

УДК 504:628.4:621.311

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.146.2.30>

## БАГАТОПАРАМЕТРОВИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ СТИЧНИХ ВОД ПІДПРИЄМСТВ ОВОЧЕВОЇ КОНСЕРВАЦІЇ

**Себко В.В.** – д.т.н.,

професор кафедри хімічної техніки та промислової екології,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

[orcid.org/0000-0002-3561-6281](https://orcid.org/0000-0002-3561-6281)

**Нус І.Б.** – інженер, віце-президент із розвитку бізнесу

Компанія «Ohmium PEM electrolyzers»

[orcid.org/0009-0002-0166-5648](https://orcid.org/0009-0002-0166-5648)

**Новожилова Т.Б.** – доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології,

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

[orcid.org/0000-0003-2551-6954](https://orcid.org/0000-0003-2551-6954)

У статті розглядається розробка та обґрунтування трипараметрового методу контролю стічних вод підприємств овочевої консервації, що базується на комплексному вимірюванні електропровідності  $\chi$ , рН та температури  $t$ . В умовах інтенсивного розвитку харчової промисловості оперативний контроль стічних вод набуває особливого значення, оскільки підприємства генерують значні обсяги стоків із високим вмістом органічних і мінеральних забруднювачів. Традиційні методи аналізу, такі як визначення ХСК, БСК<sub>2</sub> та концентрацій важких металів, потребують значного часу та лабораторного обладнання, що ускладнює оперативне управління процесами очищення. Запропоновано конструкцію трансформаторного вимірювального перетворювача (ТВП), що реалізує принцип компенсації паразитного магнітного потоку та дозволяє точно визначати електропровідність та температурні параметри зразка стічних вод. Описано алгоритм сумісного вимірювального контролю  $\chi$ ,  $t$  та рН, а також наведено формули для розрахунку питомої електропровідності  $\chi$  та її температурної компенсації. Експериментальні дослідження проведені на зразках стічних вод у діапазоні температур  $t = 12 \dots 30$  °C та концентрацій 0,5–5 моль/л. Результати показують високу точність запропонованого методу з відносними похибками вимірювань  $t$  не більше  $\pm 1$  %. Переваги вихорострумового багатопараметрового контролю полягають у можливості оперативно відстежувати динаміку фізико-хімічного стану стічних вод, прогнозувати зміни їх складу та підвищувати ефективність управління системами очищення. Комплексний підхід дозволяє враховувати взаємозв'язок між електропровідністю, кислотністю та температурою, що відкриває перспективи для створення нових моделей моніторингу та оптимізації водопідготовки на підприємствах харчової промисловості. Запропонований метод є надійним інструментом для оперативного багатопараметрового контролю стічних вод, підвищення екологічної безпеки виробництва та забезпечення стабільної роботи очисних споруд.

**Ключові слова:** стічні води, овочева консервація, електропровідність, рН, температура, багатопараметровий контроль, моніторинг, очищення вод.

**Sebko V.V., Nus I.B., Novozhylova T.B. Multi-parameter method for monitoring wastewater parameters of vegetable canning enterprises**

The article examines the development and justification of a three-parameter method for monitoring wastewater from vegetable-canning enterprises, based on comprehensive measurement of electrical conductivity  $\chi$ , pH, and temperature  $t$ . In the context of the rapid growth of the food industry, prompt control of wastewater becomes particularly important, as enterprises generate significant volumes of effluents with high concentrations of organic

© Себко В.В., Нус І.Б., Новожилова Т.Б., 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

