

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ЗА УМОВ ЖИВЛЕННЯ ВІД РІЗНИХ ТИПІВ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Отримано 29 бер. 2026 р.; рекомендовано до публікації 26 чер. 2026 р.
Доступно онлайн 30 чер. 2026 р.

Гулевський В. Б.¹, Постол Ю. О.², Белік Мілан³,
Рубаненко О. О.⁴, Лисенко О. В.⁵

Автор для кореспонденції: Гулевський Вадим,
e-mail: vadym.hulevskiy@tsatu.edu.ua

Анотація. У статті представлено результати експериментального дослідження роботи магнітної системи очищення стічних вод за умов живлення від різних типів відновлюваних джерел енергії. У ході експериментів відтворено характерні профілі генерації ВДЕ, що дало змогу оцінити реакцію магнітної системи на коливання доступної потужності та визначити чутливість технологічних параметрів до нестабільного енергопостачання.

Отримані результати засвідчили, що ефективність магнітної очистки суттєво залежить від типу та стабільності джерела живлення. Виявлено, що зміни потужності, притаманні різним видам ВДЕ, впливають на інтенсивність процесів очищення та енергетичні показники системи.

Проведені дослідження підтверджують доцільність використання відновлюваних джерел енергії для живлення магнітних систем очищення стічних вод, особливо в умовах автономних або гібридних енергетичних комплексів. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації режимів роботи, розроблення адаптивних алгоритмів керування та оцінки перспектив масштабування технології.

Ключові слова: магнітна система очищення; стічні води; відновлювані джерела енергії; сонячна енергетика; вітрова енергетика; мала гідроенергетика; змінна потужність; енергетична ефективність; ефективність очищення; автономні енергетичні системи.

Вступ. Зростання потреби в чистій воді та одночасне посилення вимог до енергоефективності технологічних процесів актуалізують необхідність впровадження таких систем очищення, які здатні забезпечувати високу ефективність за умов обмеженості або нестабільності енергоресурсів. У цьому контексті особливого значення набувають технології, що можуть працювати на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), забезпечуючи автономність та мінімізацію енергетичних витрат.

Електромагнітне очищення розглядається як перспективний напрям, що поєднує низьке енергоспоживання з можливістю інтенсифікації природних фізико-хімічних процесів. Дія електромагнітного поля сприяє зміні структури водних кластерів, підвищенню рухливості іонів та покращенню умов для коагуляції й осадження забруднювачів, зокрема важких металів та органічних речовин. Завдяки цьому магнітні методи демонструють

високу ефективність у вилученні завислих частинок, металів та частини органічних сполук, що робить їх придатними як для промислових, так і для комунальних систем водоочищення [1–5].

Поєднання магнітних технологій з ВДЕ відкриває можливість створення автономних або енергоадаптивних систем очищення води, здатних стабільно функціонувати в умовах нестабільного чи обмеженого електропостачання. Низькі та гнучкі енергетичні потреби магнітних систем дають змогу ефективно інтегрувати їх із сонячними панелями, вітровими турбінами або малопотужними гідрогенераторами. Таке поєднання забезпечує не лише зниження експлуатаційних витрат і скорочення вуглецевого сліду, але й можливість розгортання очисних модулів у віддалених районах, на малих підприємствах або в місцях з нерегулярною подачею електроенергії.

¹ канд. техн. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-1434-9724>

² канд. техн. наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-0749-3771>

³ PhD

<https://orcid.org/0000-0002-9907-5365>

⁴ д-р. техн. наук, професор.

<https://orcid.org/0000-0002-2660-182X>

⁵ PhD

<https://orcid.org/0000-0001-7085-7796>

^{1,2} Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Запоріжжя, Україна

^{3,4} Університет західної Богемії, Пльзень, Чеська Республіка

⁴ Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ, Україна

⁴ Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

⁵ IVL Шведський інститут досліджень довкілля, Стокгольм, Швеція

З огляду на це використання ВДЕ в поєднанні з магнітними технологіями створює передумови для формування енергоефективних, екологічно безпечних та технологічно гнучких систем водопідготовки, здатних забезпечувати стабільну роботу навіть за умов значних коливань доступної потужності.

Серед різних типів відновлюваних джерел енергії найперспективнішими для живлення магнітних систем очищення води є сонячна, вітрова та мала гідроенергетика (табл. 1). Кожне з цих джерел має власні технічні та експлуатаційні особливості, які визначають можливість їх ефективної інтеграції з магнітними технологіями, що вирізняються низькими та гнучкими енергетичними потребами [6–10].

Сонячна енергетика є одним з найпоширеніших і найзручніших варіантів для автономного живлення систем водоочищення. Фотоелектричні панелі забезпечують стабільну генерацію в денний час, а їхня модульність дає змогу легко масштабувати потужність відповідно до потреб конкретної установки [11]. Для магнітних систем, які споживають порівняно невеликі обсяги електроенергії, сонячні панелі можуть слугувати основним джерелом живлення, особливо в регіонах з високою інсоляцією. Використання акумуляторних накопичувачів дає змогу компенсувати добові коливання генерації та забезпечити безперервність роботи навіть у нічний час або за хмарної погоди. Крім того, сонячні системи потребують мінімального обслуговування, що робить їх

придатним для віддалених або важкодоступних територій.

Вітрова енергетика є ефективним доповненням або альтернативою сонячним системам, особливо в регіонах з високою середньорічною швидкістю вітру. Вітрові турбіни здатні генерувати електроенергію незалежно від часу доби, що підвищує загальну стабільність енергопостачання. Для магнітних систем очищення води, які можуть працювати в адаптивних режимах, вітрова генерація є цілком сумісною, оскільки дає змогу забезпечити роботу обладнання навіть за умов нерівномірного надходження енергії. Поєднання вітрових турбін із сонячними панелями створює синергетичний ефект, оскільки періоди низької сонячної активності часто компенсуються підвищеною вітровою активністю.

Мала гідроенергетика є найбільш стабільним і прогнозованим джерелом енергії серед ВДЕ, оскільки забезпечує рівномірну генерацію протягом доби [12, 13]. Навіть малопотужні гідрогенератори здатні забезпечити достатню кількість електроенергії для роботи магнітних систем, що робить їх особливо цінними для сільських районів, гірських територій або об'єктів, розташованих поблизу природних чи штучних водотоків. Перевагою малої гідроенергетики є її висока надійність та мінімальна залежність від погодних умов, що дає змогу використовувати її як базове джерело живлення, доповнюючи сонячними чи вітровими установками для покриття пікових навантажень.

