; стічні води; коагулянти; активоване вугілля; регенерація.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Забезпечення ефективного очищення стічних вод харчової промисловості є однією з ключових екологічних та технологічних проблем сучасного виробництва. Харкові підприємства генерують значні обсяги забруднених стоків, що містять високу концентрацію колоїдних і розчинних органічних речовин, жирів, білків, барвників, мікроорганізмів та інших компонентів. Наприклад, на підприємствах молокопереробної промисловості утворюється велика кількість стічних вод із високою концентрацією забрудників, які в свою чергу підвищують кислотність, викликають евтрофікацію водойм, збільшують БСК та ХСК [1].

Частка забруднених стічних вод до загального обсягу води досягає в середньому по галузі 77 %. За останні десять років водоспоживання підприємств харчової промисловості значно зросло що пояснюють переважно низькою ефективністю роботи наявних очисних споруд. Традиційні методи очищення таких стічних вод часто виявляються недостатньо ефективними саме через високе навантаження на очисні споруди, а також через значне відставання технологій очищення стоків від сучасних технологій виробництва харчових продуктів, які передбачають використання нових хімічних реагентів і матеріалів [3].

Оптимізація водоспоживання та використання оборотного водопостачання підприємств, очищенням стічних вод до нормативних вимог перед скиданням у водойми дозволить вирішити проблему забруднення навколишнього середовища шкідливими речовинами підприємствами харчової галузі.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав [2, 4] що використання комплексних, комбінованих систем очищення стічних вод харчових підприємств

є перспективним напрямком досліджень і промислових впроваджень, оскільки передбачає зниження експлуатаційних витрат і підвищення екологічної безпеки очищених вод.

Склад стічних вод молокопереробного підприємства має спільні риси з іншими харчовими виробництвами (виробництво цукру, безалкогольних напоїв, ін.): низькі рН, високий вміст завислих і розчинених речовин переважно органічного походження; тому технологічні схеми водоочищення дуже схожі [3]. Типова технологічна схема очищення стічних вод таких виробництв складається з наступних стадій:

- 1) усереднення і механічна очищення;
- 2) хімічне (реагентне) очищення і знезараження;
- 3) фізико-хімічна обробка;
- 4) біологічне, або біохімічне очищення;
- 5) обробка осаду, що утворився при очищенні стічних вод [4].

Нами проведенні дослідження для розробки комбінованого методу очищення стічних вод, що поєднує реагенте очищення та фізико-хімічну обробку.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНИШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Послідовне застосування процесів коагуляції та сорбції дозволяє суттєво підвищити ефективність реагентного, механічного та фізико-хімічного очищення, забезпечуючи стабільне видалення зважених, колоїдних частинок, та добре розчинних органічних сполук, які важко піддаються біологічній деградації. Коагуляція сприяє агрегуванню дисперсних домішок і зменшенню мутності, тоді як сорбційні процеси вилученню розчинених органічних молекул забруднювачів, які важко осаджувати. Найчастіше в технологіях очищення стічних вод харчових виробництв використовують самостійно, однак можливість їх використання в об'єднаній послідовності

дозволить знизити концентрацію залишкових забруднюючих речовин, пришвидшити та здешевити процес очищення [4, 5].

Наукові дослідження в цій сфері є особливо актуальними з огляду на:

- поглиблення розуміння механізмів взаємодії забруднювачів із коагулянтами та сорбентами;
- пошук оптимальних комбінацій та режимів технологічних параметрів для різних типів харчових стоків;
- зниження експлуатаційних витрат і підвищення екологічної безпеки очищених вод;
- відповідність сучасним екологічним нормативам і стандартам по викидах у водні об'єкти;

Для вдосконалення технологічної схеми очищення стічних вод молокопереробних підприємств, що передбачатиме поєднання методів коагуляції і сорбції, необхідно визначити найбільш ефективний коагулянт, його оптимальні витрати та технологічні параметри сорбційного процесу.

