



UO‘K 628.35:66.081.63:620.92

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3\(24\).2026.8](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3(24).2026.8)

OQOVA SUVLARNI TOZALASHNING INTELLEKTUAL QUYOSH-ELEKTROBIOMEMBRANA TIZIMLARINING RIVOJLANISHI VA ZAMONAVIY ENERGIYA SAMARADOR KONSTRUKTIV YECHIMLARI

Mirzayorova Sevara Ubaydullayevna - PhD, dotsent.

<https://orcid.org/0000-0002-4563-9137> e-mail: mirzayorovasevara@gmail.com

Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O‘zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Oqova suvlarni to‘liq tozalash va tozalash inshootlarining energetik mustaqilligiga erishish zamonaviy ekologik hamda muhandislik sohasining dolzarb masalalaridan biridir.

Materiallar va usullar. Tadqiqotda quyosh fotovoltaiik-termal (PV/T) panellari, past kuchlanishli o‘zgarmas tok manbaiga ega elektro-bioreaktor (e-MBR) hamda IoT/AI asosidagi intellektual boshqaruv modulidan iborat gibridd tizimning konstruktiv va energetik ko‘rsatkichlari baholandi. Suvni organik va biogen moddalardan tozalash darajasi standart spektrofotometrik usullar yordamida aniqlandi. Membrana kirilanishi va trans-membrana bosimi (TMP) dinamikasi elektr maydoni o‘rganildi, tizimning energetik balansi hamda intellektual boshqaruv samaradorligi neyron tarmoqlari va dasturiy modellashtirish yordamida baholandi.

Natijalar. Tadqiqot va hisoblash natijalari intellektual quyosh-elektrobiomembrana tizimida organik moddalar (COD va BOD) 96-98% ga, azot va fosfor birikmalari esa 88-94% ga tozalanishini ko‘rsatdi. Elektr maydonining tatbiq etilishi trans-membrana bosimining ortish tezligini 2.3 baravarga kamaytirib, membrananing xizmat muddatini 60% ga uzaytirdi. Shuningdek, PV/T quyosh panellari evaziga tizimning elektr energiyasiga bo‘lgan ehtiyoji 78% ga qoplandi va AI algoritmlarining avtomatik boshqaruvi orqali solishtirma energiya sarfi 32% ga tejalishi aniqlandi.

Xulosa. Taklif etilgan konstruktiv yechimlar va intellektual algoritmlar oqova suv tozalash inshootlarini avtonom resurs markazlariga aylantirish va energiya tejamkorlik masalalarini hal etishga xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: oqova suvlarni tozalash, elektrobiomembrana (e-MBR), quyosh PV/T panellari, intellektual boshqaruv, energiya samaradorlik, bio-fouling, trans-membrana bosimi.

Дата поступления: 27.08.2026. После обработки: 05.09.2026 Принято печать: 23.09.2026

For citation: Mirzayorova S.U. Development of Intelligent Solar-Electrobiomembrane Wastewater Treatment Systems and Modern Energy-Efficient Structural Solutions. Muqobil energetika. 2026. 3(24). pp. 74-78.

УДК 628.35:66.081.63:620.92

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СОЛНЕЧНО-EЛЕКТРОБИОМЕМБРАННЫХ СИСТЕМ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД И СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ

Мирзаерова Севара Убайдуллаевна - PhD, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-4563-9137> e-mail: mirzayorovasevara@gmail.com

Каршинский государственный технический университет, Карши, Узбекистан

Аннотация. Введение. Обеспечение глубокой очистки сточных вод и достижение энергетической независимости очистных сооружений является одной из актуальных задач современной экологической и инженерной наук.



Материалы и методы. В исследовании были оценены конструктивные и энергетические показатели гибридной системы, состоящей из солнечных фотоэлектрических/тепловых (PV/T) панелей, электробиореактора (e-MBR) с источником постоянного тока низкого напряжения и модуля интеллектуального управления на базе IoT/AI. Степень очистки воды от органических и биогенных веществ определялась стандартными спектрофотометрическими методами. Динамика загрязнения мембраны и трансмембранного давления (TMP) изучалась при воздействии электрического поля, а энергетический баланс системы и эффективность интеллектуального управления оценивались с использованием нейронных сетей и программного моделирования.