Таблиця 1. Характеристики відновлюваних джерел енергії для живлення магнітних систем очищення води

Тип ВДЕ	Переваги для системи	Обмеження	Сумісність із магнітною системою	Технічні особливості
Сонячна енергетика	Висока доступність; проста масштабованість; низькі експлуатаційні витрати	Залежність від інсоляції; добові коливання	Підходить для електромагнітів і насосів у денні години; добре працює з АКБ	MPPT-контролери; робота з напругою 12/24/48 В; можливість імпульсних режимів
Вітрова енергетика	Генерація незалежно від часу доби; доповнює сонячну	Нестабільність вітрових потоків; потреба у відкритих майданчиках	Забезпечує роботу вночі; підходить для циклічних режимів насосів	Інверторні перетворювачі; контроль швидкості обертання; буферизація через акумулятори
Мала гідроенергетика	Найстабільніша генерація; робота 24/7; висока прогнозованість	Потребує доступу до водотоку; сезонні зміни рівня води	Може бути базовим джерелом живлення для всієї системи	Постійна напруга / струм; мінімальні коливання; можливість роботи без акумуляторів

Енергетичний профіль магнітних систем визначається трьома основними компонентами – електромагнітами, насосним обладнанням та системами керування, кожен з яких має власні особливості споживання та характерну динаміку навантаження. Аналіз енергетичних характеристик цих елементів є ключовою передумовою для створення автономних або енергоадаптивних комплексів очищення води, здатних ефективно працювати в умовах змінної та нестабільної генерації відновлюваних джерел енергії.

Електромагніти забезпечують формування магнітного поля, необхідного для вилучення феромагнітних частинок або магнітних сорбентів, і зазвичай працюють у стабільному режимі, що робить їх енергоспоживання передбачуваним. Рівень потужності визначається індукцією поля, конструкцією сердечника та тривалістю робочого циклу. Використання сучасних матеріалів, високоефективних магнітопроводів та оптимізованих схем намотування дає змогу мінімізувати втрати та забезпечити стабільну роботу навіть за умови обмеженої доступності електроенергії, характерної для ВДЕ.

У контексті живлення від відновлюваних джерел електромагніти мають низку переваг, що робить їх особливо сумісними з нестабільною генерацією.

По-перше, вони можуть працювати в імпульсному режимі, синхронізуючи споживання з піками виробітку сонячних панелей або вітрових турбін.

По-друге, індукцію магнітного поля можна знижувати без критичної втрати ефективності вилучення частинок, що забезпечує енергоадаптивність системи та можливість підлаштування під доступну потужність у реальному часі.

По-третє, за умови низької генерації ВДЕ електромагніти можуть переходити в циклічний режим роботи (наприклад, 5 хв «увімкнено» / 5 хв «вимкнено»), що дає змогу підтримувати працездатність системи без суттєвого зниження якості очищення. Отже, конструктивні та енергетичні особливості електромагнітів роблять їх добре пристосованими до роботи в умовах змінної потужності, що є характерним для сонячних, вітрових та малих гідроенергетичних установок. Це забезпечує можливість створення ефективних, гнучких та енергонезалежних систем магнітного очищення води.

Насосне обладнання, яке забезпечує циркуляцію води через електромагнітний модуль, є одним з найенергоємніших компонентів системи очищення, а його енергетичні потреби значною мірою залежать від витрати води, гідравлічного опору трубопроводів, необхідного тиску та режимів подачі. На відміну від електромагнітів, насоси працюють у динамічних умовах, де навантаження може суттєво змінюватися залежно від продуктивності системи та характеристик потоку. У систем, що живляться від відновлюваних джерел енергії, насоси мають низку особливостей, які визначають їх ефективність та адаптивність. Завдяки можливості гнучкого регулювання продуктивності вони здатні працювати в режимах часткового навантаження, підлаштовуючись під змінну потужність сонячних або вітрових установок. За умови низької генерації ВДЕ система може переходити на циклічну подачу води, наприклад 3 хв роботи та 7 хв паузи, зберігаючи при цьому загальну ефективність

очищення. У періоди високої сонячної чи вітрової активності насоси можуть працювати з підвищеною продуктивністю, синхронізуючи свою роботу з піками генерації та забезпечуючи інтенсивніше очищення. Використання акумуляторних накопичувачів дає змогу згладжувати коливання навантаження та підтримувати роботу насосів у критичні моменти, коли генерація мінімальна. Крім того, сучасні інверторні технології забезпечують можливість запуску насосів навіть за низької напруги, що є важливою перевагою для автономних систем на основі ВДЕ.

Системи керування забезпечують узгоджену роботу електромагнітів і насосів у магнітних установках очищення води та підтримують стабільність технологічного процесу. В умовах живлення від відновлюваних джерел енергії їхня роль особливо важлива, оскільки саме вони відповідають за адаптацію обладнання до змінної та нерівномірної генерації.

Узагальнення особливостей роботи електромагнітів, насосного обладнання та систем керування в умовах живлення від відновлюваних джерел енергії створює підґрунтя для практичної оцінки ефективності інтегрованої системи магнітного очищення стічних вод.

Мета роботи полягає в експериментальному дослідженні ефективності магнітної системи очищення стічних вод за умови живлення від різних типів відновлюваних джерел енергії, а також у визначенні впливу змінної доступної потужності на якість очищення, енергетичні показники та оптимальні режими роботи системи.

Виклад основного матеріалу. Для визначення ефективності системи магнітного очищення стічних вод було проведено експериментальне дослідження, спрямоване на оцінку її роботи за різних енергетичних режимів.

До складу експериментальної установки (рис. 1) входять електромагнітний модуль, насос з частотним регулюванням, блок керування, система трубопроводів, ємності для вихідних та очищених стічних вод, а також лабораторні прилади для визначення показників якості води.

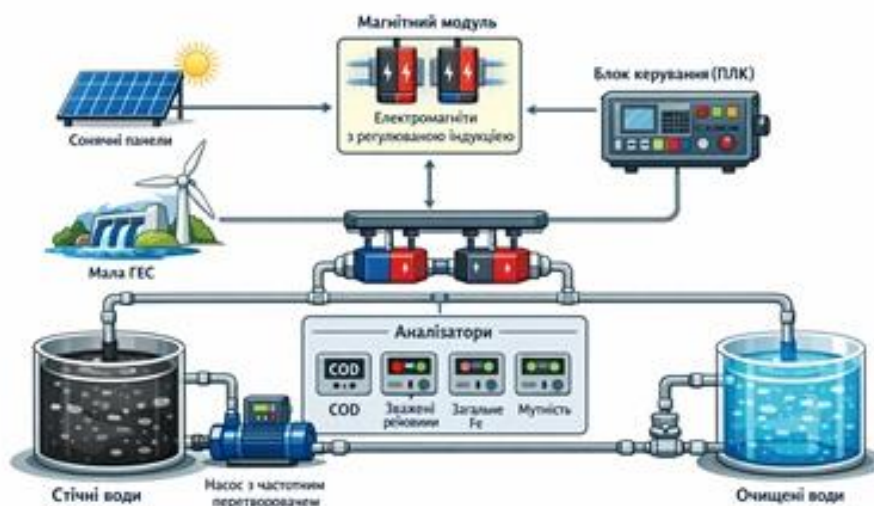


Рис. 1. Схема експериментальної установки

У дослідженні використовували модельні стічні води з такими початковими характеристиками: хімічне споживання кисню – 420 мг/л, концентрація зважених речовин – 7.2. Об'єм однієї серії очищення становив 50 л.

