

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ДРЕНАЖНИХ ВОД З ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНИХ ВОДНО-БОЛОТНИХ УГІДЬ

¹Вінницький національний технічний університет

²Уманський державний педагогічний університету ім. Павла Тичини

У роботі вдосконалено метод підвищення ефективності очищення сільськогосподарських дренажних вод від продуктів агрохімії з використання штучних водно-болотних угідь та плаваючих вищих водних рослин. Метод очищення стічних вод та контролю параметрів забруднення включає використання штучних водно-болотних угідь, в яких очищується стічна вода в аеробних умовах мікроорганізмами на кореневій системі вищих водних рослин, формування мультиспектральних зображень вищих водних рослин, аналіз мультиспектральних зображень, опосередковане вимірювання співвідношення між каротиноїдами і загальним хлорофілом у вищих водних рослинах з використанням регресійних рівнянь. При цьому, у процесі експлуатації штучного водно-болотного угіддя шар плаваючих вищих водних рослин періодично замінюють на нові рослини, вилучену забруднену біомасу вищих водних рослин підсушують, брикетують та використовують у вигляді палива.

Ключові слова: стічні води, ефективність очищення, штучні водно-болотні угіддя, екологічний моніторинг, мультиспектральні зображення.

Вступ

Сільське господарство є одним з найбільших споживачів водних ресурсів та створює найбільші об'єми скидів забруднених дренажних вод. Надходження неочищених сільськогосподарських дренажних вод у водні об'єкти спричиняє їх евтрофікацію, цвітіння фітопланктону та зростання загроз для здоров'я населення. При подальшому використанні вод з таких водних об'єктів для забезпечення питною водою населення потрібно витратити значно більше коштів та засобів для очищення води відповідно до норм для питного водопостачання. Потреба сільського господарства у водних ресурсах з кожним роком зростає. Розрив між потребами у водних ресурсах та наявними ресурсами може бути подоланий шляхом переробки сільськогосподарських дренажних вод та їх повторного використання. Одним з шляхів очищення сільськогосподарських дренажних вод є використання штучних водно-болотних угідь (constructed wetlands – CW) заповнених вищими водними рослинами. Однак для забезпечення найбільш ефективного очищення дренажних вод необхідно здійснювати моніторинг параметрів CW у режимі реального часу та забезпечити оптимізацію параметрів CW з необхідним критерієм.

Для підвищення ефективності сільського господарства та зменшення впливу на довкілля при використанні продуктів агрохімії, зокрема, пестицидів, мінеральних добрив, стимуляторів та інгібіторів росту рослин, особливо актуальним є вдосконалення методів екологічного моніторингу. При оцінюванні комплексного впливу при використанні продуктів агрохімії у сільському господарстві на довкілля, з використанням синергетичного підходу, необхідно врахувати вплив на біологічні показники об'єктів довкілля. При дослідженні впливу продуктів агрохімії на об'єкти довкілля можуть використовуватись безпілотні літальні апарати з мультиспектральними та гіперспектральними камерами.

Мета роботи – підвищення ефективності очищення сільськогосподарських дренажних вод від продуктів агрохімії з використання CW та плаваючих вищих водних рослин.

Аналіз ефективності штучних водно-болотних угідь для очищення стічних вод

У роботі [1] штучне водно-болотне угіддя використовується для очищення комунальних стічних вод невеликого міста. Відсутність очисних споруд є проблемою для 70-80 % невеликих населених пунктів. Обробка стоків за допомогою CW є перспективною недорогою альтернативою традиційних способів очищення стічних вод, яка може захистити водні об'єкти від забруднення. Очисні споруди складаються з відстійника, за яким слідує камери з очеретом та водяним гіацинтом. Очисні споруди дозволили знизити параметри забруднення води до допустимих значень. Ефективність очищення за допомогою CW змінюється протягом року в залежності від багатьох факторів, що вимагають подальшого вивчення та вимірювання великої кількості параметрів CW у режимі реального часу.

У роботі [2] досліджуються параметри біорізноманіття зоопланктону у дренажних каналах сільських господарств. Екосистема CW має, як правило, декілька вибраних видів макрофітів, а також багато видів зоопланктону, фітопланктону, бактерій тощо. Виявлено досить високі показники біорізноманіття зоопланктону, який у екосистемі є типовим фільтратором фітопланктону та основною їжею для риб. При дотриманні необхідних параметрів якості води очищену воду після CW можна використовувати для рибних ставків, при цьому риби є біоіндикатором якості очищення води.

