

УДК:628.35:582.26

DOI <https://doi.org/10.32782/geotech2026.40.02>**Павлюх Л.І.**

Павлюх Л.І., доктор технічних наук, доцент, професор кафедри екології, хімії та хімічної технології, Державний університет «Київський авіаційний інститут», ORCID 0000-0002-7715-4601, lesia.pavliukh@npp.kai.edu.ua

МІКРОВОДОРОСТІ ЯК ПЕРСПЕКТИВНА ПЛАТФОРМА ДЛЯ СТАЛОГО ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД

У статті досліджено ефективність використання мікрководоростей у процесах доочищення стічних вод від біогенних елементів. Проаналізовано сучасні проблеми функціонування традиційних систем очищення стічних вод, зокрема недостатню їх ефективність у видаленні сполук азоту та фосфору в умовах зростаючого антропогенного навантаження та воєнних дій в Україні. Експериментальні дослідження проведено з використанням штаму *Euglena gracilis* Klebs HPDP-114, культивованого на штучно змішаних стічних водах із різними концентраціями фосфатів та амонійного азоту. Встановлено високу ефективність видалення фосфатів (до 94,5 %) і помірну ефективність видалення амонійного азоту (до 63,33 %) упродовж 4-добового періоду культивування. Визначено основні обмеження фітореMediaційних технологій, зокрема складність відокремлення біомаси та чутливість мікрководоростей до змін температурного режиму. Водночас обґрунтовано екологічні, економічні й енергетичні переваги фітореMediaційних підходів, а саме можливість отримання біопалива та біодобрив, зниження енергетичних витрат і повернення біогенних елементів у природний кругообіг. Результати дослідження підтверджують доцільність використання мікрководоростей як ефективного й екологічно безпечного інструменту для сталого очищення стічних вод і зменшення негативного впливу на водні екосистеми.

Ключові слова: мікрководорості, стічні води, очищення, біогенні сполуки, екологічна безпека, сталий розвиток.

Вступ. Забруднення навколишнього природного середовища є однією з найсерйозніших екологічних проблем сучасності, що викликає значне занепокоєння, особливо в умовах воєнних дій на території України після вторгнення Російської Федерації. Прісна вода має стратегічне значення для життєдіяльності суспільства, тому питання ефективного та сталого управління водними ресурсами посідає важливе місце в наукових, соціальних і політичних програмах у всьому світі. Незважаючи на посилення природоохоронного законодавства, водні ресурси планети продовжують зазнавати суттєвих кількісних і якісних впливів. Водне середовище є важливою складовою екосистем та відіграє ключову роль у підтриманні функціонування харчових ланцюгів. В умовах військових дій проблема забруднення водних об'єктів набуває особливої актуальності, оскільки руйнування інфраструктури призводить до потрапляння у водойми неочищених стічних вод, що містять значну кількість забруднювальних речовин, зокрема сполук

азоту та фосфору, які спричиняють евтрофікацію (Shamanskyi, 2017).

Постановка проблеми. Серед основних чинників, що ускладнюють ефективне очищення стічних вод і погіршують стан водних екосистем, важливе місце посідає руйнування очисних споруд. Унаслідок пошкодження або повного знищення таких об'єктів відбувається надходження повністю неочищених стічних вод до річок та інших водних об'єктів, що створює критичну екологічну ситуацію і становить значну загрозу для здоров'я населення.

Серйозною проблемою також є неефективність більшості віцілілих міських очисних споруд біологічного очищення, які часто здійснюють скидання стічних вод без достатнього доочищення від біогенних сполук. Це призводить до підвищення концентрацій сполук азоту та фосфору у водних об'єктах, що спричиняє розвиток процесів евтрофікації, інтенсивне заростання водойм, пригнічення розвитку водних організмів та втрати цінних біогенних ресурсів.