Магнітна обробка здійснювалася за допомогою електромагніта, конструктивно виконаного на основі лабораторного електромагніта EM-2M. Трубопровідна ділянка з потоком води розміщувалася між полюсами електромагніта, що забезпечувало рівномірний вплив магнітного поля на рідину в проточному режимі. Електромагніт формував індукцію в діапазоні 0.05–0.35 Тл, а її контроль здійснювався датчиком магнітної індукції ТПМ-1М з точністю ± 0.01 Тл. Така конфігурація давала змогу досліджувати вплив магнітного поля на процеси коагуляції, агломерації зважених частинок та видалення заліза в умовах реального руху рідини трубопроводом.

Насосний модуль складався з поверхневого відцентрового насоса «Дніпро» НБЦ-0.5, який працював через частотний перетворювач INSTART потужністю 0.4 кВт. Перетворювач отримував живлення, змодельоване відповідно до профілів відновлюваних джерел енергії, через блок керування та формував регульовану вихідну напругу 60–220 В і частоту 15–55 Гц, що забезпечувало адаптацію роботи насоса до доступної потужності. У режимах низької генерації вихідна напруга становила 60–110 В, у середньому – 120–170 В, а за умов максимальної генерації – 180–220 В. Це давало змогу підтримувати продуктивність насоса в межах 0.45–1.55 м³/год залежно від доступної енергії.

Блок керування забезпечував подачу та регулювання електричної енергії, контроль параметрів роботи електромагніта й насосного агрегату, а також фіксацію основних електричних характеристик під час експерименту. Дані знімалися в реальному часі та використовувалися для подальшої обробки й аналізу.

Умови й тривалість досліджень визначалися необхідністю відтворення реальних режимів роботи автономної системи очищення води.

Оскільки установка є лабораторною, дослідження проводилися в контрольованих умовах, без прив'язки до реальних погодних факторів. Замість цього застосовували типові енергетичні профілі, сформовані на основі довідкових характеристик малопотужних сонячних

панелей, вітрогенераторів та малих ГЕС [6, 7, 14, 15]. Температура навколишнього середовища підтримувалася на рівні 20–22 °С.

Енергетичні режими формувалися на основі трьох типових профілів ВДЕ: сонячного (40–170 Вт), вітрового (30–160 Вт) та профілю малої ГЕС (100–105 Вт). Сонячний профіль мав виражений добовий пік, вітровий характеризувався значними коливаннями, а гідроенергетичний забезпечував стабільну подачу потужності, що давало змогу відтворити реальні умови роботи автономних систем очищення води.

На основі доступної потужності було сформовано три режими роботи системи. У режимі низької генерації (45–60 Вт) магнітна індукція становила 0.08–0.12 Тл, частота насоса – 18–22 Гц, а продуктивність – 0.45–0.55 м³/год. У режимі середньої генерації (95–110 Вт) індукція досягала 0.18–0.22 Тл, частота насоса – 32–36 Гц, продуктивність – 0.85–1.00 м³/год. У режимі високої генерації (150–170 Вт) індукція становила 0.28–0.32 Тл, частота насоса – 48–52 Гц, а продуктивність – 1.35–1.55 м³/год. Оскільки сонячна та вітрова генерація характеризуються значними коливаннями, а мала гідроенергетика забезпечує стабільну подачу потужності, вибрані режими відображають здатність системи адаптувати магнітну індукцію, частоту роботи насоса та продуктивність до змінної або стабільної енергетичної доступності. Такий підхід дає змогу оцінити реальну ефективність магнітної системи очищення води в умовах, що відповідають типовим профілям роботи відновлюваних джерел енергії.

Для кожного з трьох енергетичних режимів виконували серію з п'яти повторних дослідів тривалістю 30 хв кожен, протягом яких здійснювали реєстрацію параметрів та відбір проб стічної води. Загальна тривалість досліджень становила 450 хв, що забезпечувало можливість порівняння ефективності роботи системи в різних енергетичних умовах, характерних для ВДЕ.

Табл. 2 узагальнює три режими роботи системи, що відповідають різним рівням доступної потужності від відновлюваних джерел енергії. Кожен режим характеризується певним діапазоном електричних параметрів, продуктивністю насосного агрегату й типовими умовами, за яких така потужність є доступною в реальних автономних енергетичних системах.

Таблиця 2. Режими роботи системи за умов живлення від ВДЕ

Параметр	Режим 1 (низька генерація ВДЕ)	Режим 2 (середня генерація ВДЕ)	Режим 3 (висока генерація ВДЕ)
Потужність, Вт	45–60	95–110	150–170
Магнітна індукція, Тл	0.08–0.12	0.18–0.22	0.28–0.32
Частота насоса, Гц	18–22	32–36	48–52
Продуктивність, м ³ /год	0.45–0.55	0.85–1.00	1.35–1.55
Типові умови ВДЕ	Ранок / вечір, хмарність, слабкий вітер	Середній сонячний день, помірний вітер	Полуденний пік сонця, сильний вітер або стабільна мала ГЕС

Стовпчастий графік (рис. 2) ілюструє порівняння ефективності очищення стічних вод за різних профілів живлення від відновлюваних джерел енергії. Аналіз отриманих даних показав, що рівень та стабільність генерації мають визначальний вплив на кінцеві показники очищення. Нестабільний характер вітрового профілю призводив до зниження ефективності окремих етапів обробки, що пов'язано з коливаннями напруги й частоти роботи насосного агрегату. Натомість стабільне живлення від малої ГЕС забезпечувало рівномірну та передбачувану роботу системи, що позитивно позначалося на загальній ефективності процесу.

Сонячний режим, попри характерні добові коливання інтенсивності генерації, продемонстрував найвищі

показники очищення за окремими параметрами. Зокрема, максимальних значень досягнуто саме за умов сонячного живлення: ступінь зниження показника COD становив 58 %, а видалення загального Fe – 72 %. Це свідчить про те, що навіть за наявності динамічних змін потужності сонячна генерація може забезпечувати високий рівень ефективності магнітної обробки стічних вод.

Додатково встановлено, що питомі витрати електроенергії також відрізнялися залежно від типу ВДЕ: для сонячного живлення вони становили 1.08 кВт·год/м³, для вітрового – 0.92 кВт·год/м³, а для малої ГЕС – 1.03 кВт·год/м³. Це свідчить про різну енергетичну вартість забезпечення роботи системи за кожного профілю генерації.