and mineral pollutants. Traditional analytical methods – such as determining COD, BOD<sub>5</sub>, and heavy-metal concentrations – require considerable time and laboratory equipment, which complicates real-time management of treatment processes. A design of a transformer eddy-current (TEC) is proposed, which implements the principle of parasitic magnetic-flux compensation and enables accurate determination of the electrical conductivity and temperature parameters of wastewater samples. An algorithm for combined measurement of  $\chi$ ,  $t$ , and pH is described, along with formulas for calculating specific electrical conductivity  $\chi$  and its temperature compensation. Experimental studies were carried out on wastewater samples within a temperature range of  $t = [12 \dots 30 \text{ }^\circ\text{C}]$  and concentrations of 0,5 – 5 mol/l. The results demonstrate high accuracy of the proposed method, with relative temperature-measurement errors not exceeding  $\pm 1\%$ . The advantages of eddy-current multiparameter control lie in its ability to promptly track the dynamics of the physicochemical state of wastewater; predict changes in its composition, and improve the efficiency of wastewater-treatment management. The integrated approach makes it possible to account for the interrelationship between electrical conductivity, acidity, and temperature, opening prospects for the development of new monitoring models and optimization of water treatment at food-industry enterprises. The proposed method is a reliable tool for rapid multiparameter wastewater monitoring, enhancing the environmental safety of production and ensuring stable operation of treatment facilities.

**Key words:** wastewater, vegetable canning, electrical conductivity, pH, temperature, multiparameter control, monitoring, water treatment.

**Постановка проблеми.** В сучасних умовах інтенсивного розвитку харчової промисловості питання екологічної безпеки та ефективного контролю якості стічних вод набуває особливої актуальності. Підприємства овочевої консервації генерують значні обсяги стоків, що містять широкий спектр органічних і мінеральних забруднювачів, зумовлених технологічними особливостями миття, бланшування, термічної обробки, маринування та стерилізації овочевої сировини. Характер цих стічних вод суттєво варіює залежно від виду сировини, сезонних коливань, застосованих рецептур та режимів технологічних процесів. Тому виникає потреба у впровадженні методів оперативного та багатопараметрового моніторингу, які дозволяють комплексно оцінити стан стічних вод і забезпечити дотримання екологічних норм.

Традиційні методи аналізу стічних вод, що включають визначення хімічного споживання кисню (ХСК), біологічного споживання кисню (БСК<sub>5</sub>), концентрацій завислих речовин, солей важких металів та органічних компонентів, залишаються важливими, але мають суттєвий недолік – тривалість виконання та потребу в лабораторному обладнанні. У багатьох випадках оперативне управління очищенняю вимагає методів, які здатні швидко реагувати на зміни складу стічних вод без складних підготовчих процедур. Для цього зростає роль фізико-хімічних параметрів, які можуть виступати індикаторами загального стану стічних вод та дозволяють здійснювати первинний експрес-контроль.

До таких параметрів належать електропровідність  $\chi$ , рН і температура  $t$ . Електропровідність є інтегральним показником, чутливим до концентрації іонів у розчині, зокрема хлоридів, нітратів, органічних кислот та залишків технологічних солей, що часто присутні у стоках консервних підприємств. Вимірювання електропровідності  $\chi$  дозволяє оперативно оцінити рівень мінералізації та опосередковано – ступінь забруднення стічних вод. Параметр рН є ключовим для контролю процесів маринування, ферментації та теплової обробки овочів, а також визначає агресивність стічних вод щодо обладнання, ефективність роботи очисних споруд та екологічну безпечність скидання. Температура  $t$  впливає на швидкість хімічних реакцій, розчинність компонентів, біохімічні процеси та коректність вимірювання інших параметрів, зокрема  $\chi$ , яка потребує температурної компенсації. Тому

комплексне застосування цих трьох параметрів забезпечує формування багатовимірної картини, що дозволяє підвищити достовірність та точність контролю стану стічних вод.

**Актуальність дослідження.** Проблематика раціонального контролю стічних вод у галузі переробних підприємств має особливе значення через те, що підприємства цього типу є сезонними, характеризуються різкими піковими навантаженнями та значними коливаннями складу стоків. У період інтенсивної переробки до очищення надходять стічні води з високим вмістом органіки та солей, тоді як у міжсезоння навантаження суттєво знижується. Це створює додаткові труднощі для систем очищення, які повинні швидко адаптуватися до змін умов та для забезпечення стабільної ефективності очищення. Багатопараметровий контроль дозволяє не лише фіксувати абсолютні значення показників, а й відстежувати динаміку процесів у реальному часі, що підвищує ефективність управління водопідготовкою та очищенням.