У роботі [3] розглядали Тарімський басейн в Китаї у якому здійснюється інтенсивне сільське господарство, що вимагає значних об'ємів водних ресурсів. 76% води у регіоні використовується для сільськогосподарського зрошення, що призводить до висихання води у нижній течії річки та значного погіршення екологічних показників. При очищенні сільськогосподарських дренажних вод за допомогою CW важливим є не лише моніторинг продуктів агрохімії, але й інших хімічних речовин, які вимиваються з ґрунту при поливі.

У роботі [4] досліджували ефективність природних водно-болотних угідь для зменшення сільськогосподарського азотного навантаження у різних формах (нітрити, нітрати, амонійний азот, загальний азот). При цьому для різних форм азоту була оцінена ефективність очищення за допомогою CW. Оскільки процеси вегетації і розпаду у природних водно-болотних угіддях є сезонними, то ефективність очищення буде мати відповідні сезонні зміни.

У роботі [5] досліджувалась ефективність CW для очищення стічних вод густонаселеного поселення для малозабезпечених у Шрі Ланці. При цьому дренажний потік, що протікав через поселення був надзвичайно сильно забруднений каналізаційними стоками, що містили у великій кількості фекальні коліформні бактерії. Видалення кишкової палички у CW досягалось за допомогою багатьох фізичних, хімічних та біологічних процесів. Ефективність CW для очищення стічних вод від фекальних коліформ потребує додаткового вивчення.

У роботі [6, 7] досліджувалась ефективність CW для очищення сільськогосподарських дренажних вод від важких металів, а також накопичення важких металів у надземній та підземній частині рослин, якими заповнено CW. Дослідження показало, що важкі метали затримувались здебільшого кореневою системою. Важливу роль в очищенні сільськогосподарських дренажних вод мали мікроорганізми у кореневій системі.

У роботі [8] здійснювалось дослідження моделі CW з наповненням торф'яним ґрунтом. В модельній установці визначаються оптимальні умови, які забезпечують найвищу ефективність видалення нітратів при оптимальних параметрах температури, окислювально-відновлювального потенціалу та швидкості потоку води. Це показує перспективність оптимізації роботи CW шляхом контролю параметрів системи та оцінювання ефективності очищення води.

У роботі [9] розроблена інтегрована система моделювання для оцінки кількості і якості води водно-болотних угідь у сільському господарстві на основі інструменту геопросторового аналізу ГІС Whitebox із відкритим вихідним кодом і підключенням різних баз даних – геопросторову, гідрокліматичну, карту водно-болотних угідь, параметри та вихідні дані моделі. Результати моделювання для різних сценаріїв збереження та утворення водно-болотних угідь є підставою для прийняття рішень з управління водними ресурсами.

У роботі [10] використовується CW з плаваючими макрофітами (ряска мала) та заповненням губчастим матеріалом з пористої поліуретанової піни, що є носієм біоплівки. Біоплівка має високу бактеріальну різноманітність та високу частку нітрифікуючих і денітрифікуючих бактерій, а тому є важливою складовою CW. Наявність сприятливих умов середовища у коренях вищих водних рослин чи матеріалах наповнювача, необхідна температура, рН та кисневий режим дозволяють підібрати оптимальні умови для ефективного видалення забруднюючих речовин.

У роботі [11] при сильних опадах з полів може змиватись значна частина органічних добрив, що є джерелом забруднення водних об'єктів. При проектуванні CW необхідно врахувати такі аномальні кліматичні фактори, як сильні опади, ще не повинні призвести до руйнації CW та потрапляння забруднюючих речовин та макрофітів з CW у водні об'єкти.

У роботі [12] досліджується ефективність ряски для опріснення та очищення сільськогосподарських дренажних вод. Крім того, досліджено що ставки вкриті ряскою можуть зменшити втрати води через випаровування до 25%.