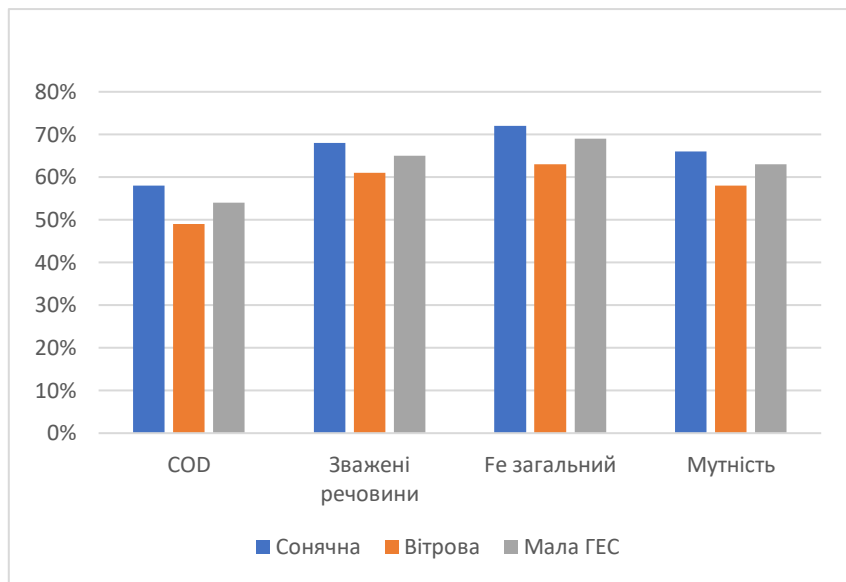


Рис. 2. Ефективність очищення

Для комплексної оцінки було введено інтегральний показник енергоефективності (*IEE*), який враховує одночасно якість очищення й питомі витрати енергії. Показник визначали за формулою:

$$IEE = \frac{\eta}{SEC}, \quad (1)$$

де η – узагальнена ефективність очищення (у частках), SEC – питомі витрати енергії, кВт·год/м³.

Узагальнену ефективність очищення визначали як середнє значення зниження COD, зважених речовин,

загального Fe та мутності. Отримані результати (табл. 3) демонструють, що найбільший інтегральний показник енергоефективності спостерігається в режимі роботи системи, який відповідає сонячному живленню. За умовами низької генерації ВДЕ система споживає найменшу кількість енергії на одиницю об'єму води, водночас забезпечуючи достатньо високий рівень очищення. Вітрове живлення характеризується помірною енергоефективністю, тоді як режим, що відповідає живленню від малої ГЕС, хоча й забезпечує високу продуктивність, має найнижчий показник *IEE* через найбільші питомі витрати енергії.

Таблиця 3. Інтегральний показник енергоефективності для різних джерел ВДЕ

Джерело ВДЕ	Узагальнена ефективність очищення, η	SEC , кВт·год/м ³	$IEE = \eta/SEC$
Сонячна	0.66	0.53	1.25
Вітрова	0.58	1.03	0.56
Мала ГЕС	0.63	1.60	0.39

Висновки. Результати дослідження підтверджують доцільність застосування магнітної системи очищення стічних вод у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії. Система продемонструвала здатність стабільно функціонувати за різних профілів генерації, однак її продуктивність істотно залежить від рівня та характеру подачі потужності.

Найвищу ефективність очищення зафіксовано за умов сонячного живлення: ступінь зниження показника COD становив 58 %, а видалення загального Fe – 72 %. Це свідчить про високу адаптивність магнітної технології до прогнозованих режимів генерації та її здатність ефективно працювати навіть за наявності добових коливань потужності. Стабільне живлення від малої ГЕС також забезпечувало рівномірну роботу системи, тоді як нестабільний вітровий профіль призводив до зниження результативності окремих етапів очищення.

Питомі витрати електроенергії (0.92–1.08 кВт·год/м³) підтверджують енергетичну доцільність запропонованої системи за умови раціонального вибору джерела живлення та оптимізації режимів роботи.

Отже, інтегрована магнітна система очищення є перспективною технологією для використання в автономних або гібридних енергетичних комплексах. Її ефективність значною мірою визначається стабільністю та структурою енергопостачання, що підкреслює важливість правильного підбору та моделювання профілів генерації від ВДЕ.

ПОСИЛАННЯ

- Milan Belik, Vadym Hulevskiy, Yulia Postol, Olena Rubanenko. Ways to improve the efficiency of cleaning cutting fluids. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 2024.R. 100 NR 4. С. 83–86. <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/17484>
- Moussa, M., Zarai, B. & Hachicha, M. Magnetic water treatment: theory and effects on treated water—a systematic review. Euro-Mediterr J Environ Integr 10, 2323–2342 (2025). <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00722-w>
- Hulevskiy, V., & Postol, Yu. (2022). Prospects for improving the treatment of wastewater and technical fluids. Ecological Safety and Balanced Use of Resources, 13(2), 143–148. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2\(26\)-143-148](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2(26)-143-148)
- Sadhvani Alonso, J. J., Vaswani Reboso, J., & Santiago, D. E. (2025). Treatment of Wastewater Using a Magnetically Recoverable Ag-Based Photocatalyst. Water, 17(2), 232. <https://doi.org/10.3390/w17020232>
- Česna, Jonas, et al. "Substantiation of the Radius of Curvature of the Chisel Plow Point of the Working Bodies of Tillage Implements." Agricultural Engineering, vol. 26, no. 1, Polish Society of Agricultural Engineering, 2022, pp. 231–241. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2022-0018>
- Коровушкін, В. О., Босак, А. В. (2025). ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ВІД НЕТРАДИЦІЙНИХ ТА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ. Відновлювана енергетика, (2(81)), 88–96. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).88-96](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).88-96)
- Качан, Ю. Г., Шрам, О. А. (2024). ЩОДО МОЖЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ТЕРИТОРІЇ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ. Відновлювана енергетика, (1(76)), 22–31. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).22-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).22-31)
- Dyadenchuk, Alena, et al. "Impact of Different Parameters on the Efficiency of GaN/Porous-GaAs/GaAs Solar Cell." System Safety: Human - Technical Facility – Environment, vol. 8, no. 1, Quality and Production Managers Association, 2026, pp. 128–138. <https://doi.org/10.2478/czoto-2026-0012>
- Кузнєцов, М. П., Лисенко, О. В., Хомутов, С. В. (2024). СЕЗОННЕ АКУМУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ В ГІБРИДНІЙ ЕНЕРГОСИСТЕМІ. Відновлювана енергетика, (1(76)), 6–21. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).6-21](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).6-21)
- Кузнєцов, М. П., Лисенко, О. В., Мельник, О. А. (2022). ЗАДАЧА ОПТИМІЗАЦІЇ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЗА РІВНЕМ ДИСПЕРСІЇ ГЕНЕРОВАНОЇ ПОТУЖНОСТІ. Відновлювана енергетика, (1(68)), 17–26. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\).17-26](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).17-26)
- Матях, С. В., Резцов, В., Суржик, Т. В. (2022). КОМПЛЕКСНІ РІШЕННЯ В СОНЯЧНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ. Відновлювана енергетика, (3(70)), 68–74. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).68-74](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).68-74)
- Mitrovic, D., Chacón, M. C., García, A. M., Morillo, J. G., Diaz, J. A. R., Ramos, H. M., Adeyeye, K., Carravetta, A., & McNabola, A. (2021). Multi-Country Scale Assessment of Available Energy Recovery Potential Using Micro-Hydropower in Drinking, Pressurised Irrigation and Wastewater Networks, Covering Part of the EU. Water, 13(7), 899. <https://doi.org/10.3390/w13070899>
- Laghari, J. A., Mokhlis, Hazlie, Bakar, A.H.A., Mohammad, H. A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 20, 2013, pp. 279–293, ISSN 1364 0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.002>.
- Kellogg, W.D., Nehrir, M.H., Venkataramanan, G. and Gerez, V. (1998) Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand-Alone wind, photovoltaic, and hybrid wind PV systems. IEEE Transactions on Energy Conversion, 13, 70–75. <http://dx.doi.org/10.1109/60.658206>
- Carta, J. A., Ramírez, P., & Velázquez, S. (2009). A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(5), 933–955.
- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.05.005>