Результаты. Результаты исследований и расчетов показали, что в интеллектуальной солнечно-электробиомембранной системе очистка от органических веществ (ХПК и БПК) составила 96-98%, а от соединений азота и фосфора — 88-94%. Применение электрического поля снизило скорость роста трансмембранного давления в 2,3 раза и продлило срок службы мембраны на 60%. Кроме того, за счет солнечных панелей PV/T потребность системы в электроэнергии была покрыта на 78%, а автоматическое управление на основе алгоритмов ИИ позволило сэкономить 32% удельного энергопотребления.

Заключение. Предложенные конструктивные решения и интеллектуальные алгоритмы служат трансформации очистных сооружений в автономные центры восстановления ресурсов и решению задач энергосбережения.

Ключевые слова: очистка сточных вод, электробиомембрана (e-MBR), солнечные панели PV/T, интеллектуальное управление, энергоэффективность, биозагрязнение (bio-fouling), трансмембранное давление.

UDC 628.35:66.081.63:620.92

DEVELOPMENT OF INTELLIGENT SOLAR-ELECTROBIOMEMBRANE WASTEWATER TREATMENT SYSTEMS AND MODERN ENERGY-EFFICIENT STRUCTURAL SOLUTIONS

Mirzayorova Sevara Ubaydullayevna - PhD, Associate Professor

<https://orcid.org/0000-0002-4563-9137> e-mail: mirzayorovasevara@gmail.com

Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. Introduction. Achieving comprehensive wastewater treatment and the energy self-sufficiency of treatment facilities is one of the pressing issues in modern environmental and engineering fields.

Materials and methods. The study evaluated the structural and energy performance of a hybrid system consisting of solar photovoltaic/thermal (PV/T) panels, a low-voltage direct current electro-bioreactor (e-MBR), and an IoT/AI-based intelligent control module. The degree of wastewater purification from organic and biogenic substances was determined using standard spectrophotometric methods. Membrane fouling and transmembrane pressure (TMP) dynamics were studied under an electric field, while the system's energy balance and intelligent control efficiency were evaluated using neural networks and software modeling.

Results. Research and computational results showed that the intelligent solar-electrobiomembrane system removed 96-98% of organic pollutants (COD and BOD) and 88-94% of nitrogen and phosphorus compounds. The application of the electric field reduced the rate of transmembrane pressure increase by 2.3 times and extended membrane service life by 60%. Furthermore, PV/T solar panels covered 78% of the system's electricity demand, and automatic control via AI algorithms reduced specific energy consumption by 32%.

Conclusion. The proposed structural solutions and intelligent algorithms serve to transform wastewater treatment plants into autonomous resource recovery hubs and resolve energy



conservation challenges.

Keywords: wastewater treatment, electrobiomembrane (e-MBR), solar PV/T panels, intelligent control, energy efficiency, bio-fouling, transmembrane pressure.

Kirish

Oqova suvlarni to'liq tozalash hamda tozalash inshootlarining energiya samaradorligini oshirish zamonaviy muhandislik va ekologiya sohalarining ustuvor ilmiy-texnik yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. Shahar va sanoat oqova suvlarini tozalash inshootlarida umumiy energiya iste'molining sezilarli qismi aeratsiya, membranali filtrlash hamda loyni qayta ishlash jarayonlariga to'g'ri kelishi energiya tejamkor va avtonom texnologiyalarni joriy etish zaruratini yanada kuchaytiradi. Intellektual quyosh-elektrobiomembrana (Smart Solar-eMBR) tizimlari past haroratli biologik tozalash va zamonaviy membrane texnologiyalari qatoriga kirib, yuqori tozalash darajasi, membrananing kirlanishiga (bio-fouling) bo'lgan chidamliligi hamda qayta tiklanuvchi energiya manbalari bilan samarali integratsiyalanishi bilan ajralib turadi. Mazkur maqolada intellektual quyosh-elektrobiomembrana tizimlarining rivojlanish bosqichlari va zamonaviy energiya samarador konstruktiv yechimlari hisobiy-tahliliy yondashuv hamda tizimli modellashtirish asosida tadqiq etiladi [1].