Певні обмеження має і використання природних методів очищення, зокрема біоплато та біоставків. Для їх ефективного функціонування необхідні значні земельні площі, що не завжди



Це стаття відкритого доступу
за ліцензією CC BY-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>

є можливим, особливо в умовах урбанізованих територій. Крім того, у разі застосування таких систем втрачається можливість отримання альтернативних енергетичних ресурсів, які можуть утворюватися у процесах доочищення стічних вод (Shamanskyi et al., 2021).

Іншим підходом є застосування хімічних реагентів для видалення забруднювальних речовин. Проте цей метод потребує подальшого очищення води від залишків хімічних сполук, які можуть становити небезпеку для водних екосистем і рибогосподарських об'єктів.

Поширеним методом очищення стічних вод є їх оброблення активним мулом із подальшим вторинним відстоюванням для його видалення. Однак така технологія не завжди забезпечує достатньо ефективне видалення біогенних елементів, зокрема сполук азоту та фосфору.

Крім того, деякі процеси очищення можуть супроводжуватися додатковим забрудненням атмосфери, що сприяє збільшенню викидів парникових газів, а отже, посиленню парникового ефекту. Таким чином, пошук нових екологічно безпечних і ефективних технологій очищення стічних вод є важливим завданням сучасної екологічної інженерії.

Мета статті – проаналізувати можливості використання мікроводоростей як перспективної біотехнологічної платформи для сталого очищення стічних вод, оцінити їх ефективність у видаленні біогенних сполук, зокрема сполук азоту та фосфору, а також визначити переваги застосування мікроводоростей у сучасних системах очищення води з урахуванням екологічних та енергетичних аспектів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сьогодні для боротьби із забрудненням навколишнього середовища застосовується чимало технологій, а процеси біоремедіації, як-от «зелені» технології, стають одними з основних екологічних методів, які вчені використовують у своїх дослідженнях (Pavliukh et al., 2020). Ключові результати досліджень показують, що деякі штами мікроводоростей можна успішно застосовувати для біологічного очищення води, забезпечуючи швидко та ефективно видалення фосфору й азоту, які сприяють евтрофікації водойм. Це відкриває можливість їх використання в системах очищення стічних вод як екологічно безпечної та економічно вигідної альтернативи хімічним методам (Shamanskyi et al., 2018). Останнім часом все більшу увагу привертають біологічні методи очищення стічних вод, зокрема ті, що використовують одноклітинні та багатоклітинні водні організми. Серед цих організмів особливий інтерес

викликають мікроводорості, оскільки вони є провідними біоагентами для біологічного очищення (Grimm et al., 2015; Sun et al., 2018; Harada et al., 2020). Інтерес до використання мікроводоростей у біологічному очищенні стічних вод пояснюється їхньою здатністю активно впливати на санітарний стан води. Водорості відіграють важливу роль у природних екосистемах, оскільки вони беруть активну участь у видаленні забруднювачів та поліпшенні якості води (Suzuki et al., 2013; Korn, 1964; Abdel-Raouf et al., 2012). На початкових етапах мікроводорості ефективно видаляють основну частину поживних речовин та органічної речовини, знижуючи загальний рівень забруднювальних речовин у стічних водах (Tahedl et al., 2001). На завершальних етапах їх застосування дає можливість провести більш глибоке очищення, забезпечуючи видалення залишкових речовин, як-от амоній, фосфати та нітрати, які важко видалити хімічним шляхом.

Дослідження особливостей фіторемедіації стічних вод із використанням штаму мікроводоростей *Euglena gracilis* Klebs HPDP-114. Штам мікроводоростей культивували на автоклавованих стічних водах із різними концентраціями фосфатів та амонійного азоту, що дало змогу запобігти контамінації сторонніми мікроорганізмами та забезпечити стерильні умови проведення експерименту. Це, зі свого боку, допомогло об'єктивно оцінити вплив варіацій концентрацій фосфатів і амонійного азоту на досліджувані процеси. Кожен експеримент повторювали тричі для підвищення достовірності отриманих результатів:

у першому (I) експерименті до 30 мг N-NH_4^+ дм^{-3-1} додавали 4 мг P-PO_4^{3-} дм^{-3-1} ;

у другому (II) експерименті до 50 мг N-NH_4^+ дм^{-3-1} додавали 7 мг P-PO_4^{3-} дм^{-3-1} ;

у третьому (III) експерименті до 90 мг N-NH_4^+ дм^{-3-1} додавали 14 мг P-PO_4^{3-} дм^{-3-1} .