Науковий інтерес також полягає в тому, що комплексний аналіз електропровідності, рН та температури  $t$  дозволяє створювати нові підходи до моделювання та прогнозування якості стоків. Електропровідність у поєднанні з температурною компенсацією дає змогу визначати тенденції зміни мінералізації, тоді як рН може служити індикатором біохімічних процесів, ферментації чи надходження кислотно-лужних відходів. Взаємозв'язок між параметрами також дає можливість виявляти приховані процеси, які важко контролювати за допомогою одного показника.

Таким чином, коло поставлених завдань суттєво ускладнюється та розширюється, утворюючи важливу науково-практичну проблему, суть якої полягає у комплексному оцінюванні фізико-хімічного стану стічних вод і створенні надійної основи для ефективного моніторингу та оптимізації систем очищення на підприємствах харчової та переробної промисловості.

Застосування електропровідності  $\chi$ , температури  $t$  і рН, як основних параметрів багатопараметрового аналізу, створює надійну основу для ефективного моніторингу та оптимізації систем очищення на підприємствах харчової промисловості.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.**

Запропонований авторами підхід до багатопараметрового контролю стічних вод ґрунтується на використанні ТВП, що забезпечує узгоджене вимірювання електричних і температурних характеристик рідинних середовищ. Такий підхід безпосередньо пов'язаний з актуальними науковими та прикладними завданнями у галузі екологічного моніторингу, зокрема щодо забезпечення достовірної оцінки фізико-хімічного стану техногенно змінених водних систем. Реалізація методики комплексного контролю дозволяє мінімізувати похибки, що виникають у традиційних контактних методах, та забезпечує можливість відтворюваних вимірювань у середовищах зі складним іонним складом.

Використання ТВП створює науково обґрунтовані передумови для підвищення точності визначення якісних показників, зокрема водневого показника рН, який у забруднених стоках значною мірою залежить від іонної сили, температурних зсувів та електропровідності. Таким чином, авторський доробок сприяє розв'язанню важливої науково-практичної проблеми – формуванню універсального інструментарію для оперативного та достовірного контролю параметрів стічних вод у режимі реального часу. Запропоноване рішення може бути інтегроване у сучасні системи екологічного нагляду та автоматизовані комплекси очищення,

що підвищує ефективність їх роботи та забезпечує відповідність вимогам національних і міжнародних стандартів щодо контролю якості водних середовищ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні підходи до контролю фізико-хімічних параметрів зразків стічних вод переважно базуються на кондуктометричних, потенціометричних та рефрактометричних методах визначення питомої електропровідності  $\chi$  або питомого електричного опору розчинів [1-4]. Незважаючи на широке застосування цих методів, їх ефективність значною мірою залежить від конструкції вимірювальної комірки та електродної системи, особливо коли йдеться про середовища з низькою провідністю або про емульсійні рідини, характерні для стічних вод харчових підприємств. Відомо, що величина  $\chi$  є температурозалежним параметром і суттєво змінюється під впливом іонів домішок, органічних кислот та продуктів біохімічного розкладу, що ускладнює інтерпретацію результатів [5-7]. Традиційна практика приведення  $\chi$  до стандартної температури 25 °С, не завжди забезпечує достатню точність, оскільки різні зразки стічних вод можуть мати як кислу, так і лужну природу, що впливає на значення електропровідності [7-10]. У зв'язку з цим зростає потреба у методах, здатних одночасно та коректно визначати  $\chi$  і  $t$  у широкому діапазоні, що є принципово важливим для оцінювання стану водних середовищ і вибору оптимальних технологій їх очищення. Не менш значущим контрольним показником є водневий показник рН, який використовується для оцінювання придатності стічних вод до нормативів та визначення ефективності технологічних процесів очищення [8-12]. Значення рН тісно пов'язане зі ступенем жорсткості та іонною силою розчину, а також відображає концентрацію органічних кислот, що утворюються внаслідок розкладання білків і вуглеводів. Відхилення рН від допустимих меж є характерною ознакою погіршення екологічного стану водних екосистем і може спричинити небажані зміни, зокрема зниження розчинності кисню та розвитку процесів евтрофікації. Таким чином, результати сучасних досліджень свідчать про необхідність створення більш універсальних вимірювальних методів, здатних забезпечити точний комплексний контроль електропровідних і кислотно-лужних характеристик стічних вод різного походження.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.** Незважаючи на значний обсяг досліджень у галузі контролю фізико-хімічного стану стічних вод, низка важливих аспектів досі залишається недостатньо опрацьованою. Передусім це стосується створення вимірювальних засобів, здатних забезпечувати одночасне та достовірне визначення питомої електропровідності  $\chi$ , температури  $t$  та активної кислотності складних багатокомпонентних середовищ, характерних для стічних вод підприємств харчової та переробної галузей. Існуючі кондуктометричні системи, орієнтовані переважно на контроль чистої або слабо забрудненої води, виявляються недостатньо точними при роботі з емульсіями, слабкими електролітами чи розчинами з високою кількістю органічних включень.