З огляду на це, **мета дослідження** полягала у пошуку оптимальної комбінації процесів коагуляції і сорбції та режимів технологічних параметрів у схемі очищення стічних вод молокопереробних підприємств.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проводили на модельних розчинах, що мали концентрації забруднюючих речовин близькі до стоків реальних молокопереробних підприємств. Моделювали стічні води молочних виробництв, що мають співвідношення жиру і білка менше 1 (характерні для виробництва знежиреного молока, йогуртів та молочних коктейлів), а також досліджували більш концентровані розчини, що моделюють змішані в усереднювачі всі стоки молочних виробництв, співвідношення жирів і білків яких вище 3. Значення K (співвідношення жирів до інших політантів) залежить від виду молочної продукції, але переважно не перевищує значення 5 [5].

В якості коагулянтів в роботі запропоновано дослідити ефективність використання розчинів сульфату алюмінію, хлориду алюмінію (ХА) – $AlCl_3$ та хлориду заліза. Оптимальну кількість дозованого коагулянту визначали за значенням каламутності та забарвленості модельного розчину згідно залежностей:

$$D = (6 \div 8) \sqrt{B}, \quad (1)$$

$$D_k = 7 \sqrt{M}, \quad (2)$$

де B – значення забарвленості води, мг Pt/дм³ (визначають фотометричним методом за стандартною платино-кобальтовою шкалою); M – значення каламутності води, NTU (визначають типовим нефелометричним методом).

Значення D визначають у мг/дм³, перерахованих на $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, відповідно для інших коагулянтів здійснюють перерахунок на еквімолярну кількість. Оптимальне дозування визначають за вищим значенням D або D_k [3]. Враховуючи, що коагулянти дозують у вигляді 5%-вих водних розчинів, концентрацію додатково перераховували, враховуючи розведення.

Оптимальне дозування обраних коагулянтів визначити за вищим значенням каламутності, відповідно концентрація їх становила (Таблиця 1):

Для проведення адсорбційного методу очищення стоків від водорозчинних органічних політантів на підприємствах харчової промисловості найчастіше використовують промислове активоване вугілля. Нами запропоновано використовувати регеноване хімічним способом активоване вугілля (АВр). Промислове активоване вугілля (АВ) марки БАУ-А (Хімпром, Україна), синтезоване із деревини берези було попередньо використаний на стадії приготування цукрового сиропу [2,7]. Освітлений цукровий сироп використовують у виробництві згущеного молока, солодких йогуртів, ін.

Дослідження адсорбції барвника метиленовий синій було проведено для визначення сорбційної ємності сорбенту за спектрофотометричними методами, описаними у [6]; межі абсолютної похибки при вимірюванні коефіцієнтів пропускання в спектральному діапазоні 400–750 нм становили не більше 0,5 %. Вимірювання проводили з використанням кювет з довжиною оптичного ходу 10 мм.

Дослідження проводили на модельних розчинах, для визначення ефективності вилучення із стічних вод наступних забруднюючих речовин: жири, білки та молочна кислота. Для визначення концентрацій цих політантів у розчинах були використані стандартні методи та типові методики:

Визначення жирових речовин методом екстрагування. Для проведення аналізу випарювали 100 мл

Таблиця 1. Оптимальні витрати сорбентів

Назва коагулянту, формула	Концентрація коагулянту, при різних співвідношеннях жирів і білків, мг/дм ³		Концентрація розчину коагулянту, при різних співвідношеннях жирів і білків, %	
	$K = 1$	$K = 3$	$K = 1$	$K = 3$
Сульфат алюмінію (СА) $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	41	98	0,08	0,11
Хлорид алюмінію (ХА) $AlCl_3$	8	19	0,1	0,15
Хлорид заліза (ХЗ) $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	16	38	0,07	0,1

проби стічної води у випарних чашках, саму пробу відбирали колбою на 100мл. Після випарювання зі стінок чашок збирали сухий осад на середину скальпелем, зволожували 2мл $\text{Ba}(\text{OH})_2$ і знову висушували при 105 °С до сухого залишку. Сухий залишок переносили в паперовий патрон апарату Сокслета та екстрагували жири киплячим етером 3–4 год. Колбу апарату попередньо зважували. Потім випарювали розчинник (етер) насухо, колбу з жиром висушували до постійної ваги при 105 °С, і по різниці за вагою визначали кількість жирових речовин:

$$x = \frac{(a - b) \cdot 1000}{V}, \quad (3)$$

де x – вміст жирів у взятій пробі, мг/л; a – вага колби після екстрагування, г; b – вага колби до екстрагування, г; V – обсяг взятої проби води, мл; 1000 – коефіцієнт переведення вагових одиниць.