Відомо комплекс для очищення стічних вод та мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю інтегральних параметрів забруднення з використанням вищих водних рослин, що складається із корпусу біореактора з термоізолюючого матеріалу, заповненого водою і шаром вищих водних рослин, пристроїв штучного освітлення, трубопроводів подачі води на очищення та відводу очищеної води, системи терморегулювання внутрішнього простору і води,

плаваючого термоізолюючого матеріалу, причому у якості пристроїв штучного освітлення використано світлодіодні освітлювачі, крім того введено ПЗЗ-камеру, блок імпульсного керування освітлювачами, мікроконтролерний пристрій, блок керування та обробки мультиспектральних зображень, причому світлодіодні освітлювачі підключені до блоку імпульсного керування освітлювачами, ПЗЗ-камера з'єднана з входом блоку керування та обробки мультиспектральних зображень на базі персонального комп'ютера, який під'єднано через мікроконтролерний пристрій до блоку імпульсного керування освітлювачами та системи терморегулювання внутрішнього простору і води [13]. Недоліком комплексу є відсутність можливості очищувати стічні води у поверховому шарі води, оскільки плаваючий термоізолюючий матеріал буде заважати проходженню забруднюючих речовин у поверхневій плівці до вищих водних рослин.

У роботі [14] використовується СВ для очищення забруднених стічних вод від нафтопродуктів, що включає використання ємності, в якій очищується стічна вода в аеробних умовах мікроорганізмами на волокнистому носіїві, кореневій системі вищих водних рослин (ейхорнії прекрасної), закріплених до несучого елемента із додатковою плавучістю у вигляді плотика з перфорованим дном, розміщеним у ємності, причому плотик виконують у вигляді об'ємної пустотілої конструкції, у формі прямокутного паралелепіпеда, верхні ребра якого розміщують вище рівня води, а нижні - занурюють у товщу води, під водними рослинами, волокнистим носієм, розміщують сітчастий піддон з повільно-розчинними елементами у вигляді глиняних колобоків, які містять поживні речовини для живлення мікроорганізмів, вищих водних рослин, а по периметру стінок ємності, на відстані від плотика, розміщують труби з соплами та клапанами, які з'єднують із джерелом подачі стислого повітря. Поживні речовини для іммобілізованих мікроорганізмів, водних рослин, які входять в основу глини колобоків, складаються у співвідношенні компонентів, мас. %: глина 45-55; наносубстрат біомаси рослин 20-35; активовані ефективні мікроорганізми (ЕМ - А) 0,2-0; вода решта. Крім того, як біологічну масу наносубстрату органічного живлення іммобілізованих мікроорганізмів мікроелементами використовують наступні рослини: столовий буряк (гичка) *Beta vulgaris*, люпин вузьколистий (*Lupinus angustifolius*), кульбабу звичайну (коріння) *Taraxacum officinale*, щирицю звичайну (*Amaranthus retroflexus*), кропиву дводомну (*Urtica dioica*), у співвідношенні 1/1/1/0,5. Недоліком такого СВ є відсутність контролю параметрів забруднення стічних вод, що проходить очищення, а також контролю стану вищих водних рослин, які використовуються для очищення води.

Метод очищення сільськогосподарських дренажних вод та моніторингу параметрів забруднення

В основу дослідження поставлено задачу підвищення ефективності очищення сільськогосподарських дренажних вод з використанням вищих водних рослин та моніторингу параметрів забруднення. Поставлена задача досягається тим, що метод очищення стічних вод та контролю параметрів забруднення, що включає використання ємності, в якій очищується стічна вода в аеробних умовах мікроорганізмами на кореневій системі вищих водних рослин, закріплених до несучого елемента із перфорованим дном, сітчастого піддону з повільно-розчинними елементами у вигляді глиняних колобоків, які містять поживні речовини для живлення мікроорганізмів та вищих водних рослин, доповнено тим, що формують мультиспектральні зображення вищих водних рослин на довжинах хвиль 450, 470, 660 нм, за допомогою широкосмугової ПЗЗ-камери та перемикаємих світлодіодних джерел освітлення, причому на основі отриманих даних за допомогою комп'ютера проводять аналіз мультиспектральних зображень та здійснюють опосередковане вимірювання співвідношення між каротиноїдами і загальним хлорофілом у вищих водних рослинах з використанням регресійного рівняння, яке пов'язує його з результатами мультиспектральних вимірювань, якщо вказане співвідношення між каротиноїдами і загальним хлорофілом у вищих водних рослинах відрізняється більш ніж на 30% у порівнянні з початковим значенням, то шар вищих водних рослин замінюють на нові рослини на стадії вегетативного росту, вилучену забруднену біомасу вищих водних рослин, підсушують, брикетують та використовують у вигляді палива у котлах котелень. На рис. 1. представлена структурну схему штучних водно-болотних угідь для очищення сільськогосподарських дренажних вод та моніторингу параметрів забруднення.