Хімічний склад штучно змішаних стічних вод, використаних для культивування евгленових водоростей, було розроблено на основі модифікованого поживного середовища. Середовище містило необхідні макро- та мікроелементи для забезпечення стабільного росту мікроводоростей і додатково збагачувалося фосфатами й амонійним азотом у контрольованих концентраціях із метою дослідження процесів асиміляції біогенних елементів. Перед початком експерименту культуру було адаптовано до штучно змішаних стічних вод протягом 7 днів. Цей адаптаційний період дав можливість культурі пристосуватися до специфічних концентрацій фосфатів та амонійного азоту, а також до інших компонентів середовища, що є важливим для забезпечення стабільного росту

мікробіодоростей у середовищі та точного вимірювання їхньої ефективності у видаленні забруднювачів. Вибір проб для аналізу під час експерименту з культивування мікробіодоростей проводили на 0-ву, 1-шу, 2-гу, 3-тю та 4-ту доби. Це дало змогу детально вивчити динаміку росту водоростей, а також їхню здатність до поглинання біогенних елементів (азоту та фосфору) на різних етапах культивування.

Динаміка зміни концентрації фосфору й азоту в синтетичних стічних водах протягом 4-добового періоду культивування на них *E. gracilis* демонструє значну ефективність видалення біогенних елементів (рис. 1).

1-ша доба експерименту: відсоток видалення фосфору зі стічних вод становив 19,86–22,50 %. На цьому етапі спостерігалось помірне зниження концентрації фосфору, що вказує на початкову реакцію мікробіодоростей на нове середовище.

2-га доба експерименту: відзначено значне підвищення ефективності видалення фосфору, що становило 70,21–94,5 %. Найвищі показники були зафіксовані у варіанті з найнижчими концентраціями фосфатів та амонійного азоту (варіант I), що свідчить про позитивний вплив умов низького навантаження на зростання мікробіодоростей.

3-тя доба експерименту: у варіантах стічних вод із вищим рівнем навантаження біогенними речовинами (варіанти II та III) спостерігалось, що видалення фосфору перевищило 90 %. Це підкреслює адаптаційні можливості *E. gracilis* до умов підвищеного забруднення. Відповідно до отриманих даних, *Euglena gracilis* продемонструвала менш ефективне видалення амонійного азоту порівняно з фосфатами.

Динаміка відсотка видалення амонійного азоту впродовж 4 днів експерименту:

1-ша доба експерименту: відсоток видалення амонійного азоту становив 4,44–6,70 %. На цьому етапі спостерігалось незначне зниження, що може бути пов'язано з адаптаційними процесами мікробіодоростей до нового середовища.

2-га доба експерименту: зростання ефективності до 15,00–17,78 %. Хоча спостерігається позитивна динаміка, значення залишаються низькими порівняно з фосфатами.

3-тя доба експерименту: відзначено подальше зростання видалення до 28,36–46,67 %. Цей етап свідчить про покращення поглинання амонійного азоту, але все ще є значне відставання від видалення фосфатів.

4-та доба експерименту: відсоток видалення зріс до 43,00–63,33 %. Незважаючи на підвищення, амонійний азот залишається на нижчому рівні видалення порівняно з фосфатами.