Визначення вмісту білків здійснювали біуретовим методом [6], метод заснований на вимірюванні інтенсивності забарвлення розчину, в якому відбувається кольорова реакція на білки з утворенням синього комплексного з'єднання синього кольору. Така методика дозволяє ідентифікувати білки в розведених розчинах з найвищим рівнем точності. Інтенсивність забарвлення визначають на фотоелектроколориметрі при червоному світлофільтрі (754 нм).

Для встановлення концентрації α -гідроксіпропіонової кислоти використовували потенціометричне визначення рН. Використання цього методу є доцільним для визначення концентрації молочної кислоти в розчині через точність результатів, оскільки визначення відбувалось через дисоціацію по гідроксид-іону H^+ . Результати значення рН у перерахунок на концентрацію C [г/дм³] визначають за формулою:

$$C = 10^{-\text{pH}}. \quad (4)$$

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

На стадії доочищення запропоновано використовувати відпрацьований і далі хімічно регенерований сорбент – активоване вугілля (АВ). Використання регенерованого сорбенту дозволить зменшити витрати на очищення стічних вод, знизити собівартість процесу за статтею «речовини і матеріали» і вирішити проблему зберігання та вивезення відпрацьованих матеріалів. Регенерацію АВ здійснювали за такими послідовними стадіями:

1. Промивання в гідродинамічному режимі при масовому співвідношенні (суміш) : $\text{H}_2\text{O} = 1 : 4$, температурі процесу 40 °С протягом 60 хв.

2. Кип'ятіння в 0,5 % розчині NaOH або KOH протягом 60 хв і 4 % розчині HCl 60 хв а потім фільтрування, промивання дистильованою водою; температура процесу 40 °С;

Додаткове промивання дистильованою водою до $\text{pH} = 7$ і висушування (за потребою) [7].

Відпрацьоване активоване вугілля можна використовувати у сорбційному процесі доочищення 3 рази за умови його хімічної регенерації по закінченню кожного процесу. Максимальну сорбційну ємність визначали за метиленовим синім, відносну сорбційну ємність розраховували за 100%-ю сорбційною ефективністю АВ ($A_{\text{max}} = 280,2$ мг/г).

Таблиця 2. Сорбційна ємність сорбентів за метиленовим синім

Номер зразка	Назва сорбенту	A_{max} , мг/г	Відносна сорбційна ємність, %
1	Активоване вугілля (АВ)	280,2	100,0
2	Відпрацьоване активоване вугілля	85,5	30,5
3	Відпрацьоване і регенероване активоване вугілля (АВр)	228,7	81,6

Як свідчать результати досліджень (Таблиця 2), використання регенерованого сорбенту (варіант 3), є менш ефективне за чисте активоване вугілля (варіант 1), але при врахуванні економічного фактору, прийнятне використання такої суміші для очищення стічних вод.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Згідно проведених досліджень коагуляції модельних забруднених стоків варто відмітити, що більш ефективним за ступенем очищення був коагулянт (ХЗ) для обох варіантів модельних розчинів в порівнянні з іншими розчинами солей алюмінію. Також експериментально підтверджено, що існує лінійна залежність між кількістю коагулянта і величиною K – співвідношенням жирів і білків у вихідному розчині (рис. 1).

Представлені емпіричні залежності кількості розчину для кожного коагулянта в залежності від початкового співвідношення жирів і білків у стічних водах представлені для модельних розчинів при максимальному співвідношення жирів і білків $K = 3$. При вищих значеннях K залежність відхиляється від лінійності.

Було проведено аналіз фільтрату після коагуляції. Як показують результати досліджень, вміст жирів після коагуляції значно нижчий за нормативні значення, тому розчини не потребують доочищення за цим показником. Для всіх варіантів визначено досить високий вміст молочної кислоти після коагуляції і видалення осаду, а рН стоків не досягає нормативних значень. Також у розчині залишилася досить значна кількість білків, переважно розчинних.

Ефективність коагуляції, що залежить від обраного коагулянту та рівня полутантів, представлена на рис. 2.