Важливою нерозв'язаною проблемою залишається також компенсація впливу температурних коливань на результати вимірювань. Більшість традиційних приладів використовують спрощені моделі температурних поправок, які не враховують специфічних особливостей хімічного складу пивних стоків, що містять органічні кислоти, азотовмісні сполуки, солі та продукти мікробіологічних процесів. Унаслідок цього виникають додаткові похибки, які обмежують достовірність контролю та ускладнюють визначення придатних технологій очищення. Окремим невирішеним завданням залишається побудова чутливих індуктивних

перетворювачів, здатних працювати у широкому діапазоні частот і володіти високою завадостійкістю щодо зовнішніх електромагнітних полів. Брак ефективних методів компенсації паразитних магнітних потоків та вторинних індукованих сигналів істотно впливає на точність вимірювань у реальних умовах експлуатації. Усе це визначає необхідність удосконалення методології індуктивного контролю, розроблення нових схемних рішень та створення багатопараметрових перетворювачів, здатних до стабільної роботи в умовах значної варіабельності складу та властивостей стічних вод.

**Мета та завдання дослідження.** Розроблення та обґрунтування трипараметрового методу контролю стічних вод підприємств овочевої консервації на основі комплексного вимірювання електропровідності  $\chi$ , рН і температури  $t$ .

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Дослідити багатопараметровий метод сумісного вимірювального контролю питомої електричної провідності  $\chi_r$ , температури  $t$  і рН стічних вод.
2. Розробити алгоритм сумісного вимірювального контролю параметрів  $\chi_r$ ,  $t$  і рН зразків стічних вод.
3. Отримати співвідношення, які описують багатопараметровий метод сумісного вимірювального контролю параметрів питомої електричної провідності  $\chi_r$ , температури  $t$  і рН стічних вод.

**Наукова новизна.** Наукова новизна роботи полягає у розробленні та теоретичному обґрунтуванні багатопараметрового підходу до контролю стічних вод, який поєднує індуктивне вимірювання питомої електропровідності, визначення температури та аналіз кислотності середовища в межах єдиного вимірювального комплексу. Запропоновано структуру індуктивного трипараметрового перетворювача з підвищеною чутливістю до змін фізико-хімічних характеристик слабких електролітів та емульсійних систем, характерних для стічних вод підприємств харчової галузі. На відміну від відомих рішень, у роботі враховано складні багатоконпонентні процеси у стоках виробництва овочевої консервації, що дає змогу отримувати більш достовірні результати у широкому інтервалі частот магнітного поля.

Практична цінність роботи полягає у створенні багатопараметрового методу контролю стічних вод підприємств овочевої консервації, який забезпечує оперативне та високоточне визначення електропровідності  $\chi$ , рН, температури  $t$  та пов'язаних із ними характеристик середовища. Запропонована методика дозволяє враховувати вплив складних органічних домішок, кислотного чи лужного походження стоку, а також температурних коливань, що істотно підвищує достовірність контролю порівняно з традиційними кондуктометричними способами. Завдяки цьому підприємства отримують можливість своєчасно виявляти відхилення параметрів, що безпосередньо впливають на вибір способів очищення та на відповідність нормативним вимогам.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з важливим напрямом створення інтелектуальних сенсорних систем з адаптивною корекцією похибок та можливістю автоматичного вибору оптимального режиму вимірювань залежно від складу стічних вод. Розробка алгоритмів машинного навчання для обробки багатопараметрових сигналів, відкриває можливість побудови прогностичних моделей, здатних оцінювати ступінь забрудненості та передбачати динаміку змін фізико-хімічних характеристик у режимі реального часу. Це забезпечить більш ефективне управління процесом очищення, зменшить витрати ресурсів та сприятиме формуванню сучасних екологічно безпечних технологій.