Для оцінки інтенсивності росту *E. Gracilis* протягом періоду її культивування на стічних водах досліджували зміни сухої маси (рис. 2). **Початковий етап:** на першу добу спостерігалися найнижчі показники накопичення біомаси, що свідчить про адаптацію мікробіодоростей до нових умов середовища. **Фаза інтенсивного росту:** з другої доби розпочався значний приріст біомаси, що вказує на перехід культури до активного росту. Це може бути пов'язано з поліпшенням умов живлення, оскільки зростає ефективність вилучення біогенних речовин. **Вплив біогенних речовин:** спостереження підтверджують, що вищі концентрації амонійного азоту та фосфатів стимулюють продуктивність *E. Gracilis*. Чим більше цих елементів у воді, тим вищі результати накопичення біомаси. Продуктивність біомаси для різних варіантів експерименту:

- для варіанта з 4 мг $P-PO_4^{3-}$ $дм^{-3-1}$ + 30 мг $N-NH_4^+$ $дм^{-3-1}$: 112,50 мг $дм^3$ день $^{-1}$;
- для варіанта з 7 мг $P-PO_4^{3-}$ $дм^{-3-1}$ + 50 мг $N-NH_4^+$ $дм^{-3-1}$: 137,00 мг $дм^3$ день $^{-1}$;
- для варіанта з 14 мг $P-PO_4^{3-}$ $дм^{-3-1}$ + 90 мг $N-NH_4^+$ $дм^{-3-1}$: 167,50 мг $дм^3$ день $^{-1}$.

Технологічні схеми доочищення стічних вод від біогенних елементів із використанням мікробіодоростей супроводжуються низкою обмежень. Зокрема, суттєвою проблемою є висока трудомісткість процесів відокремлення біомаси мікробіодоростей від очищеної води (Vandamme et al., 2011;

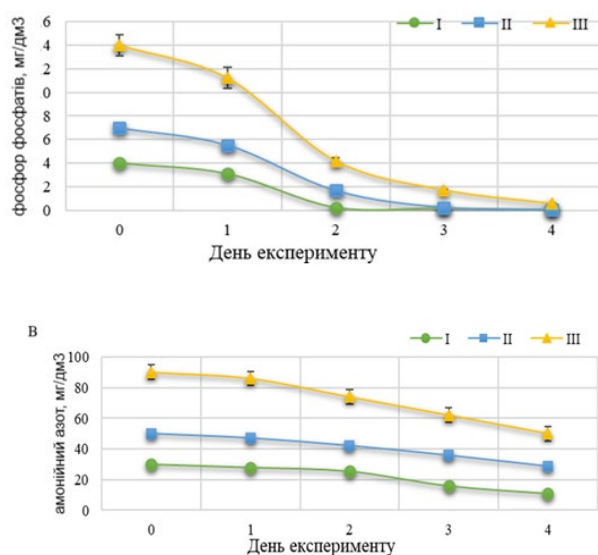


Рис. 1. Зміни концентрації фосфору (А) та азоту (В) в культуральних середовищах *E. Gracilis* відповідно до умов експерименту I, II та III

Fig. 1. Changes in the concentrations of phosphorus (A) and nitrogen (B) in the culture media of *E. gracilis* under the conditions of experiments I, II and III

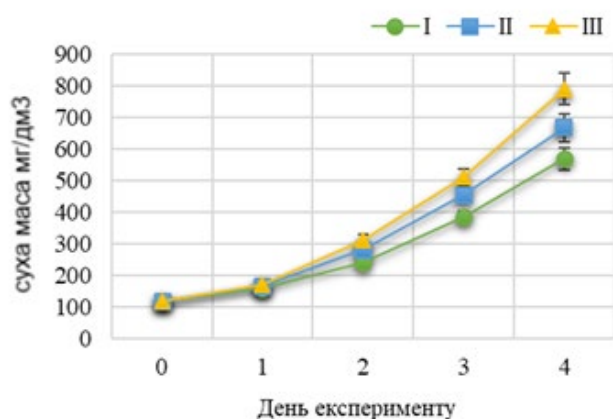


Рис. 2. Зміни сухої маси у *E. Gracilis* за різних композицій стічних вод відповідно до умов експерименту I, II та III
Fig.2. Changes in dry weight of *E. gracilis* under different wastewater compositions according to experimental conditions I, II and III

Reijnders, 2008). Крім того, ускладнення виникають на етапі культивування, оскільки мікрободорості є чутливими до коливань температурного режиму, що потребує додаткового контролю й оптимізації умов вирощування. Водночас технологічні схеми, що базуються на фітореMediaційних процесах, характеризуються низкою суттєвих переваг. Зокрема, вони забезпечують можливість отримання біопалива з біомаси мікрободоростей, а також виробництва біодобрив, що узгоджується з принципами циркулярної економіки та сприяє раціональному використанню ресурсів (Rawat et al., 2011; Razzak et al., 2013; Mahapatra et al., 2013; Eladel et al., 2019).

