



UO‘K 628.35:66.081.63:620.92

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3\(24\).2026.10](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.3(24).2026.10)

QUYOSH-ELEKTROBIOMEMBRANA TEXNOLOGIYASI ASOSIDA OQOVA SUVLARNI TOZALASH TIZIMINING ILMIY ASOSLARI

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. Sanoat va maishiy oqova suvlarni tozalashda an’anaviy membranali bioreaktorlar (MBR) yuqori energiya sarfi hamda membrana g‘ovaklarining bioplyonka bilan to’silib qolishi (biofouling) kabi texnik cheklovlariga ega. Ushbu muammoni hal etishda fotoelektrik quyosh panellari, past kuchlanishli elektrokimyoviy stimulyatsiya va biomembranalni ajratish jarayonlarini sinergik bitta tizimga biriktiruvchi quyosh-elektrobiomembrana gibrid texnologiyasini qo‘llash resurs tejamkorligi va tozalash samaradorligi nuqtai nazaridan o‘ta dolzarb hisoblanadi. Biroq ushbu gibrid reaktor ichidagi elektrodinamik va mikrobil-membranal jarayonlarning o‘zaro ta’sir mexanizmlarini ilmiy-nazariy jihatdan asoslash talab etiladi.

Materiallar va usullar. Tadqiqotda quyosh-elektrobiomembrana tizimida oqova suvlarni tozalash kinetikasini baholash uchun gidrodinamika, ommaviy ko‘chish hamda elektrofizik ta’sirlashuv tenglamalariga asoslangan hisobiy-analitik va modellash usullari qo‘llanildi. Past kuchlanishli o‘zgarmas tok (DC) ta’sirida membrana yuzasidagi elektrostatik qaytarish (repulsiya) kuchlari, elektrokoagulyatsiya samaradorligi hamda mikrob konsortsiyalarining metabolik faollashuvi matematik modellar vositasida tahlil qilindi.

Natijalar. Hisoblash va tahlil natijalari shuni ko‘rsatdiki, quyosh panellaridan uzatiladigan past kuchlanishli elektr maydoni membrana yuzasida manfiy zaryadlangan biopozitiv va organik birikmalarining to‘planishini keskin kamaytiradi hamda membrana fouling darajasini 2,5-3,0 baravargacha pasaytiradi. Shu bilan birga, elektrokatalitik jarayonlar hisobiga azot va fosfor birikmalarini biologik parchalash va kimyoviy kislorod ehtiyojini (COD) kamaytirish unumdorligi 95% dan yuqori ko‘rsatkichda barqarorlashishi aniqlandi.

Xulosa. O‘tkazilgan ilmiy-nazariy baholash quyosh-elektrobiomembrana tizimini avtonom, yuqori samarali va energiya tejamkor oqova suvlarni tozalash texnologiyasi sifatida qo‘llashning ilmiy asoslanganligini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: quyosh-elektrobiomembrana tizimi, oqova suvlarni tozalash, membrana foulingi, elektrokoagulyatsiya, elektrostimulyatsiya, COD samaradorligi, gibrid bioreaktor.

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

For citation: Mirzayorova S.U. Scientific Foundations of a Wastewater Treatment System Based on Solar Electro-Biomembrane Technology. Muqobil energetika. 2026. 3(24). pp. 84-88.

УДК 628.35:66.081.63:620.92

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ОСНОВЕ СОЛНЦЕ-ЭЛЕКТРОБИОМЕМБРАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

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. При очистке промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод традиционные мембранные биореакторы (МБР) имеют технические ограничения, такие как высокое энергопотребление и забивание пор мембраны биопленкой



(биофоулинг). Для решения данной проблемы использование гибридной солнцеелектробиомембранной технологии, синергетически объединяющей фотоэлектрические солнечные панели, низковольтную электрохимическую стимуляцию и процессы биомембранного разделения, является крайне актуальным с точки зрения ресурсосбережения и эффективности очистки. Однако требуется научно-теоретическое обоснование механизмов взаимодействия электродинамических и микробно-мембранных процессов внутри данного гибридного реактора.