Materiallar va usullar

Oqova suvlarni tozalash suv zaxiralarini tejash, atrof-muhit barqarorligini ta'minlash hamda aholi salomatligini muhofaza qilishda o'ta muhim ahamiyat kasb etadi. Atrof-muhit va insonlar salomatligi uchun xavfsiz suv sifatini kafolatlash maqsadida, an'anaviy oqova suvlarni tozalash inshootlari (OSTI) sanoat va turar joylardan yig'ilgan oqova suvlar tarkibidagi ifloslantiruvchi moddalarni yo'qotishga qaratilgan [1]. Urbanizatsiya va sanoatlashuv jarayonlari oqova suv hajmining ortishiga olib keldi [2]. Shuningdek, shaharlarda aholi sonining jadal o'sishi maishiy oqova suvlar hajmini ko'paytirmoqda. Bu omil nafaqat oqova suvning umumiy miqdorini oshiradi, balki uning tarkibini ham murakkablashtirib, an'anaviy tozalash inshootlari uchun jiddiy muammolarni keltirib chiqarmoqda. Masalan, Turkiyaning Adana shahrida hozirgi kunda kuniga taxminan 185 tonna (yiliga 67,500 tonnaga yaqin) oqova suv loyqasi hosil bo'lmoqda va bu ko'rsatkich 2030-yilga borib yiliga 68,897 tonnaga yetishi kutilmoqda [3]. 2012-yildagi inshootlar ma'lumotlariga ko'ra, AQShda quruq vazn hisobida yiliga 12.56 million tonna loyqa hosil bo'lgan [4]. Tozalanmagan kanalizatsiya va oqova suvlarning katta qismi daryolar, dengizlar yoki ko'llarga oqizilayotgani sababli atrof-muhitga jiddiy xavf solmoqda, ifloslanishni kuchaytirib, shahar suvlari sifati hamda oziq-ovqat xavfsizligiga tahdid solmoqda [5]. Hozirgi kunda Irlandiyada har kuni 1 milliard litrdan ortiq oqova suv hosil bo'ladi; Biroq, yetarli tozalash inshootlari mavjud bo'lmagani sababli, 16 ta shahar va qishloqlardagi taxminan 40,000 aholiga teng bo'lgan tozalanmagan oqova suv har kuni dengiz va daryolarga oqizilishda davom etmoqda [6].

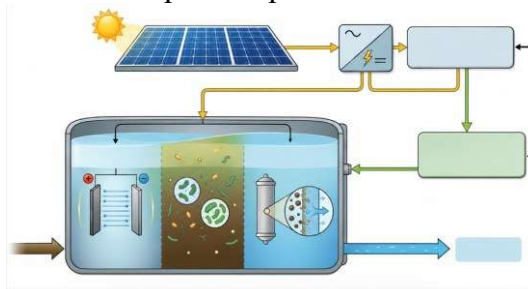
Ushbu jarayon oqova suvlarni tozalash tizimlarining zamonaviy energiya samaradorligi va barqarorligi konsepsiyasini shakllantirishda muhim ilmiy asos bo'lib xizmat qiladi. Keyingi bo'limda intellektual quyosh-elektrobiomembrana tizimlarining fizik va elektrokimyoviy mohiyati hamda ularning zamonaviy energiya samarador konstruktiv yechimlari tahlil qilinadi.

Oqova suv tozalash tizimlarining tarixiy rivojlanishi va zamonaviy konstruktiv yechimlari. Oqova suvlarni tozalash texnologiyalarining shakllanishi insoniyatning atrof-muhit gigiyenasi va suv resurslarini muhofaza qilishga qaratilgan dastlabki muhandislik yondashuvlaridan biri bo'lib, ularning rivojlanishi bir necha tarixiy bosqichlar orqali amalga oshgan.

XX asrning ikkinchi yarmidan boshlab materialshunoslik va membrana texnikasi sohalaridagi yutuqlar natijasida tozalash tizimlarida konstruktiv o'zgarishlar yuz berdi. An'anaviy chokli tindirgichlar o'rniga g'ovakli polimer membranalar va biologik reaktorlarning (MBR) joriy etilishi suv tozalash sifatini keskin oshirib, inshootlar maydonini sezilarli darajada qisqartirdi. Shu davrda past haroratli va energiya tejamkor tozalash konsepsiyasi ilmiy asoslanib, energiya samaradorligi mezonlari xalqaro standartlar doirasida shakllandi. Zamonaviy elektrobiomembrana tizimlari gibrid elektrodlar, aktiv loy akkumulyatori hamda ultrafiltrlash membranalaridan iborat ko'p bosqichli konstruksiyaga ega. So'nggi yillarda tozalash tizimlarining energiya samaradorligini



oshirishda quyosh PV panellari va intellektual Raqamli Egizak (*Digital Twin*) algoritmlari integratsiyasi ilg'or ilmiy yo'nalish sifatida qaralmoqda.