Центрифугування вважається найбільш ефективним методом збору біомаси з використанням механічних сил, але його застосування у великих масштабах обмежене через енергетичні витрати. Центрифугування може бути економічно ефективним, але потребує двоетапного процесу.

Вирощування мікрободоростей відбувається як у відкритих системах, так і у закритих (фотобіореакторах), що забезпечує їх контрольований ріст.

ФітореMediaція є однією з перспективних та ефективних технологій для очищення стічних вод, це зелена технологія, яка є безпечною для відновлення довкілля. Порівняно з дорогими традиційними методами, фітореMediaція має усі шанси на широке застосування на практиці.

Подальші дослідження та використання цієї технології для отримання очищеної води, що відповідає стандартам, покликані зберегти довкілля з метою зменшення навантаження на природні ресурси та забезпечення цілей сталого розвитку (табл. 1).

Висновки. Використання культури *Euglena gracilis* G.A. Klebs HPDP-114 у системах доочищення стічних вод характеризується низкою вагомим переваг. Ця мікрободорість демонструє високу ефективність у видаленні забруднювальних речовин, зокрема нітратів, фосфатів та інших біогенних елементів, що сприяє зниженню антропогенного навантаження на водні екосистеми та запобігає розвитку процесів евтрофікації. Важливою перевагою є також здатність до інтенсивного росту та накопичення значної кількості біомаси,

Таблиця 1. Перспективи використання фітореMediaційних технологій для очищення стічних вод
Table 1. The prospects for using phytoreMediaiation technologies for wastewater treatment

Блоки	Перспективи застосування мікрободоростей
Енергоефективний блок	<i>По-перше</i> , використання відпрацьованих мікрободоростей дає можливість отримувати біопаливо, що створює додаткову цінність біотехнологічного процесу очищення стічних вод. <i>По-друге</i> , застосування мікрободоростей у системах доочищення води сприяє зменшенню енергетичних витрат на експлуатацію очисного обладнання, підвищуючи ефективність і економічну доцільність технології
Екологічний блок	<i>По-перше</i> , вони сприяють видаленню з води біогенних елементів, що виступають каталізаторами евтрофікації водойм, тим самим зменшуючи ризик заростання та деградації водних екосистем. <i>По-друге</i> , фотосинтез мікрободоростей збагачує водне середовище киснем, прискорює окиснювальні процеси та мінералізацію органічних домішок, що підвищує загальну ефективність очищення стічних вод. <i>По-третьє</i> , застосування мікрободоростей покращує бактеріологічні показники якості води, а також забезпечує додаткове виробництво кисню, що може позитивно впливати на стан акваторії та сприяти підтриманню екологічного балансу
Економічний блок	<i>По-перше</i> , технологія не потребує використання високовартісних хімічних реагентів, що робить її економічно вигідною та більш безпечною для навколишнього середовища. <i>По-друге</i> , немає потреби в додатковому обробленні та регенерації активного мулу, що зазвичай є джерелом додаткових витрат у традиційних системах очищення. <i>По-третьє</i> , отримана біомаса мікрободоростей може використовуватися для виробництва азотовмісних та фосфоровмісних біодобрив, що сприяє поверненню цінних біогенних елементів, зокрема фосфору, у природний кругообіг і підвищує сталий екологічний баланс системи