Використання ХЗ демонструє найвищу ефективність у процесі осадження жирів (в середньому на

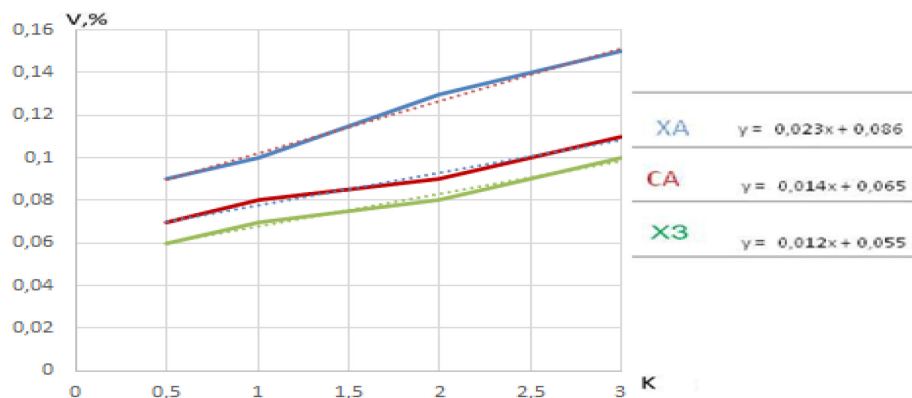


Рис. 1. Залежність дозування (V , %) коагулянту від початкового співвідношення жирів і білків у розчині (K)

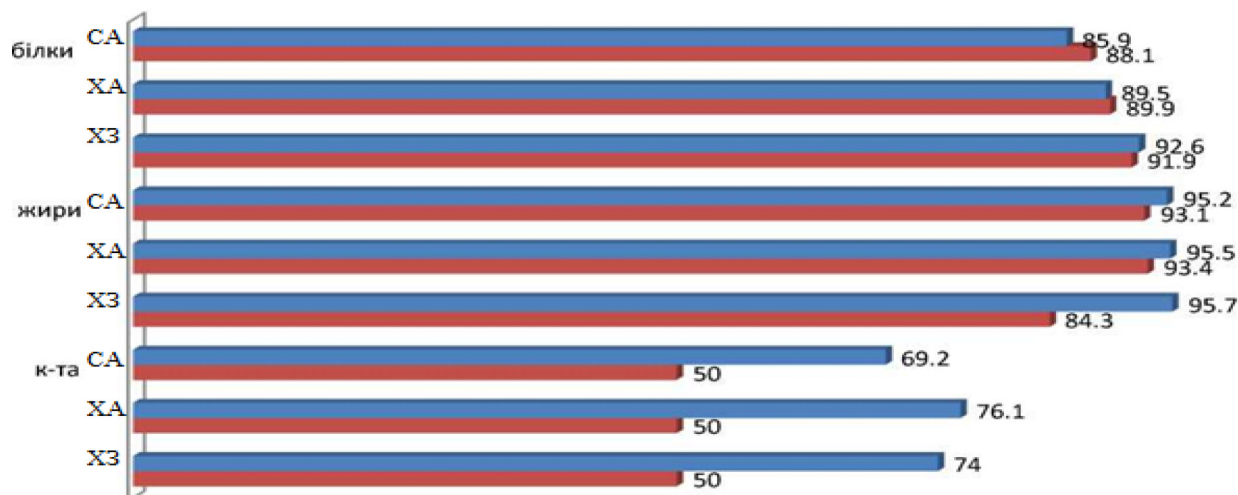


Рис. 2. Ефективність осадження жирів, білків і молочної кислоти (%) у стічних водах: ■ співвідношення жирів і білків у початкових розчинах менше 1; ■ співвідношення жирів і білків у початкових розчинах = 5

93 %), білків (на 90 %). Молочна кислота осаджується на 62 %, що нижче за значення осадження XA (63,05 %), але, враховуючи що сорбційним методом можливо легко усунути залишкову кількість молочної кислоти, як найбільш ефективний визначаємо коагулянт хлорид заліза. Отже, необхідність подальшого доочищення всіх варіантів обумовлена надлишковою кількістю молочної кислоти і важко осаджуваних білків.