RESEARCH ON THE OPERATION OF A MAGNETIC WASTEWATER TREATMENT SYSTEM POWERED BY VARIOUS TYPES OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Received Mar. 29, 2026; accepted Jun. 26, 2026
Available online June. 30, 2026

Hulevskiy V.¹, Postol Y.², Belik Milan³,
Rubanenko O.⁴, Lysenko O⁵

Author for correspondence: Hulevskiy Vadym,
e-mail: vadym.hulevskiy@tsatu.edu.ua

Abstract. *The article presents the results of an experimental study on the operation of a magnetic wastewater treatment system powered by various types of renewable energy sources. During the experiments, characteristic generation profiles of renewable energy sources were reproduced, which made it possible to evaluate the system's response to fluctuations in available power and to determine the sensitivity of technological parameters to unstable energy supply.*

The obtained results demonstrated that the efficiency of magnetic treatment significantly depends on the type and stability of the power source. It was found that power variations inherent to different renewable energy sources affect the intensity of the treatment processes and the system's energy performance.

The conducted research confirms the feasibility of using renewable energy sources to power magnetic wastewater treatment systems, particularly in autonomous or hybrid energy complexes. The findings can be used to optimize operating modes, develop adaptive control algorithms, and assess the prospects for scaling the technology.

Keywords: *magnetic treatment system; wastewater; renewable energy sources; solar energy; wind energy; small hydropower; variable power; energy efficiency; treatment efficiency; autonomous energy systems.*

Introduction. The growing demand for clean water, combined with increasingly stringent requirements for the energy efficiency of technological processes, highlights the need for treatment systems capable of maintaining high performance under conditions of limited or unstable energy resources. In this context, technologies powered by renewable energy sources (RES) are of particular importance, as they enable autonomous operation and minimize energy consumption.

Electromagnetic treatment is considered a promising approach that combines low energy demand with the ability to intensify natural physicochemical processes. The action of an electromagnetic field promotes changes in the structure of water clusters, increases ion mobility, and improves conditions for coagulation and sedimentation of contaminants, including heavy metals and organic substances. As a result, magnetic methods demonstrate high efficiency in removing suspended solids, metals, and certain organic compounds, making them suitable for both industrial and municipal wastewater treatment systems [1-5].

Integrating magnetic technologies with renewable energy sources opens the possibility of developing autonomous or

¹ PhD
<https://orcid.org/0000-0003-1434-9724>

² PhD
<https://orcid.org/0000-0002-0749-3771>

³ PhD
<https://orcid.org/0000-0002-9907-5365>

⁴ Dr. of Science (Tech.), professor
<https://orcid.org/0000-0002-6219-4221>

⁵ PhD
<https://orcid.org/0000-0001-7085-7796>

^{1,2} Dmytro Motorny Tavria State
Agrotechnological University, Zaporizhzhia,
Ukraine

^{3,4} University of West Bohemia, Pilsen,
Czech Republic

⁴ Institute of Renewable Energy, NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁴ National Technical University, Vinnytsia,
Ukraine

⁵ IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Stockholm,
Sweden

energy-adaptive water treatment systems capable of stable operation under conditions of fluctuating or limited electricity supply. The low and flexible energy requirements of magnetic systems allow their effective integration with solar panels, wind turbines, or small-scale hydrogenerators. Such combinations not only reduce operational costs and lower the carbon footprint but also enable the deployment of treatment modules in remote areas, at small enterprises, or in locations with irregular electricity supply.

Thus, the use of renewable energy sources in combination with magnetic technologies creates the prerequisites for developing energy-efficient, environmentally safe, and technologically flexible water treatment systems capable of maintaining stable operation even under significant fluctuations in available power.

Among the various types of renewable energy sources, the most promising for powering magnetic water treatment systems are solar, wind, and small-scale hydropower (Table 1). Each of these sources has its own technical and operational characteristics that determine the feasibility of their effective integration with magnetic technologies, which are distinguished by low and flexible energy requirements [6-10].

Solar energy is one of the most widespread and convenient options for autonomous power supply of water treatment systems. Photovoltaic panels provide stable daytime generation, and their modularity allows easy scaling of power output according to the needs of a specific installation [11]. For magnetic systems, which consume relatively small amounts of electricity, solar panels can serve as the primary power source, especially in regions with high insolation. The use of battery storage makes it possible to compensate for daily fluctuations in generation and ensure continuous operation even at night or during cloudy weather. In addition, solar systems require minimal maintenance, making them suitable for remote or hard-to-reach areas.

Wind energy is an effective complement or alternative to solar systems, especially in regions with high average annual wind speeds. Wind turbines are capable of generating electricity regardless of the time of day, which increases the overall stability of the power supply. For magnetic water

treatment systems that can operate in adaptive modes, wind generation is fully compatible, as it allows the equipment to function even under conditions of uneven energy input. The combination of wind turbines with solar panels creates a synergistic effect, since periods of low solar activity are often compensated by increased wind activity.

Small-scale hydropower is the most stable and predictable energy source among renewable options, as it provides consistent generation throughout the day [12-13]. Even low-power hydrogenerators can supply sufficient electricity for the operation of magnetic systems, making them particularly valuable for rural areas, mountainous regions, or facilities located near natural or artificial watercourses. The advantage of small hydropower lies in its high reliability and minimal dependence on weather conditions, which allows it to be used as a base power source, supplemented by solar or wind installations to cover peak loads.