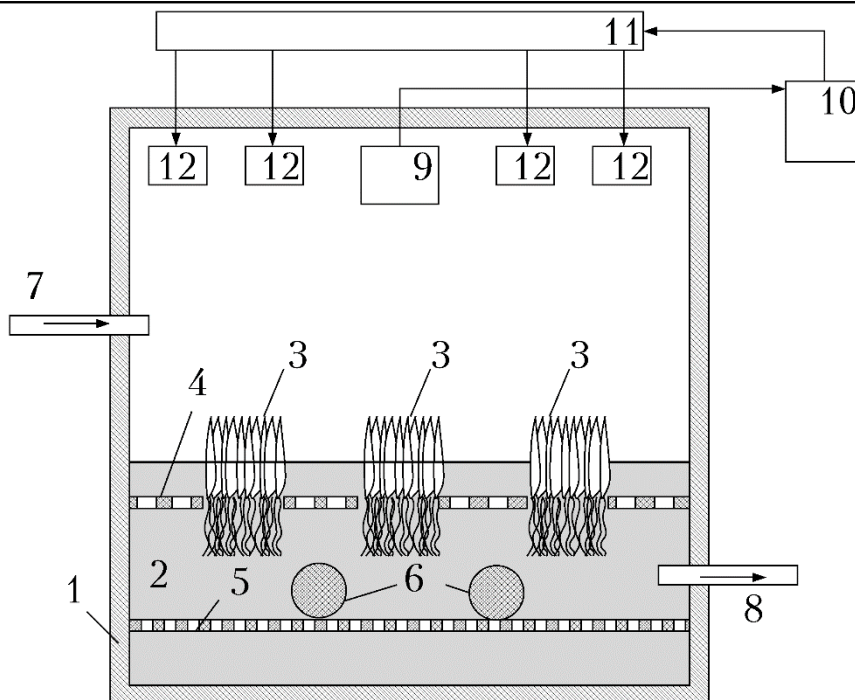


Рисунок 1 – Структурна схема штучних водно-болотних угідь для очищення сільськогосподарських дренажних вод та моніторингу параметрів забруднення

Структурна схема штучних водно-болотних угідь містить ємність 1, заповнену стічними водами 2, шар вищих водних рослин 3 закріплений до несучого елемента з перфорованим дном 4, який знаходиться нижче рівня води, сітчатий піддон 5 з повільно-розчинними елементами у вигляді глиняних колобків 6. До ємності підведено трубопроводи подачі води на очищення 7 та відводу очищеної води 8. У пристрої розміщено ПЗЗ-камеру 9, що з'єднана з входом блоку керування та обробки мультиспектральних зображень на базі персонального комп'ютера 10, який під'єднано через мікроконтролерний пристрій 11 для перемикання світлодіодних джерел освітлення 12.

Очищення сільськогосподарських дренажних вод та моніторинг параметрів забруднення здійснюється таким чином.

1. Ємність 1 заповнюють сільськогосподарськими дренажними водами 2 через трубопровід подачі води на очищення 7, розмішений вище рівня води.

2. Очищення стічних вод з продуктів агрохімії здійснюється за допомогою шару вищих водних рослин 3, закріплений до несучого елемента з перфорованим дном 4, який знаходиться нижче рівня води. Живлення шару вищих водних рослин 3 та мікроорганізмів у їх кореневій системі здійснюється поживними речовинами, що містяться у повільно-розчинних елементах у вигляді глиняних колобків 6, розміщених на сітчатому піддоні 5 під кореневою системою шару вищих водних рослин 3.

3. Очищена вода відводиться трубопроводом 7, розміщеним нижче рівня води.

4. Формують мультиспектральні зображення вищих водних рослин на довжинах хвиль 450, 470, 660 нм, за допомогою ПЗЗ-камери 9, блоку керування та обробки мультиспектральних зображень на базі персонального комп'ютера 10, який під'єднано через мікроконтролерний пристрій 11 для перемикання світлодіодних джерел освітлення 12.

5. Аналізують отримані мультиспектральні зображення за допомогою персонального комп'ютера 10, що дозволяє опосередковано виміряти співвідношення між каротиноїдами і загальним хлорофілом у вищих водних рослинах з використанням регресійного рівняння.

6. У випадку, якщо співвідношення між каротиноїдами і загальним хлорофілом у вищих водних рослинах відрізняється більш ніж на 30% у порівнянні з початковим значенням шар вищих водних рослин замінюється на нові рослини на стадії вегетативного росту.