Для подальшого дослідження використали модельні розчини, що містять молочну кислоту, концентрацією 0,006 мг/дм³, у відповідності до залишкової концентрації після коагуляції; аланін (модельовання вмісту водорозчинних білків) концентрацією 0,002 мг/дм³. Досліджено процес сорбції молочної кислоти і аланіну регенованим сорбентом (ABp), і чистим активованим вугіллям (марки БАУ-А).

Розраховані показники ефективності адсорбції аланіну і молочної сорбентами наведено у Таблиці 2. При порівнянні ефективності двох сорбентів варто відзначити, що ефективність їх використання майже однакова, відхилення відповідних показників для двох випадків знаходиться в межах похибки експерименту.

Отже, можемо стверджувати, що хімічно регеноване АВ можливо ефективно використовувати на стадії доочищення стічних вод харчових виробництв із забезпеченням необхідного ступеня вилучення політантів.

Варто очікувати, що запропонована нами технологічна схема (рис. 3) очищення стічних вод забезпечить її достатню якість, також зниження витрат на матеріали для очищення та енергетичні витрати; вміст забруднювачів буде нижчий за нормативні

Таблиця 2. Показники ефективності сорбції з використанням активованого вугілля

Сорбент	$A_{\max}$, мг/г	Перші сліди політанту в очищеному розчині, см ³ /см ³	Ефективний об'єм (V_{eff}), см ³ /см ³	Динамічна обмінна ємність (T)	Відносна ефективність сорбції (α), %	
					$a_{\max}$	$a_{\text{сер}}$
AB	128	1,9	8,0	0,018	95,7	79,3
ABp	122	1,6	6,9	0,019	95,9	76,2

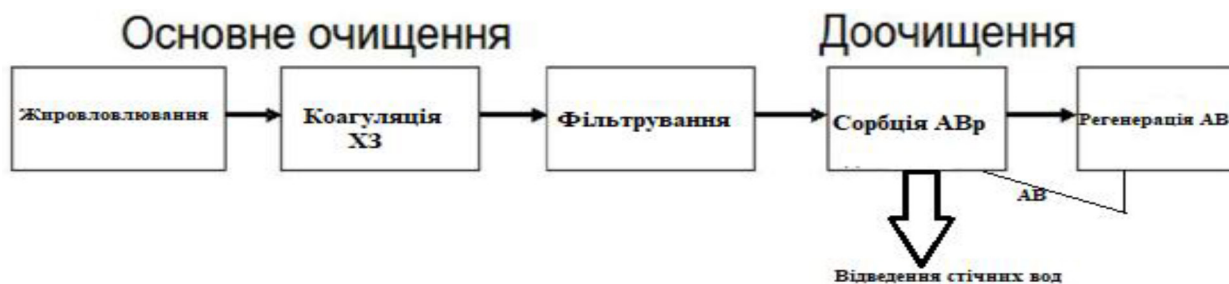


Рис. 3. Технологічна схема очищення стічних вод молочної промисловості

значення і допустимий для скиду у централізовану каналізаційну систему.

ВИСНОВКИ

Розробка і вдосконалення послідовних схем коагуляції та сорбції для очищення стічних вод харчової промисловості мають не лише наукову, але й значну прикладну важливість для сталого розвитку галузі, впровадження оборотних та маловідходних технологій та забезпечення екологічної безпеки довкілля.

Застосування хлориду заліза(III) як коагулянту забезпечує найкращий ефект осадження забруднюючих речовин і дозволяє знизити вміст жирів у стоках

в середньому на 93 %; білків на 90 %, молочної кислоти на 62 %.

Адсорбційне доочищення органічних розчинних компонентів регенованими сорбентами, належить до перспективних через задовільну ефективність, низку вартість, зменшення кількості побічних відходів. Використання активованого вугілля, регенованого після його використання є ефективним і забезпечує необхідну ступінь вилучення водорозчинних білків, аміно-, та гідроксикислот у технологічному процесі очищення стічних вод молокопереробних виробництв.