Table 1. Characteristics of Renewable Energy Sources for Powering Magnetic Water Treatment Systems

Type of RES	Advantages for the System	Limitations	Compatibility with Magnetic System	Technical Features
Solar energy	High availability; easy scalability; low operating costs	Dependence on insolation; daily fluctuations	Suitable for electromagnets and pumps during daytime; works well with battery storage	MPPT controllers; operation at 12/24/48 V; possibility of pulsed modes
Wind energy	Generation independent of time of day; complements solar energy	Instability of wind flows; requires open areas	Ensures operation at night; suitable for cyclic pump modes	Inverter converters; rotational speed control; buffering via batteries
Small hydropower	Most stable generation; 24/7 operation; high predictability	Requires access to a watercourse; seasonal water level variations	Can serve as a base power source for the entire system	Constant voltage/current; minimal fluctuations; possibility of operation without batteries

The energy profile of magnetic systems is determined by three main components — electromagnets, pumping equipment, and control systems — each of which has its own consumption characteristics and specific load dynamics. Analyzing the energy characteristics of these elements is a key prerequisite for developing autonomous or energy-adaptive water treatment complexes capable of operating efficiently under conditions of variable and unstable generation from renewable energy sources.

Electromagnets generate the magnetic field required for the removal of ferromagnetic particles or magnetic sorbents and typically operate in a stable mode, which makes their energy consumption predictable. The power level is determined by the field induction, core design, and duration of the operating cycle. The use of modern materials, high-efficiency magnetic cores, and optimized winding configurations makes it possible to minimize losses and ensure stable operation even under limited energy availability, which is characteristic of renewable energy sources. In the context of renewable-powered operation, electromagnets have several advantages that make them particularly compatible with unstable generation.

First, they can operate in pulsed mode, synchronizing their consumption with peak output from solar panels or wind turbines.

Second, the magnetic field induction can be reduced without a critical loss of particle removal efficiency, providing energy adaptivity and enabling the system to adjust to the available power in real time.

Third, under conditions of low renewable energy generation, electromagnets can switch to a cyclic operating mode (for example, 5 minutes “on” / 5 minutes “off”), which allows the system to remain functional without a significant reduction in treatment quality. Thus, the structural and energy characteristics of electromagnets make them well-suited for operation under variable power conditions typical of solar, wind, and small hydropower installations. This enables the development of efficient, flexible, and energy-independent magnetic water treatment systems.

The pumping equipment, which ensures water circulation through the magnetic module, is one of the most energy-intensive components of the treatment system, and its energy demand largely depends on water flow rate, hydraulic

resistance of pipelines, required pressure, and supply modes. Unlike electromagnets, pumps operate under dynamic conditions, where the load can vary significantly depending on system throughput and flow characteristics. In systems powered by renewable energy sources, pumps have several features that determine their efficiency and adaptability.

Thanks to their ability to flexibly regulate output, pumps can operate under partial-load conditions, adapting to the variable power supplied by solar or wind installations. Under low renewable energy generation, the system can switch to cyclic water supply—for example, 3 minutes of operation followed by a 7-minute pause—while maintaining overall treatment efficiency. During periods of high solar or wind activity, pumps can operate at increased capacity, synchronizing their performance with generation peaks and providing more intensive treatment. The use of battery storage makes it possible to smooth out load fluctuations and maintain pump operation during critical periods when generation is minimal. In addition, modern inverter technologies enable pump start-up even at low voltage, which is a significant advantage for autonomous RES-based systems.

The control systems ensure coordinated operation of electromagnets and pumps in magnetic water treatment units and maintain the stability of the technological process. Under renewable-powered conditions, their role becomes particularly important, as they are responsible for adapting the equipment to variable and uneven energy generation.

Summarizing the operational characteristics of electromagnets, pumping equipment, and control systems under renewable energy supply provides the basis for a practical assessment of the efficiency of an integrated magnetic wastewater treatment system.

Problem Statement. The aim of this work is to experimentally investigate the efficiency of a magnetic wastewater treatment system powered by different types of renewable energy sources, as well as to determine the impact of variable available power on treatment quality, energy performance, and the optimal operating modes of the system.

Presentation of the Main Material. To evaluate the performance of the magnetic wastewater treatment system, an experimental study was conducted to assess its operation under different energy supply conditions. The experimental setup (Fig. 1) includes an electromagnetic module, a variable-frequency pump, a control unit, a system of pipelines, tanks for raw and treated wastewater, as well as laboratory instruments for determining water quality parameters.

Model wastewater was used in the study, with the following initial characteristics: chemical oxygen demand — 420 mg/L, suspended solids concentration — 180 mg/L, total iron content — 12 mg/L, and pH — 7.2. The volume of a single treatment cycle was 50 L.

Magnetic treatment was carried out using an electromagnet based on the laboratory electromagnet EM-2M. The pipeline section with the water flow was positioned between the poles of the electromagnet, ensuring a uniform magnetic field exposure to the liquid in a continuous-flow mode. The electromagnet generated a magnetic induction in the range of 0.05–0.35 T, monitored by a TPM-1M magnetic induction sensor with an accuracy of ± 0.01 T. This configuration made it possible to investigate the influence of the magnetic field on coagulation processes, agglomeration of suspended particles, and iron removal under conditions of real fluid movement through the pipeline.