7. Вилучена біомаса вищих водних рослин, що забруднена продуктами агрохімії, підсушується, брикетується та використовується у вигляді палива у котлах котельень. Очищена вода виводиться через трубопровід 8, розмішений нижче рівня води.

Для розв'язання оберненої оптичної задачі визначення біофізичних параметрів вищих водних рослин необхідно скласти регресійне рівняння [15]. При використанні множинної регресії, десяти мультиспектральних параметрів та поліномів третього порядку регресійне рівняння матиме такий вид [16]:

$$f_x = a_0 + b_{1,1}M_1 + \dots + b_{1,10}M_{10} + b_{2,1}M_1^2 + \dots + b_{2,10}M_{10}^2 + b_{3,1}M_1^3 + \dots + b_{3,10}M_{10}^3. \quad (1)$$

Для n мультиспектральних параметрів та поліномів k -того порядку регресійне рівняння матиме такий вид:

$$f_x = a_0 + \sum_{i=1}^n (b_{1,i}M_i + b_{2,i}M_i^2 + b_{3,i}M_i^3 + \dots + b_{k,i}M_i^k). \quad (2)$$

У роботі [17] отримано системи регресійних рівнянь, що дозволяють визначити параметри вищих водних рослин у водно-болотних угіддях. З урахуванням конструкції штучних водно-болотних угідь, особливостей освітлення та біофізичних характеристик використаних вищих водних рослин коефіцієнти отриманих регресійних рівнянь будуть коригуватись з відповідно до вимірювань пігментних параметрів їх зразків традиційними спектрофотометричними методами. В подальшому отримані параметри вищих водних рослин використовуються для сегментації мультиспектральних зображень поверхні водно-болотних угідь [18]. Для підтримки прийняття відповідних управлінських рішень по віддаленому контролю очисних споруд на основі штучних водно-болотних угідь доцільно використати систему штучного інтелекту на основі нейромережі чи нечіткої логіки з використанням технології Інтернету речей (IoT).

Висновки

Проблема забруднення водних об'єктів шляхом надходження неочищених сільськогосподарських дренажних вод є особливо актуальною для України. Це спричиняє евтрофікацію водних об'єктів та зростання загроз для забезпечення населення якісною питною водою. У роботі проведено огляд сучасних підходів, щодо використання штучних водно-болотних угідь для очищення стічних вод та показано можливість вирішення проблеми з використання комплексу, що включає вищі водні рослини та відповідні мікроорганізми. Далі удосконалено метод підвищення ефективності очищення сільськогосподарських дренажних вод від продуктів агрохімії з використанням штучних водно-болотних угідь та плаваючих вищих водних рослин. При цьому стічна вода очищується в аеробних умовах мікроорганізмами на кореневій системі вищих водних рослин. Контроль параметрів штучного водно-болотного угіддя здійснюється за допомогою мультиспектральних камер та визначення біофізичних параметрів вищих водних рослин з використанням регресійних рівнянь [19]. В подальшому контролю очисних споруд на основі штучних водно-болотних угідь здійснюється з використанням технології Інтернету речей (IoT). Досвід експлуатації штучних водно-болотних угідь для очищення сільськогосподарських дренажних вод від продуктів агрохімії показує, що такі комплекси знаходяться на значній відстані один від одного, а тому, використовуючи технологію Інтернету речей з'являється можливість контролювати велику кількість таких очисних споруд розміщених у різних частинах країни.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Rashed A. Treatment of municipal pollution through re-engineered drains: A case study, Edfina Drain, West Nile Delta. In Proceedings of the 11th ICID, International Drainage Workshop (IDW), Cairo, Egypt, 22–24 September 2012. 2012. Vol. 11. P. 1–9.
2. Illyová M., Čejka T. Crustacean Zooplankton Biodiversity in Agricultural Drainage Ditches in Danubian Lowland, Slovakia. *Acta zool. bulg.* 2018. V. 70 (3). P. 397–405.
3. Han S., Hu Q., Yang Y. et al. Characteristics and Driving Factors of Drainage Water in Irrigation Districts in Arid Areas. *Water Resour. Manage.* 2015. V. 29. P. 5323–5337.
4. Uuema E., Palliser C.C., Hughes A.O., Tanner C.C. Effectiveness of a Natural Headwater Wetland for Reducing Agricultural Nitrogen Loads. *Water.* 2018. V. 10. P. 287.
5. Weerakoon G.M.P.R., Jinadasa K.B.S.N., Herath G.B.B. et al. Applicability of Constructed Wetlands for Water Quality Improvement in a Tea Estate Catchment: The Pussellawa Case Study. *Water.* 2018. V. 10. P. 332.
6. Lavrić S., Braschi I., Anconelli S. et al. Long-Term Monitoring of a Surface Flow Constructed Wetland Treating Agricultural Drainage Water in Northern Italy. *Water.* 2018. V. 10. P. 644.
7. Zou Y., Zhang L., Wang L. et al. Effects of Aeration, Vegetation, and Iron Input on Total P Removal in a Lacustrine Wetland Receiving Agricultural Drainage. *Water.* 2018. V. 10. P. 61.
8. Kleimeier C., Liu H., Rezanezhad F., Lennartz B. Nitrate Attenuation in Degraded Peat Soil-Based Constructed Wetlands. *Water.* 2018. V. 10. P. 355.
9. Liu Y., Yang W., Shao H. et al. Development of an Integrated Modelling System for Evaluating Water Quantity and Quality Effects of Individual Wetlands in an Agricultural Watershed. *Water.* 2018. V. 10. P. 774.
10. Bassuney D., Tawfik A. Baffled duckweed pond system for treatment of agricultural drainage water containing pharmaceuticals. *International journal of phytoremediation.* 2017. V. 19, No. 8. P. 782–788