REFERENCES

- [1] Bordun, I., Vasylynych, T., Malovanyy, M., Sakalova, H., Liubchak, L., Luchyt, L. (2023). Study of adsorption of differently charged dyes by carbon adsorbents. *Desalination and water treatment*. 288. pp.151–158. DOI <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29332>
- [2] Sakalova, H. V., Sandul, O. M., Ranskiy, A. P., Vasylynych, T. M. (2024). Ochyshchennya stichnykh vod molokopererobnoyi promyslovosti sumishevymy sorbentamy [Wastewater Treatment of the Dairy Processing Industry by Mixed Sorbents]. *Visnyk VPI*. № 3, pp.14–20. DOI <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-174-3-14-20>
- [3] Zapolsky, A. K., Mishkova-Klymenko, N. A., Astrelin, I. M. et al.(2000). *Fizyko-khimichni osnovy tekhnolohiyi ochyshchennya stichnykh vod*. [Physico-chemical foundations of wastewater treatment technology]. Kyiv : Libra, 552 p.
- [4] Sabadash, V., Gumnitski, J., Hywluyd, A. (2016). Mechanism of phosphates sorption by zeolites depending on degree of their substitution for potassium ions. *Chemistry & Chemical Technology*. V. 10. № 2. pp. 235–240. DOI <https://doi.org/10.23939/chcht10.02.235>
- [5] Sabadash, V., Hywluyd, A., Gumnitski, J. (2016). Vyvchennya kinetyky vnutrishn'oyi dyfuziyi sorbtsiyi a-oksypropionovoyi kysloty tseolitom. [Internal Diffusive Sorption Kinetics Study of α -Hydroksipropionic ACID by Natural Zeolite]. *Visnyk VPI*. № (125). pp. 9–14. Retrieved from: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1893/1894>
- [6] Vlasenko, V. V., Golovko, M. P., Semko, T. V., Golovko, T. M. *Tekhnolohiya moloka i molochnykh produktiv: pidruchnyk*. (2018). [Technology of milk and dairy products: a textbook]. Kharkiv : KhDUHT, 202 p. Retrieved from: <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/8127>
- [7] Sandul, O., Titov, T., Kulyk, A., Sakalova, H., Shevchyk, K., Petrushka, K. (2024). Reuse of the spent sorbent mixture for wastewater treatment. *Environmental problems*. Vol. 9, № 4. pp. 193–198. DOI <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.193>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Бордун, І. М., Василінич, Т. М., Мальований, М. С., Сакалова, Г. В., Любчак, Л. В., Ліщут, Л. А. (2023). Вивчення адсорбції різнозаряджених барвників вуглецевими адсорбентами. *Desalination and water treatment*. 288. С. 151–158. DOI <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29332>
- [2] Сакалова, Г. В., Сандул, О. М., Ранський, А. П., Василінич, Т. М. (2024). Очищення стічних вод молокопереробної промисловості сумішевими сорбентами. *Вісник ВПІ*. № 3, С. 14–20. DOI <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-174-3-14-20>
- [3] Запольський, А. К., Мішкова-Клименко, Н. А., Астрелін, І. М. та ін. (2000). *Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод*. К. : Лібра, 552 с.
- [4] Сабадаш, В. В., Гумницький, Я. М., Гивлюд, А. М. (2016). Механізм сорбції фосфатів цеолітами залежно від ступеня заміщення ними іонів калію. *Chemistry & Chemical Technology*. V. 10. № 2. С. 235–240. DOI <https://doi.org/10.23939/chcht10.02.235>

- [5] Сабадаш, В. В., Гивлюд, А. М., Гумницький, Я. М. (2016). Дослідження внутрішньодифузійної кінетики сорбції α -оксіпропіонової кислоти цеолітом. *Вісник ВПН*. № (125). С. 9–14. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1893/1894>
- [6] Власенко, В. В., Головка, М. П., Семко, Т. В., Головка, Т. М. (2018). Технологія молока та молочних продуктів : навчальний посібник. Харків : ХДУХТ, 202с. URL: <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/8127>
- [7] Сандул, О. М., Тітов, Т. С., Кулик, А. М., Сакалова, Г. В., Шевчук, К., Петрушка, К. І. (2024). Повторне використання відпрацьованої сорбентної суміші для очищення стічних вод. *Environmental problems*. В.9, № 4. С. 193–198. DOI <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.193>

© Ларюшкін В. О., Сакалова Г. В., Василінич Т. М., Дабіжук Т. М., Крикливий Р. Д.
Дата надходження статті до редакції: 24.11.2025
Дата затвердження статті до друку: 17.12.2025
Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0