яка може бути використана для виробництва біопалива, кормових добавок, а також у косметичній і фармацевтичній галузях. Крім того, *Euglena gracilis* характеризується здатністю до біоаккумуляції токсичних сполук, що забезпечує зниження їх концентрації у водному середовищі та покращення якості очищених вод. Додатковою перевагою є її екологічна пластичність, яка дає можливість культивувати мікроводорість у різних умовах, зокрема за підвищеного вмісту солей і забруднювальних речовин, що розширює можливості її практичного застосування. Крім того, культура здатна синтезувати цінні біологічно активні сполуки, як-от хлорофіли та каротиноїди, що підвищує її біотехнологічну цінність. Загалом використання *Euglena gracilis* у технологіях очищення стічних вод є екологічно безпечним підходом, оскільки не потребує застосування токсичних хімічних реагентів і не спричиняє додаткового негативного впливу на навколишнє середовище.

Література

- Shamanskyi S.I., Boichenko S.V. Environment-Friendly Technology of Airport's Sewerage. *Advances in Sustainable Aviation* / ed. by T.H. Karakoç, C.O. Colpan, Y. Şöhret. Springer International Publishing AG, 2017. P. 161–175. URL: <https://www.springer.com/la/book/9783319671338>.
- Shamanskyi S., Boichenko S., Pavliukh L. Estimated Efficiency of Biogenic Elements Removal from Waste Water in the Ideal Displacement Photobioreactor. *Systems, Decision and Control in Energy II* / ed. by A. Zaporozhets, V. Artemchuk. Cham : Springer, 2021. Vol. 346. P. 347–361. (Studies in Systems, Decision and Control). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_21.
- Evaluation of the potential of commercial use of microalgae in the world and in Ukraine / L. Pavliukh et al. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2020. Vol. ahead-of-print. DOI: <https://doi.org/10.1108/AEAT-08-2020-0181>.
- Shamanskyi S.I., Boichenko S.V. Innovative Environmentally Friendly Technologies in Sewerage : monograph. Kyiv : Publishing House "Center for Educational Literature", 2018. 320 p.
- Shamanskyi S.I., Boichenko S.V., Pavliukh L.I. Estimating of microalgae cultivation productivity for biofuel production in Ukraine conditions. *Proceedings of the National Aviation University*. 2018. Vol. 3. P. 67–77. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.76.13161>.
- Shamanskyi S.I. Evaluation of energy and economic efficiency of microalgae cultivation for biofuel production in Ukraine. *Ecological safety*. 2018. Vol. 1, no. 25. P. 52–60.
- Applicability of *Euglena gracilis* for biorefineries demonstrated by the production of α -tocopherol and paramylon followed by anaerobic digestion / P. Grimm et al. *J. Biotechnol.* 2015. Vol. 215. P. 72–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.04.004>.
- Comparative assessment of the *Euglena gracilis* var. *saccharophila* variant strain as a producer of the β -1,3-glucan paramylon under varying light conditions / A. Sun et al. *J. Phycol.* 2018. Vol. 54 (4). P. 529–538. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpy.12758>.
- Harada R., Nomura T., Yamada K., Mochida K., Suzuki K. Genetic Engineering Strategies for *Euglena gracilis* and Its Industrial Contribution to Sustainable Development Goals: A Review. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2020. Vol. 8. P. 790. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00790>.
- Function of paramylon from *Euglena gracilis* as filler / K. Suzuki et al. *J. Soc. Powder Technol. Jpn.* 2013. Vol. 50. P. 728–732. DOI: <https://doi.org/10.4164/sptj.50.728>.
- Korn E.D. The fatty acids of *Euglena gracilis*. *J. Lipid Res.* 1964. Vol. 5. P. 352–362.
- Abdel-Raouf N., Al-Homaidan A.A., Ibraheem I.B.M. Microalgae and wastewater treatment. *Saudi journal of biological sciences*. 2012. Vol. 19, iss. 3. P. 257–275. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>.
- Tahedl H., Häder D.P. Automated biomonitoring using real time movement analysis of *Euglena gracilis*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2001. Vol. 48 (2). P. 161–169. DOI: <https://doi.org/10.1006/eesa.2000.2004>.
- Pavliukh L., Shamanskyi S. A Photobioreactor for Microalgae-Based Wastewater Treatment. *Proceedings of the National Aviation University*. 2021. Vol. 87 (2). P. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-1472.87.15721>.
- Evaluation of electrocoagulation–flocculation for harvesting marine and freshwater microalgae / D. Vandamme et al. *Biotechnology and Bioengineering*. 2011. Vol. 108, no. 10. P. 2320–2329. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.23199>.
- Reijnders L. Fuels for the future. *Journal of Integrative Environmental Sciences*. 2008. Vol. 6, no. 4. P. 279–294. DOI: <https://doi.org/10.1080/19438150903068596>.
- Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production / I. Rawat et al. *Applied Energy*. 2011. Vol. 88 (10). P. 3411–3424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>.
- Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing. A review / S.A. Razzak et al. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 27. P. 622–653. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.063>.
- Mahapatra D.M., Chanakya H.N., Ramachandra T.V. *Euglena* sp. as a suitable source of lipids for potential use as biofuel and sustainable wastewater treatment. *Journal of Applied Phycology*. 2013. Vol. 25. P. 855–865. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10811-013-9979-5>.
- Eladel H., Esakkimuthu S., Abomohra A. Dual role of microalgae in wastewater treatment and biodiesel production. *Application of microalgae in wastewater treatment* / ed. by S.K. Gupta, F. Bux. Cham : Springer, 2019. P. 85–121.