11. Oliver D. M., Clegg C. D., Haygarth P. M., Heathwaite A. L. Determining hydrological pathways for the transfer of potential pathogens from grassland soils to surface waters. Diffuse Pollution Conference Dublin. 2003. P. 36-41.
12. Balla D., Omar M., Maassen S. et al. Efficiency of Duckweed (Lemnaceae) for the Desalination and Treatment of Agricultural Drainage Water in Detention Reservoirs. In: Novel Measurement and Assessment Tools for Monitoring and Management of Land and Water Resources in Agricultural Landscapes of Central Asia. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. 2014. P. 423-440.
13. Кватернюк С. М., Петрук В. Г., Кватернюк О. Є. Комплекс для очищення стічних вод та мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю інтегральних параметрів забруднення з використанням вищих водних рослин: пат. 124230 Україна. № 201711020; заявл. 10.11.2017; опубл. 26.03.2018, Бюл. № 6. 5 с.
14. Домбровський К.О., Гвоздяк П.І. Спосіб біологічного очищення забруднених стічних вод від нафтопродуктів: пат. 109098 Україна. № 201601623; заявл. 22.02.2016; опубл. 10.08.2016, Бюл. № 15. 9 с..
15. Кватернюк О. Є., Кватернюк С. М., Петрук В. Г. та ін. Математичне моделювання зміни координат кольору поверхневих пошкоджень біотканин для цифрової колориметрії. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2016. № 3. С. 135-139.
16. Кватернюк С. М. Метод та засоби мультиспектрального телевізійного вимірювального контролю стану неоднорідних біологічних середовищ. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017. № 1. С. 15-22.
17. Kvaterniuk S., Petruk V., Kochan O., Frolov V. Multispectral ecological control of parameters of water environments using quadcopter. Sustainable Production: Novel Trends in Energy, Environment and Material Systems. Studies in Systems, Decision and Control : monograph / editors: G. Królczyk, M. Wzorek., A. Król, O. Kochan, J. Su, J. Kacprzyk. Cham : Springer, 2019. Vol. 198. P. 75-89.
18. Kvaterniuk S.M., Petruk V.G., Frolov V.F. et al. Restoration Of The Southern Bug River Ecosystem By Removing The Biomass Of Higher Water Plants. International Journal of Conservation Science. 2021. Vol. 12. Special Issue 1. P. 755-764.
19. Кватернюк С. М., Петрук В.Г., Кватернюк О.Є., Іщенко В.А., Цимбалюк Л.О. Спосіб очищення стічних вод від нафтопродуктів та контролю параметрів забруднення: пат. 147235 Україна. № u202007794; заявл. 07.12.2020; опубл. 22.04.2021, Бюл. № 16. 5 с.