**Методика експерименту.** Експериментальні дослідження виконували на лабораторних зразках стічних вод підприємств овочевої консервації, попередньо усереднених та профільтрованих від крупнодисперсних включень. Вимірювання питомої електропровідності  $\chi$ , рН та  $t$ , здійснювали за допомогою ТВП з радіусом робочого зонда  $a = 58 \times 10^{-3}$  м, частотою збудження  $f = 25$  МГц та узгодженою компенсаційною схемою. Температура контрольованих зразків змінювалася в інтервалі  $t = 12 - 30$  °С із використанням вбудованого нагрівального модуля та нікелевого терморезистора, як еталонного датчика температури.

**Результати та обговорення.** У ході проведених досліджень встановлено, що питома електропровідність стічних вод  $\chi$ , змінюється монотонно зі зростанням температури, що підтверджує температурну чутливість контрольованого середовища та адекватність обраного вихорострумowego методу. На рис. 1 подано структурну схему ТВП із розташованим усередині зразком стічних вод [10-12].

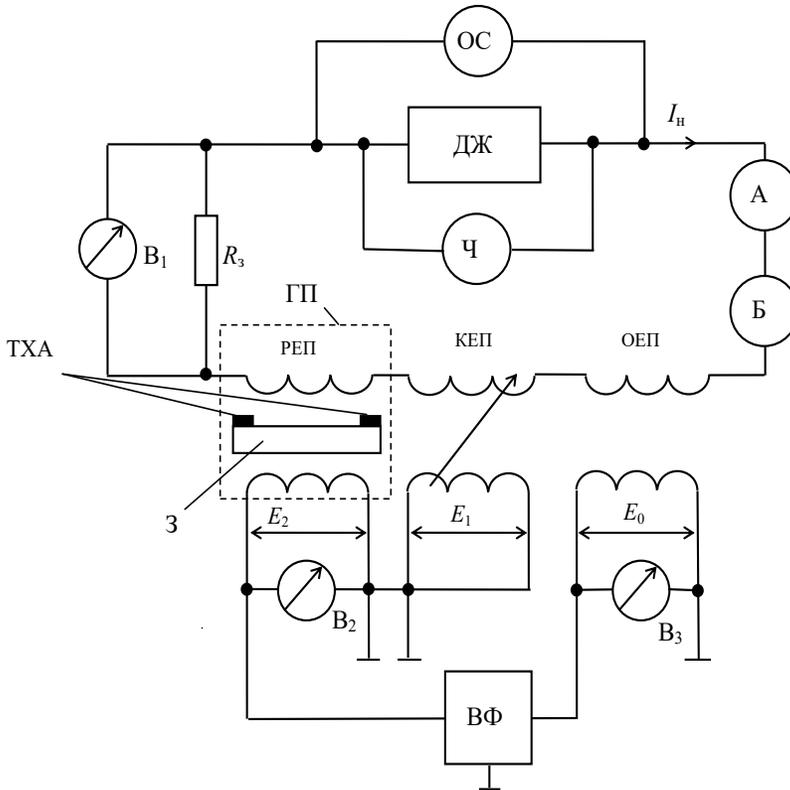


Рис. 1. Уточнена схема ТВП зі зразками стічних вод

Конструкція перетворювача реалізує принцип компенсації паразитного магнітного потоку  $\Phi_1$ , який виникає в повітряному зазорі між вимірювальною котушкою ТВП та досліджуванним зразком. До складу схеми входять: джерело змінного живлення ДЖ, амперметр А для контролю сили струму, частотомір ВЧ, осцилограф ОС, вимірювач ЕРС В2, зразковий опір  $R_0$ , фазометр ВФ, опорний електромагнітний