References

- Shamanskyi, S.I. and Boichenko, S.V. (2017), "Environment-Friendly Technology of Airport's Sewerage", *Advances in Sustainable Aviation*, Springer International Publishing AG, pp. 161–175.
- Shamanskyi, S., Boichenko, S. and Pavliukh, L. (2021), "Estimated Efficiency of Biogenic Elements Removal from Waste Water in the Ideal Displacement Photobioreactor", *Systems, Decision and Control in Energy II*, Springer, Cham, 346: 347–361.
- Pavliukh, L., Shamanskyi, S., Boichenko, S. and Jaworski, A. (2020), "Evaluation of the potential of commercial use of microalgae in the world and in Ukraine", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. ahead-of-print. doi.org/10.1108/AEAT-08-2020-0181.
- Shamanskyi, S.I. and Boichenko, S.V. (2018), *Innovative Environmentally Friendly Technologies in Sewerage*, Monograph, Center for Educational Literature, Kyiv, UA, 320 p.
- Shamanskyi, S.I., Boichenko, S.V. and Pavliukh, L.I. (2018), "Estimating of microalgae cultivation productivity for biofuel production in Ukraine conditions", *Proceedings of the National Aviation University*, 3: 67–77. doi.org/10.18372/2306-1472.76.13161.
- Shamanskyi, S.I. (2018), "Evaluation of energy and economic efficiency of microalgae cultivation for biofuel production in Ukraine", *Ecological safety*, 1(25): 52–60.
- Grimm, P., Risse, J.M., Cholewa, D., Müller, J.M., Beshay, U., Friehs, K., and Flaschel, E. (2015), "Applicability of *Euglena gracilis* for biorefineries demonstrated by the production of α -tocopherol and paramylon followed by anaerobic digestion", *J. Biotechnol.*, 215: 72–79. doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.04.004.
- Sun, A., Hasan, M.T., Hobba, G., Nevalainen, H. and Te'o, J. (2018), "Comparative assessment of the *Euglena gracilis*

var. *saccharophila* variant strain as a producer of the β -1,3-glucan paramylon under varying light conditions”, *J. Phycol.*, 54(4): 529–538. doi.org/10.1111/jpy.12758.

9. Harada, R., Nomura, T., Yamada, K., Mochida, K. and Suzuki, K. (2020), “Genetic Engineering Strategies for *Euglena gracilis* and Its Industrial Contribution to Sustainable Development Goals: A Review”, *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 8: 790. doi.org/10.3389/fbioe.2020.00790.