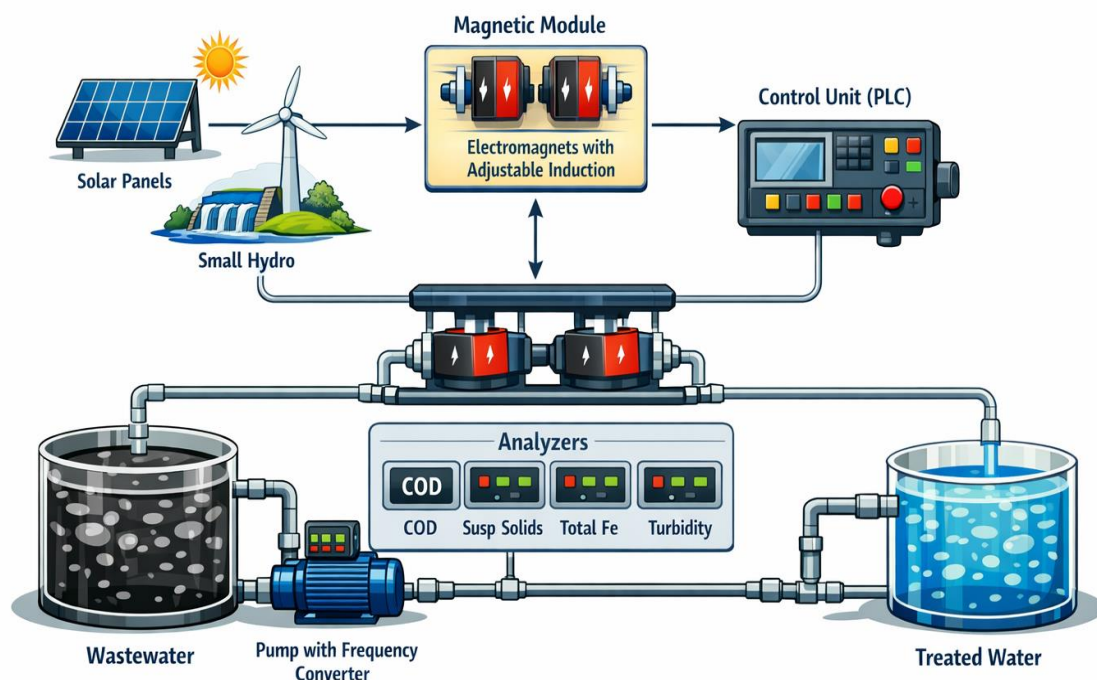


Fig. 1. Diagram of the experimental setup

The pump module consisted of a surface centrifugal pump “Dnipro” NBC-0.5, which operated through an INSTART frequency converter with a power rating of 0.4 kW. The converter received power simulated according to renewable energy generation profiles via the control unit and produced a regulated output voltage of 60–220 V and a frequency of 15–55 Hz, ensuring the adaptation of the pump operation to the available power. Under low generation conditions, the output voltage ranged from 60 to 110 V; under medium generation — from 120 to 170 V; and under maximum generation — from 180 to 220 V. This allowed the pump capacity to be maintained within 0.45–1.55 m³/h depending on the available energy.

The control unit provided power supply and regulation, monitored the operating parameters of the electromagnet and the pumping module, and recorded the main electrical characteristics during the experiment. The data were collected in real time and used for subsequent processing and analysis.

The operating conditions and duration of the experiments were determined by the need to reproduce realistic operating modes of an autonomous water treatment system.

Since the setup is laboratory-based, the experiments were carried out under controlled conditions, without reference to actual weather factors. Instead, typical energy profiles were used, formed on the basis of reference characteristics of low-power solar panels, wind turbines, and small hydropower plants [6, 7, 14, 15]. The ambient temperature was maintained at 20–22 °C.

The energy regimes were formed on the basis of three typical renewable energy profiles: solar (40–170 W), wind (30–160 W), and small hydropower (100–105 W). The solar profile exhibited a pronounced daily peak, the wind profile was characterized by significant fluctuations, and the hydropower profile provided a stable power supply, allowing the

operating conditions of autonomous water treatment systems to be realistically reproduced.

Based on the available power, three operating modes of the system were defined. In the low-generation mode (45–60 W), the magnetic induction ranged from 0.08 to 0.12 T, the pump frequency from 18 to 22 Hz, and the flow rate from 0.45 to 0.55 m³/h. In the medium-generation mode (95–110 W), the induction reached 0.18–0.22 T, the pump frequency 32–36 Hz, and the flow rate 0.85–1.00 m³/h. In the high-generation mode (150–170 W), the induction was 0.28–0.32 T, the pump frequency 48–52 Hz, and the flow rate 1.35–1.55 m³/h.

Since solar and wind generation are characterized by considerable variability, while small hydropower provides a stable power supply, the selected modes reflect the system’s ability to adapt magnetic induction, pump frequency, and flow rate to both fluctuating and stable energy availability. This approach makes it possible to evaluate the real-world performance of the magnetic water treatment system under conditions corresponding to typical renewable energy generation profiles.

For each of the three energy regimes, a series of five repeated experiments was performed, each lasting 30 minutes, during which system parameters were recorded and wastewater samples were collected. The total duration of the study was 450 minutes, which made it possible to compare the system’s performance under different energy conditions characteristic of renewable energy sources.

Table 2 summarizes the three operating modes of the system corresponding to different levels of available power from renewable energy sources. Each mode is characterized by a specific range of electrical parameters, the pump unit’s flow rate, and the typical conditions under which such power levels are available in real autonomous energy systems.

Table 2. Operating Modes of the System Under RES Power Supply

Parameter	Mode 1 (low RES generation)	Mode 2 (medium RES generation)	Mode 3 (high RES generation)
Power, W	45–60	95–110	150–170
Magnetic induction, T	0.08–0.12	0.18–0.22	0.28–0.32
Pump frequency, Hz	18–22	32–36	48–52
Throughput, m ³ /h	0.45–0.55	0.85–1.00	1.35–1.55
Typical RES conditions	Morning/evening, cloudy weather, low wind	Average sunny day, moderate wind	Midday solar peak, strong wind, or stable small hydropower

The bar chart (Fig. 2) illustrates a comparison of wastewater treatment efficiency under different renewable energy supply profiles. Analysis of the obtained data showed that the level and stability of power generation have a decisive influence on the final treatment performance. The unstable nature of the wind-energy profile led to reduced efficiency of certain treatment stages, which is associated with fluctuations in voltage and pump operating frequency. In contrast, the stable power supply from the small hydropower profile ensured uniform and predictable

system operation, positively affecting the overall treatment efficiency.

Despite the characteristic daily fluctuations in generation intensity, the solar mode demonstrated the highest treatment performance for several parameters. In particular, the maximum values were achieved under solar power supply: the reduction in COD reached 58%, and the removal of Fe reached 72%. This indicates that even under dynamic power variations, solar generation can provide a high level of efficiency for magnetic wastewater treatment.

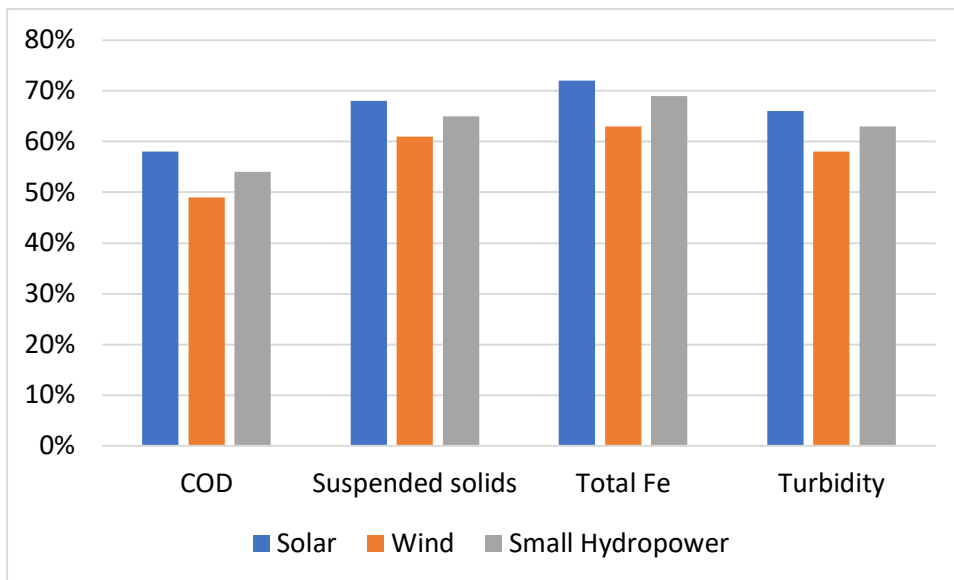


Fig. 2. Treatment efficiency

It was additionally established that the specific energy consumption also varied depending on the type of renewable energy source: for solar power supply, it was 1.08 kWh/m³, for wind power — 0.92 kWh/m³, and for small hydropower — 1.03 kWh/m³. This indicates differences in the energy cost of operating the system under each generation profile.