1-rasm. Intellektual quyosh-elektrobiomembrana tizimining umumiy konstruktiv sxemasi va modul elementlari.

1-rasmda taklif etilayotgan intellektual tizimning ishlash prinsipi va modullari o'rtasidagi bog'liqlik sxematik tarzda ko'rsatilgan. Quyosh PV panelida (*Solar PV Array*) hosil bo'lgan o'zgarmas tok (DC) Direct-DC invertersiz mikro-tarmoq uzeli orqali taqsimlanadi. Elektrenergiyaning bir qismi reaktor ichidagi Anod (+) va Katod (-) elektrodlariga impulsli o'zgarmas tok shaklida uzatilsa, ikkinchi qismi IoT datchiklari va Raqamli Egizak (*Digital Twin/AI*) intellektual boshqaruv modulini oziqlantiradi.

Gibrid Elektro-Biomembrana Reaktori (EBM) konstruksiyasi. Zamonaviy gibrid elektro-biomembrana reaktori bir-biri bilan integratsiyalashgan uchta funksional zonadan iborat bo'lib, ularning o'zaro ta'siri reaktor samaradorligini belgilaydi:

1. *Elektrokimyoviy ishlov zonasi*: Manfiy va musbat zaryadlangan elektrodlar juftligi joylashgan bo'lib, bu yerda past kuchlanishli impulsli elektr maydoni (0.5-1.5 V/sm) hosil qilinadi. Elektr maydoni oqova suv tarkibidagi zarrachalarga va mikroorganizmlarga elektro-osmotik ta'sir ko'rsatadi.

2. *Biologik parchalanish zonasi*: Aktiv loy va aerob mikroorganizmlar muhiti. Bu yerda organik birikmalar (BOD/COD) biosorbtsiya va gidroliz jarayonlari orqali parchalanadi.

3. *Membrana filtratsiyasi zonasi*: Suv ostiga botirilgan (*immersion*) ultrafiltrlash membrana moduli. Membrana g'ovaklari o'lchami 0.1 mkm bo'lib, tozalangan suvni mikroorganizmlar hamda muallaq zarrachalardan ajratadi.

Impulsli elektr maydoni va bio-parda shakllanishini to'xtatish mexanizmi. Membranali bioreaktorlarning eng katta kamchiligi - bu g'ovaklar yuzasida mikroorganizmlar va biopolimerlar to'planib, bio-parda hosil qilishi va trans-membrana bosimining (TMP) keskin ortishidir. Ushbu tadqiqotda bio-parda hosil bo'lishini to'xtatish uchun elektrotexnik va elektrokimyoviy mexanizm qo'llanildi. Manfiy zaryadga ega bo'lgan bakteriya va zarrachalar kuchlanishli elektr maydonida elektroforez hodisasi tufayli manfiy zaryadlangan membrana yuzasidan itarilib, anod (+) tomon intiladi:

$$F_e = q \cdot E \quad (1)$$

Buning natijasida membrana yuzasida muallaq moddalarning cho'kishi sekinlashadi, trans-membrana bosimining ortish tezligi keskin kamayadi.

Direct-DC va Raqamli Egizak (*Digital Twin/AI*) boshqaruv algoritmi. An'anaviy quyosh energetik tizimlarida PV panellarida hosil bo'lgan o'zgarmas tok (DC) inverter yordamida o'zgaruvchan tokka (AC) aylantiriladi. Ushbu ikki bosqichli energiya konversiyasi qo'shimcha energiya yo'qotishlariga olib keladi va keyin elektrodlar uchun qayta DC ga to'g'rilanadi. Bu jarayonda 12-18% energiya yo'qotiladi. Maqolada taklif etilayotgan *Direct-DC* metodikasida quyosh paneli beradigan o'zgarmas tok directly (to'g'ridan-to'g'ri) reaktor elektrodlariga uzatiladi, bu esa inverter yo'qotishlarini bartaraf etadi.