10. Suzuki, K., Nakano, R., Yamaguchi, H., Maruta, A. and Nakano, Y. (2013), “Function of paramylon from *Euglena gracilis* as filler”, *J. Soc. Powder Technol. Jpn.*, 50: 728–732. doi.org/10.4164/sptj.50.728.

11. Korn, E.D. (1964), “The fatty acids of *Euglena gracilis*”, *J. Lipid Res.*, 5: 352–362.

12. Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A.A. and Ibraheem, I.B.M. (2012), “Microalgae and wastewater treatment”, *Saudi journal of biological sciences*, 19(3): 257–275. doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005.

13. Tahedl, H. and Häder, D.P. (2001), “Automated biomonitoring using real time movement analysis of *Euglena gracilis*”, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 48(2): 161–169. doi.org/10.1006/eesa.2000.2004.

14. Pavliukh, L. and Shamanskyi, S. (2021), “A Photobioreactor for Microalgae-Based Wastewater Treatment”, *Proceedings of the National Aviation University*, 87(2): 57–64. doi.org/10.18372/2306-1472.87.15721.

15. Vandamme, D., Pontes, S.C., Goiris, K., Foubert, I., Pinoy, L.J. and Muylaert, K. (2011), “Evaluation of electrocoagulation–flocculation for harvesting marine and freshwater microalgae”, *Biotechnology and Bioengineering*, 108(10): 2320–2329. doi.org/10.1002/bit.23199.

16. Reijnders, L. (2008), “Fuels for the future”, *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 6(4): 279–294. doi.org/10.1080/19438150903068596.

17. Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T. and Bux, F. (2011), “Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production”, *Applied Energy*, 88(10): 3411–3424. doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025.

18. Razzak, S.A., Hossain, M.M., Lucky, R.A., Bassi, A.S. and de Lasa, H. (2013), “Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing. A review”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 27: 622–653. doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.063.

19. Mahapatra, D.M., Chanakya, H.N. and Ramachandra, T.V. (2013), “*Euglena* sp. as a suitable source of lipids for potential use as biofuel and sustainable wastewater treatment”, *Journal of Applied Phycology*, 25: 855–865. doi.org/10.1007/s10811-013-9979-5.

20. Eladel, H., Esakkimuthu, S. and Abomohra, A. (2019), “Dual role of microalgae in wastewater treatment and biodiesel production”, *Application of microalgae in wastewater treatment*, Springer, Cham, pp. 85–121.

MICROALGAE AS A PROMISING PLATFORM FOR SUSTAINABLE WASTEWATER TREATMENT

L.I. Pavliukh

Pavliukh L.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Environmental Sciences, Chemistry and Chemical Technology, State University “Kyiv Aviation Institute”, ORCID: 0000-0002-7715-4601, lesia.pavliukh@npp.kai.edu.ua

*This article investigates the effectiveness of using microalgae in the processes of secondary wastewater treatment to remove biogenic elements. It analyses current issues in the operation of traditional wastewater treatment systems, in particular their insufficient efficiency in removing nitrogen and phosphorus compounds against a backdrop of increasing anthropogenic pressure and military operations in Ukraine. Experimental studies were conducted using the *Euglena gracilis* Klebs HPDP-114 strain, cultured in artificially mixed wastewater with varying concentrations of phosphates and ammonium nitrogen. High efficiency in phosphate removal (up to 94.5%) and moderate efficiency in ammonium nitrogen removal (up to 63.33%) were established over a 4-day cultivation period. The main limitations of phytoremediation technologies were identified, in particular the difficulty of separating biomass and the sensitivity of microalgae to changes in temperature conditions. At the same time, the environmental, economic and energy benefits of phytoremediation approaches have been substantiated, in particular the possibility of producing biofuels and biofertilisers, reducing energy consumption and returning biogenic elements to the natural cycle. The results of the study confirm the feasibility of using microalgae as an effective and environmentally safe tool for sustainable wastewater treatment and for reducing the negative impact on aquatic ecosystems.*

Key words: microalgae, wastewater, purification, biogenic compounds, environmental safety, sustainable development.

Дата першого надходження статті до видання: 26.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026