перетворювач ОП, а також вольтметр ВЗ для вимірювання ЕРС  $E_0$ . У схемі додатково використовується компенсаційний електромагнітний перетворювач КЕП. Робочий (РЕП), компенсаційний (КЕП) та опорний (ОЕП) мають однакові геометричні характеристики: кількість витків, радіуси первинних і вторинних обмоток та розміри осердя. Первинні обмотки РЕП, КЕП та ОЕП з'єднані послідовно – узгоджено за напрямом струму, тоді як вторинні обмотки РЕП і КЕП вмикаються послідовно-зустрічно. Компенсаційний перетворювач призначений для усунення ЕРС  $E_0$  за відсутності зразка в робочому перетворювачі, забезпечуючи нульовий рівень вихідного сигналу в еталонних умовах [10, 11]. У схемі також передбачено нагрівальний пристрій (НП), що дозволяє регулювати температуру досліджуваного зразка З. Для контролю температури застосовують нікелевий терморезистор [13]. Слід зазначити, що радіальні зміщення скляної трубки із зразком не впливають на результати експерименту, оскільки магнітне поле в області зразка є практично однорідним, а можливі перекося трубки механічно обмежені каркасом ТВП [12]. Для мінімізації впливу сторонніх магнітних полів перетворювач необхідно екранувати шляхом розміщення ТВП у металевому провідному корпусі.

За умови сталої робочої частоти  $f$  радіус досліджуваного зразка стічних вод  $a$ , визначають на основі універсальної функціональної залежності  $K_t = f(\varphi)$  (див. табл. 1)

$$a = a_n \sqrt{\frac{E_t}{E_0 K_t}}, \quad (1)$$

де  $E_0$  – ЕРС перетворювача при відсутності зразка;  $E_t$  – ЕРС перетворювача зі зразком стічних вод.

Таблиця 1

**Залежності нормованих параметрів  $K_t$  та  $\varphi$ ,  
від узагальненого параметра  $x_t$  ТВП зі зразком стічних вод**

$\varphi$ , град	$K_t$	$x_t$
-6,47	0,9893	0,96
-6,65	0,9886	0,97
-6,84	0,9872	0,99
-6,91	0,9865	1,01
-7,20	0,9853	1,02
-7,45	0,9844	1,03
-7,74	0,9831	1,05
-8,05	0,9820	1,07
-8,25	0,9812	1,08
-8,46	0,9801	1,09
-8,69	0,9788	1,11

Формула (1) дає можливість коректно вибрати скляну трубку відповідних геометричних параметрів для подальшого визначення електричних та температурних характеристик рідинного зразка. На наступному етапі за залежністю  $\varphi = f(x_t)$  (див. табл. 1), визначають узагальнений параметр  $x_t$ , після чого обчислюють питому електричну провідність зразка за формулою

$$\chi_t = \frac{K_t^2 \cdot E_0 \cdot K_t}{\mu_0 \cdot a^2 \cdot E_t \pi f}, \quad (2)$$

де  $\mu_0$  – магнітна стала,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $f$  – частота магнітного поля, МГц;  $a$  – радіус зразка, м.

Температурна залежність питомої електричної провідності  $\chi$  для стічних вод описується лінійною апроксимацією [13]

$$\chi_t = \chi_0 (1 + \alpha(t - t_0)), \quad (3)$$

де  $\chi_0$  – питома електрична провідність при початковій температурі,  $t_0 = 12^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору зразка стічних вод.

Далі знаходимо температуру  $t$  зразка стічних вод, що контролюється

$$t = \frac{1}{\alpha f} \left( \frac{x_t^2 \cdot E_0 \cdot K \cdot \chi_1}{\mu_0 \cdot a^2 \cdot E_t \pi} - 1 \right) + t_0, \quad (4)$$

Знаходимо рН при різних температурах з досліджуваного діапазону

$$\text{pH} = \left( \frac{E_0 - E_t}{Q_t} - 1 \right) + t_0, \quad (5)$$

де  $Q_t$  – це коефіцієнт, який перетворює логарифм концентрації  $^+\text{H}$  у потенціал при температурах із досліджуваного діапазону  $t = 12 \dots 30^\circ\text{C}$ .