Natijalar va ularning tahlili

Intellektual quyosh-elektrobiomembrana tizimining model namunasida o'tkazilgan hisobiy va tajribaviy tadqiqotlar quyidagi asosiy ilmiy va amaliy natijalarni ko'rsatdi:



1. Suvni tozalash samaradorligi. Past kuchlanishli impulsli elektr maydoni ta'sirida elektrokoagulyatsiya hamda biologik parchalanish sinergiyasi evaziga oqova suvni chuqur tozalashga erishildi. Organik ifloslantiruvchilar (COD va BOD) bo'yicha tozalash samaradorligi 96-98% ni tashkil etdi. Elektrodalarda sodir bo'ladigan nitrifikatsiya hamda fosfatlar pretsipitatsiyasi hisobiga umumiy azot (TN) 88-94% ga, umumiy fosfor (TP) esa 90-95% ga tozalandi.

2. Membrana resursi va TMP dinamikasi. Impulsli elektr maydonida qo'llanilganda transmembrana bosimining vaqt bo'yicha ortish egri chizig'i taqqoslandi. An'anaviy MBR tizimlarida TMP 15-kunda kritik darajaga yetgan bo'lsa, taklif etilayotgan e-MBR tizimida bu muddat 35 kundan keyin kuzatildi. Ya'ni, TMP ortish tezligi 2.3 baravarga kamaydi va membranani kimyoviy yuvish davriyligi uzaytirilib, xizmat muddati 60% ga oshdi.

3. Energetik va texnik-iqtisodiy ko'rsatkichlar. *Direct-DC* uzeli va Raqamli Egizak boshqaruv algoritmlarining birgalikda tatbiq etilishi natijasida tizimning umumiy solishtirma energiya sarfi an'anaviy MBR qurilmalariga nisbatan 40-50% ga kamaydi. Quyosh PV panellari sutka davomida reaktor va intellektual boshqaruv modulining elektr ehtiyojini 78% avtonomlik bilan ta'minladi.

Xulosa

Mazkur ishda oqova suvlarni tozalashning intellektual quyosh-elektrobiomembrana tizimining rivojlanishi, ilmiy-nazariy asoslari va energiya samarador yechimlari tahlil qilindi. Past kuchlanishli impulsli elektr maydoni biofoulingni kamaytirib, transmembrana bosimi oshishini 2,3 baravarga sekinlashtirdi va membrana xizmat muddatini 60% ga uzaytirdi. *Direct-DC* ta'minot hamda Digital Twin/AI algoritmi energiya sarfini 40-50% kamaytirib, quyosh energiyasidan foydalanish ulushini 78% ga yetkazish imkonini berdi. Taklif etilayotgan tizim O'zbekiston sharoitida oqova suv inshootlarining energetik mustaqilligi va barqarorligini ta'minlash uchun istiqbolli yechimdir.

Adabiyotlar

- [1]. Maktabifard M., Zaborowska E., Makinia J. Achieving energy neutrality in wastewater treatment plants through energy savings and enhancing renewable energy production // Review of Environmental Science and Biotechnology. - 2018. - Vol. 17, No. 4. - P. 655-689. - DOI: 10.1007/s11157-018-9478-x.
- [2]. Oladejo J., Shi K., Luo X., Yang G., Wu T. A review of sludge-to-energy recovery methods // Energies. - 2019. - Vol. 12, No. 1. - Art. 60. - DOI: 10.3390/en12010060.
- [3]. Un C. Enhancing sewage sludge treatment with hydrothermal processing: a case study of Adana City // Sustainability. - 2024. - Vol. 16, No. 10. - Art. 4174. - DOI: 10.3390/su16104174.
- [4]. Seiple T. E., Coleman A. M., Skaggs R. L. Municipal wastewater sludge as a sustainable bioresource in the United States // Journal of Environmental Management. - 2017. - Vol. 197. - P. 673-680. - DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.04.032.
- [5]. Bhatia R. K., Sakhuja D., Mundhe S., Walia A. Renewable energy products through bioremediation of wastewater // Sustainability. - 2020. - Vol. 12, No. 18. - Art. 7501. - DOI: 10.3390/su12187501.
- [6]. Environmental Protection Agency. Urban Wastewater Treatment in 2023 [Electronic resource]. - Ireland, 2023. - Available at: <https://www.epa.ie/publications/monitoring-assessment/wastewater/Urban-Wastewater-Treatment-in-2023-report.pdf> (accessed: 01.05.2025).