REFERENCES

1. Rashed A. Ochyshchennya munitsypal'noho zabrudnennya cherez modernizovanu drenazhnu systemu: praktychne doslidzhennya, dreyn Edfina, del'ta Zakhidnoho Nilu. U materialakh 11-ho ICID, Mizhnarodnoho drenazhnoho seminaru (IDW), Kayir, Yehypet, 22-24 veresnya 2012 r. 2012. Tom. 11. S. 1-9.
2. Illová M., Čejka T. Bioriznomanityta zooplanktonu rakopodibnykh u sil's'kohospodars'kykh drenaznykh kanavakh u Prydnays'kiy nyzovyni, Slovachchyna. Akta zool. bolh. 2018. T. 70 (3). S. 397-405.
3. Han S., Hu Q., Yang Y. ta in. Kharakterystyky ta rushyni faktory drenazhnoyi vody v rayonakh zroshennya v posushlyvykh rayonakh. Upravlinnya vodnymy resursamy. 2015. T. 29. S. 5323-5337.
4. Uuemaa E., Palliser C.C., Hughes A.O., Tanner C.C. Efektyvnist' pryrodnykh vodno-bolotnykh uhid' u verkhniy chastyni vody dlya zmenshennya sil's'kohospodars'koho azotnoho navantazhennya. voda 2018. T. 10. S. 287.
5. Weerakoon G.M.P.R., Jinadasa K.B.S.N., Herat G.B.B. ta in. Zastosuvannya pobudovanykh vodno-bolotnykh uhid' dlya pokrashchennya yakosti vody u vodozbori chaynoho mayetku: pryklad Pusselavy. voda 2018. T. 10. S. 332.
6. Lavrníc S., Braschi I., Anconelli S. et al. Dovhostrokovyy monitorynh vodno-bolotnykh uhid', stvorenykh poverkhnevym potokom, yaki ochyshchayut' sil's'kohospodars'ki drenazhni vody v Pivnichniy Italiyi. voda 2018. T. 10. S. 644.
7. Zou Y., Zhang L., Wang L. ta in. Vplyv aeratsiyi, roslynnosti ta nadkhodzhennya zaliza na zahal'ne vydalennya fosforu v ozernykh vodno-bolotnykh uhidnyakh, shcho otrymuyut' sil's'kohospodars'ky drenazh. voda 2018. T. 10. S. 61.
8. Kleimeier C., Liu H., Rezanezhad F., Lennartz B. Attenuatsiya nitrativ u dehradovanykh torf'yanykh gruntakh, stvorenykh vodno-bolotnykh uhidnyakh. voda 2018. T. 10. S. 355.
9. Lyu YU., Yan V., Shao KH. ta in. Rozrobka intehrovanoyi systemy modelyuvannya dlya otsinky kil'kosti ta yakosti vody okremykh vodno-bolotnykh uhid' u sil's'kohospodars'komu vododili. voda 2018. T. 10. S. 774.
10. Bassuney D., Tawfik A. Baffled systema stavkiv dlya ryasky dlya ochyshchennya sil's'kohospodars'koyi drenazhnoyi vody, shcho mistyt' farmatsevtichni preparaty. Mizhnarodnyy zhurnal fitoremediatsiyi. 2017. T. 19, № 8. S. 782-788
11. Oliver D. M., Klehh K. D., Kheyhart P. M., Khitveyt A. L. Vyznachennya hidrolohichnykh shlyakhiv perenesennya potentsiynykh patohenov iz luhovykh gruntiv u poverkhnevi vody. Konferentsiya z dyfuznoho zabrudnennya v Dublini. 2003. S. 36-41.
12. Balla D., Omar M., Maassen S. ta in. Efektyvnist' ryasky (Lemnaceae) dlya oprisnennya ta ochyshchennya sil's'kohospodars'kykh drenaznykh vod u vodoskhovyshchakh. V: Novi instrumenty vymiryuvannya ta otsinky dlya monitorynhu ta upravlinnya zemel'nyimi ta vodnymi resursamy v sil's'kohospodars'kykh landshaftakh Tsentral'noyi Aziyi. Ekolohichna nauka ta inzheneriya. Sprinher, Cham. 2014. S. 423-440.
13. Kvaternyuk S. M., Petruk V. H., Kvaternyuk O. YE. Kompleks dlya ochyshchennya stichnykh vod ta mul'tyspektral'noho televiziynoho vymiryuval'noho kontrolyu intehral'nykh parametriv zabrudnennya z vykorystanniam vyshchykh vodnykh roslin: pat. 124230 Ukrayina. № 201711020; zayavl. 10.11.2017; opubl. 26.03.2018, Byul. № 6. 5 s.
14. Dombrovs'kyu K.O., Hvozdyak P.I. Sposib biolohichnoho ochyshchennya zabrudnennykh stichnykh vod vid naftoproduktiv: pat. 109098 Ukrayina. № 201601623; zayavl. 22.02.2016; opubl. 10.08.2016, Byul. № 15. 9 s..
15. Kvaternyuk O. YE., Kvaternyuk S. M., Petruk V. H. ta in. Matematychno modelyuvannya zmin koordynat kol'oru poverkhnevyykh poshkodzen' biotkanyn dlya tsyfrovoyi kolorymetriyi. Vymiryuval'na ta obchyslyuval'na tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. 2016. № 3. S. 135-139.
16. Kvaternyuk S. M. Metod ta zasoby mul'tyspektral'noho televiziynoho vymiryuval'noho kontrolyu stanu neodnorodnykh biolohichnykh seredovysch. Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. 2017. № 1. S. 15-22.
17. Kvaternyuk S., Petruk V., Kochan O., Frolov V. Mul'tyspektral'nyy ekolohichnyy kontrol' parametriv vodnykh seredovysch za dopomohoyu kvadroptera. Stale vyrobnytstvo: novi tendentsiyi v enerhetytsi, navkolyshn'omu seredovyschchi ta material'nykh systemakh. Studies in Systems, Decision and Control : monohrafiya / redaktory: G. Królczyk, M. Wzorek., A. Król, O. Kochan, J. Su, J. Kacprzyk. Cham : Springer, 2019. Vyp. 198. S. 75-89.