Таким чином, для визначення питомої електропровідності  $\chi$  у діапазоні температур  $t = 12 \dots 30^\circ\text{C}$ , у робочому перетворювачі розміщують скляну трубку із зразком рідини, далі за допомогою нагрівача регулюють температуру середовища. Подальше налаштування здійснюють шляхом зміни частоти намагнічувального струму ТВП до моменту, коли вимірний фазовий кут зсуву стає рівним фазовому куту  $\varphi$ . Після цього визначають параметр  $A_t$  та розраховують значення  $\chi_t$  для різних температур згідно з наведеним алгоритмом. У табл. 2 наведено результати визначення електричних і температурних параметрів зразків стічних вод. Для порівняння подано також питомі електропровідності  $\chi'$  та температури  $t'$ , визначені контрольними методами (кондуктометричний метод, нікелевий терморезистор [9, 10]), в таблиці наведено також значення відносних похибок  $\gamma_t$ .

Аналізуючи дані з табл. 2, можна встановити, що зі зростанням температури в діапазоні  $t = 12 \dots 30^\circ\text{C}$ , спостерігається чітка й закономірна тенденція до підвищення питомої електропровідності  $\chi$ , що відображає високу термочутливість досліджуваного середовища та узгоджується з відомими фізико-хімічними закономірностями. Паралельно з цим відбувається зростання фазового кута  $\varphi$ , що свідчить про поступову зміну поляризаційних характеристик рідкої фази та активацію релаксаційних процесів під впливом температури. Одночасно спостерігається плавне зниження величини рН, яке інтерпретується, як посилення кислотності стічних вод при нагріванні, що особливо характерно для середовищ із наявністю слабких органічних кислот.

**Головні висновки.** Таким чином, у ході виконання дослідження досягнуто поставленої мети – обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність застосування трипараметрового вихрострумовевого методу для комплексного контролю фізико-хімічних характеристик стічних вод підприємств овочевої консервації. Надано вимірну схему, яка забезпечує одночасне визначення питомої електропровідності, температури та рН, що значно підвищує інформативність

аналізу та зменшує похибки, зумовлені нестабільністю середовища. Показано, що використання узгодженого компенсаційного перетворювача дає змогу ефективно усунути вплив паразитних магнітних потоків, забезпечуючи високу відтворюваність та чутливість вимірювань. Проведені експерименти засвідчили чітку температурну залежність електропровідності досліджуваних зразків стічних вод  $\chi$ , а також суттєву варіабельність  $\chi$  і рН для різних за походженням зразків, що підтверджує необхідність одночасного багатопараметрового контролю зразків стічних вод. Встановлено, що застосування розробленої методики створює передумови для оперативного визначення характеру забруднення стічних вод і вибору оптимальних методів їх очищення. Комбінований підхід на основі електромагнітних вимірювань, може бути використаний як перспективний інструмент у системах екологічного моніторингу, зокрема для оцінки ефективності технологічних процесів, попередження теплового забруднення штучних та природних водойм й для контролю відповідності стічних вод чинним нормативним вимогам.

Таблиця 2

**Результати визначення електричних та температурних параметрів зразка стічних вод в діапазоні змінення загальної концентрації іонів**  
 $C = 0,5-5,0$  (моль/л);  $\alpha = 1,86 \times 10^{-2} 1/^\circ\text{C}$ ;  $t_0 = 12^\circ\text{C}$ ;  $a = 58 \times 10^{-3} \text{ м}$ ;  
 $t = 15 \dots 30^\circ\text{C}$ ,  $I = 52 \text{ мА}$ ;  $f = 25 \text{ МГц}$

$t, ^\circ\text{C}$	$t', ^\circ\text{C}$	$Q_i$	$\chi_i \cdot 10^{-1}, \text{ См/м}$	$\Phi, \text{ град}$	рН	$x_i$	$\chi_i' \cdot 10^{-1}, \text{ См/м}$	$\gamma_i, \%$
12,04	12	0,056587	8,29	6,5286	6,90	0,9600	8,27	0,30
15,01	15	0,056684	8,61	6,7964	6,74	0,9771	8,63	0,07
16,98	17	0,057381	8,92	6,9734	6,71	0,9929	8,91	-0,12
19,01	19	0,057778	9,24	7,1899	6,69	1,0086	9,23	0,05
20,99	21	0,058175	9,55	7,4035	6,67	1,0241	9,56	-0,05
23,02	23	0,058572	9,86	7,6182	6,63	1,0403	9,87	0,08
24,98	25	0,058968	10,21	7,8304	6,60	1,0542	10,19	-0,06
27,01	27	0,059365	10,49	8,0491	6,58	1,0691	10,50	0,04
29,01	29	0,059762	10,81	8,2538	6,55	1,0830	10,80	0,03
30,09	31	0,060159	11,12	8,4608	6,52	1,0972	11,11	-0,03