To provide a comprehensive assessment, an integral energy efficiency index (IEE) was introduced, which simultaneously accounts for treatment quality and specific energy consumption. The index was determined according to the following formula:

$$IEE = \frac{\eta}{SEC}, \quad (1)$$

where η - is the generalized treatment efficiency (fractional

value), SEC - is the specific energy consumption, kWh/m³.

The generalized treatment efficiency was determined as the average reduction of COD, suspended solids, total iron, and turbidity. The obtained results (Table 3) show that the highest integral energy efficiency index is observed in the operating mode corresponding to solar power supply. Under low-generation conditions of renewable energy sources, the system consumes the least amount of energy per unit volume of water while still providing a sufficiently high level of treatment. Wind power supply is characterized by moderate energy efficiency, whereas the mode corresponding to small hydropower, despite ensuring high throughput, has the lowest IEE value due to the highest specific energy consumption.

Table 3. Integral Energy Efficiency Index for Different RES Sources

RES source	Generalized treatment efficiency, η	SEC , kWh/m ³	$IEE = \eta / SEC$
Solar	0.66	0.53	1.25
Wind	0.58	1.03	0.56
Small hydropower	0.63	1.60	0.39

Conclusions. The results of the study confirm the feasibility of using a magnetic wastewater treatment system in combination with renewable energy sources. The system demonstrated the ability to operate stably under different generation profiles; however, its performance is significantly influenced by the level and nature of the available power supply.

The highest treatment efficiency was recorded under solar power conditions: the reduction in COD reached 58%, and the removal of total iron reached 72%. This indicates the high adaptability of the magnetic technology to predictable generation patterns and its ability to operate effectively even under daily power fluctuations. Stable power supply

from small hydropower also ensured uniform system operation, whereas the unstable wind-energy profile led to reduced efficiency in certain treatment stages.

The specific energy consumption (0.92–1.08 kWh/m³) confirms the energy feasibility of the proposed system, provided that the power source is selected appropriately and the operating modes are optimized.

Thus, the integrated magnetic treatment system is a promising technology for use in autonomous or hybrid energy complexes. Its effectiveness is largely determined by the stability and structure of the energy supply, which highlights the importance of proper selection and modeling of renewable energy generation profiles.

REFERENCES

1. Milan Belik, Vadym Hulevskiy, Yulia Postol, Olena Rubanenko. Ways to improve the efficiency of cleaning cutting fluids. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 2024.R. 100 NR 4. C. 83–86. <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/17484>
2. Moussa, M., Zarai, B. & Hachicha, M. Magnetic water treatment: theory and effects on treated water—a systematic review. Euro-Mediterr J Environ Integr 10, 2323–2342 (2025). <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00722-w>
3. Hulevskiy, V., & Postol, Yu. (2022). Prospects for improving the treatment of wastewater and technical fluids. Ecological Safety and Balanced Use of Resources, 13(2), 143-148. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2\(26\)-143-148](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-2(26)-143-148)
4. Sadhwani Alonso, J. J., Vaswani Rebozo, J., & Santiago, D. E. (2025). Treatment of Wastewater Using a Magnetically Recoverable Ag-Based Photocatalyst. Water, 17(2), 232. <https://doi.org/10.3390/w17020232>
5. Čėsna, Jonas, et al. "Substantiation of the Radius of Curvature of the Chisel Plow Point of the Working Bodies of Tillage Implements." Agricultural Engineering, vol. 26, no. 1, Polish Society of Agricultural Engineering, 2022, pp. 231-241. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2022-0018>
6. Korovushkin, V., & Bosak, A. (2025). IMPROVING THE RELIABILITY OF ELECTRICITY SUPPLY FROM NON-TRADITIONAL AND RENEWABLE ENERGY SOURCES. Vidnovluvana Energetika, (2(81), 88-96. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).88-96](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).88-96)
7. Kachan, Y., & Shram, O. (2024). ON THE POSSIBILITY OF CREATING EFFICIENT SOLAR POWER PLANTS ON THE TERRITORY OF IN-DUSTRIAL ENTERPRISES. Vidnovluvana Energetika, (1(76), 22-31. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).22-31](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).22-31)
8. Dyadenchuk, Alena, et al. "Impact of Different Parameters on the Efficiency of GaN/Porous-GaAs/GaAs Solar Cell." System Safety: Human - Technical Facility - Environment, vol. 8, no. 1, Quality and Production Managers Association, 2026, pp. 128-138. <https://doi.org/10.2478/czoto-2026-0012>.
9. Kuznietsov, M., Lysenko, O., & Khomutov, S. (2024). SEASONAL STORAGE OF ENERGY IN A HYBRID ENERGY SYSTEM. Vidnovluvana Energetika, (1(76), 6-21. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).6-21](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).6-21)
10. Kuznietsov, M., Lysenko, O., & Melnyk, O. (2022). THE PROBLEM OF OPTIMIZATION OF HYBRID ENERGY SYSTEM ACCORDING TO THE LEVEL OF DISPERSION OF GENERATED POWER. Vidnovluvana Energetika, (1(68), 17-26. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\).17-26](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).17-26)
11. Matyakh, S., Rieztsov, V., & Surzhyk, T. (2022). COMPLEX SOLUTIONS IN SOLAR ENERGY. Vidnovluvana Energetika, (3(70), 68-74. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).68-74](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).68-74)
12. Mitrovic, D., Chacón, M. C., García, A. M., Morillo, J. G., Diaz, J. A. R., Ramos, H. M., Adeyeye, K., Carravetta, A., & McNabola, A. (2021). Multi-Country Scale Assessment of Available Energy Recovery Potential Using Micro-Hydropower in Drinking, Pressurised Irrigation and Wastewater Networks, Covering Part of the EU. Water, 13(7), 899. <https://doi.org/10.3390/w13070899>
13. J.A. Laghari, H. Mokhlis, A.H.A. Bakar, H. Mohammad, A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 20, 2013, pp. 279–293, ISSN 1364 0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.002>.
14. Kellogg, W.D., Nehrir, M.H., Venkataramanan, G. and Gerez, V. (1998) Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand-Alone wind, photovoltaic, and hybrid wind PV systems. IEEE Transactions on Energy Conversion, 13, 70-75. <http://dx.doi.org/10.1109/60.658206>
15. Carta, J. A., Ramírez, P., & Velázquez, S. (2009). A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(5), 933–955. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.05.005>