18. Kvaternyuk S.M., Petruk V.H., Frolov V.F. ta in. Vidnovlennya ekosystemy richky Pivdennyi Buh shlyakhom vyluchennya biomasy vyshchyykh vodnykh roslyn. Mizhnarodnyy zhurnal pryrodokhoronnoyi nauky. 2021. Vyp. 12. Spetsvypusk 1. S. 755-764.
19. Kvaternyuk S. M., Petruk V.H., Kvaternyuk O.YE., Ishchenko V.A., Tsymbalyuk L.O. Sposib ochyshchennya stichnykh vod vid naftoproduktiv ta kontrol' parametriv zabrudnennya: pat. 147235 Ukrayina. № u202007794; zayavl. 07.12.2020; opubl. 22.04.2021, Вул. № 16. 5 s.

Кватернюк Сергій Михайлович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: kvaternuk@vntu.edu.ua.

Мандебура Святослав Васильович – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля Вінницького національного технічного університету, викладач кафедри хімії, екології та методики їх навчання Уманського державного педагогічного університету ім. Павла Тичини, e-mail: eko14b.mandebura@gmail.com.

Латуша Дмитро Русланович – аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: dima.latusha27@gmail.com.

S. M. Kvaterniuk¹
S. V. Mandebura^{1,2}
D. R. Latusha¹

IMPROVING THE EFFICIENCY OF AGRICULTURAL DRAINAGE WATER TREATMENT USING CONSTRUCTED WETLANDS

¹Vinnitsia National Technical University

²Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University

The paper has improved the method of increasing the efficiency of cleaning agricultural drainage water from agrochemical products using artificial wetlands and floating higher aquatic plants. The method of wastewater treatment and control of pollution parameters includes the use of artificial wetlands in which wastewater is treated under aerobic conditions by microorganisms on the root system of higher aquatic plants, the formation of multispectral images of higher aquatic plants, analysis of multispectral images, indirect measurement of the ratio between carotenoids and chlorophyll in higher aquatic plants using regression equations. At the same time, during the operation of an artificial wetland, a layer of floating higher aquatic plants is periodically replaced with new plants, the withdrawn contaminated biomass of higher aquatic plants is dried, briquetted and used as fuel.

Keywords: wastewater, treatment efficiency, constructed wetlands, environmental monitoring, multispectral imaging.

Kvaterniuk Serhii Mykhailovych – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: kvaternuk@vntu.edu.ua. ORCID: 0000-0003-1296-8249

Mandebura Sviatoslav Vasylovych – Post-Graduate Student of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies of Vinnitsia National Technical University, Teacher of the Department of Chemistry, Ecology and Methods of their teaching of Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, e-mail: eko14b.mandebura@gmail.com.

Latusha Dmytro Ruslanovych – Post-Graduate Student of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: dima.latusha27@gmail.com.