**Перспективи використання результатів дослідження.** Пов'язані з розширенням можливостей багатопараметрового контролю стічних вод та вдосконаленням моделей, що описують поведінку слабких електролітів і емульсійних систем різного походження. Доцільним є поглиблене вивчення взаємозв'язку між електропровідністю  $\chi$ , рН,  $t$  та концентрацією  $C$  органічних і неорганічних домішок, що притаманні стічним водам підприємств овочевої консервації. Подальше моделювання та експериментальне дослідження діелектричних і релаксаційних властивостей забруднених водних середовищ дозволить уточнити параметри імпедансних схем та підвищити точність вимірювальних методик.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Інструментальні методи хімічного аналізу [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спец. 161 «Хімічні технології та інженерія», спец. «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. Л.

М. Спасьонова, В. Ю. Тобілко, І. В. Пилипенко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 69 с.

2. Rico-Mendez M. A., Selvas R., Kharissova O. V. та ін. An efficient pH detector for water contamination based on Mach–Zehnder interferometer application. *Sci.* 2024. Vol. 6, № 4. Art. 80. DOI: 10.3390/sci6040080.

3. Мідик І. М., Лиса О. В. Оперативний контроль якості овочів за електричними характеристиками. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2018. Вип. 79, № 4. С. 17–24. DOI: 10.23939/istcm2018.04.017.

4. Cui X., Tang M., Zhu T. та ін. A water probe for direct pH measurement of individual particles via micro-Raman spectroscopy. *Journal of Environmental Sciences*. 2025. Vol. 149. С. 200–208. DOI: 10.1016/j.jes.2023.10.037.

5. Брицун В. М., Останіна Н. В. Особливості кондуктометричного контролю якості дистильованої води для фармакопейних потреб. *Фармакологія та лікарська токсикологія*. 2018. № 2 (58). С. 97–103.

6. Борисов О. О., Кофанова О. В. Потенціометрія, кондуктометрія і рефрактометрія як методи експрес-контролю якості ґрунтів і поверхневих вод у зонах відпочинку людей. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2019. Т. 9, № 1. С. 1–18. DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-44.

7. Савченко В. В., Синявський О. Ю., Бунько В. Я. Вплив магнітного поля на воду. *Енергетика і автоматика*. 2019. № 1. С. 6–15. DOI: 10.31548/energiya2019.01.006.

8. Баран Б. А., Бубенщикова Г. Т., Хрящевський В. М. Біологічна дія електромагнітного випромінювання. *Довкілля та здоров'я*. 2009. № 4. С. 43–46.

9. Кучерук В. Ю., Кулаков П. І., Мостовий Д. В. Фотоелектричний вимірювальний перетворювач параметрів потоку молока. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2017. № 1 (31). С. 66–71.

10. Маєвський С. М. Фазовимірювальні системи неруйнівного контролю [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», спец. «Комп'ютерно-інтегровані технології неруйнівного контролю та діагностики» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 288 с.

11. Лисенко Ю. Ю., Дугін О. Л., Куц Ю. В., Протасов А. Г. Застосування накладних перетворювачів в імпульсному вихрострумівому контролі. *Вісник НТУУ «КПІ». Приладобудування: збірник наукових праць*. 2016. Вип. 51(1). С. 58–63.

12. Pyrozhenko Ye. V., Sebko V. V., Zdorenko V. G., Zashchepkina N. M., Markina O. M. Informative testing method of beer sewage samples for mini-breweries. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 1, № 106. P. 28–41. DOI: 10.5604/01.3001.0014.5930.

13. Яворський Б. М., Детлаф А. А., Лебедев А. К. Довідник з фізики для інженерів та студентів вищих навчальних закладів. Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 2007. 1040 с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025