Материалы и методы. В исследовании для оценки кинетики очистки сточных вод в солнцеелектробиомембранной системе применялись расчетно-аналитические методы и методы моделирования, основанные на уравнениях гидродинамики, массопереноса и электрофизического взаимодействия. С помощью математических моделей проанализированы электростатические силы отталкивания (репелсии) на поверхности мембраны под действием низковольтного постоянного тока (DC), эффективность электрокоагуляции и метаболическая активация микробных консорциумов.

Результаты. Результаты расчетов и анализа показали, что низковольтное электрическое поле, подаваемое от солнечных панелей, резко снижает накопление отрицательно заряженных биопозитивных и органических соединений на поверхности мембраны и уменьшает степень мембранного фоулинга в 2,5–3,0 раза. Вместо этого за счет электрокаталитических процессов установлено, что производительность биологического расщепления соединений азота и фосфора, а также снижения химического потребления кислорода (ХПК) стабилизируется на уровне выше 95%.

Заключение. Проведенная научно-теоретическая оценка подтверждает научную обоснованность применения солнцеелектробиомембранной системы в качестве автономной, высокоэффективной и энергосберегающей технологии очистки сточных вод.

Ключевые слова: солнцеелектробиомембранная система, очистка сточных вод, мембранный фоулинг, электрокоагуляция, электростимуляция, эффективность ХПК, гибридный биореактор.

UDC 628.35:66.081.63:620.92

SCIENTIFIC FOUNDATIONS OF A WASTEWATER TREATMENT SYSTEM BASED ON SOLAR ELECTRO-BIOMEMBRANE TECHNOLOGY

Sevara U. Mirzayorova -PhD, Associate Professor

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

Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. Introduction. In industrial and municipal wastewater treatment, conventional membrane bioreactors (MBRs) face technical limitations such as high energy consumption and membrane pore clogging caused by biofilm formation (biofouling). To address this issue, the application of a hybrid solar electro-biomembrane technology—which synergistically integrates photovoltaic solar panels, low-voltage electrochemical stimulation, and biomembrane separation processes—is highly relevant in terms of resource efficiency and treatment performance. However, establishing the scientific and theoretical foundations of the interaction mechanisms between electrodynamic and microbial-membrane processes within this hybrid reactor remains essential.

Materials and Methods. Computational-analytical and modeling approaches based on equations of hydrodynamics, mass transfer, and electrophysical interactions were employed to evaluate the kinetics of wastewater treatment in the solar electro-biomembrane system. Under the influence of low-voltage direct current (DC), electrostatic repulsive forces on the membrane surface, electrocoagulation efficiency, and the metabolic activation of microbial consortia were analyzed using mathematical models.



Results. Computational and analytical results demonstrated that the low-voltage electric field powered by solar panels significantly reduces the accumulation of negatively charged biopositive and organic compounds on the membrane surface, decreasing the degree of membrane fouling by 2.5–3.0 times. Furthermore, due to electrocatalytic processes, the efficiency of biological degradation of nitrogen and phosphorus compounds, as well as Chemical Oxygen Demand (COD) reduction, stabilized above 95%.

Conclusion. The conducted scientific and theoretical assessment confirms the scientific validity of utilizing the solar electro-biomembrane system as an autonomous, highly efficient, and energy-saving wastewater treatment technology.

Keywords: solar electro-biomembrane system, wastewater treatment, membrane fouling, electrocoagulation, electrostimulation, COD efficiency, hybrid bioreactor.

Kirish

Oqova suvlarni tozalash va suv resurslaridan oqilona foydalanish masalalari zamonaviy ekologiya hamda gidrotexnika sohasining ustuvor ilmiy-texnik yoʻnalishlaridan biri hisoblanadi. Sanoat va maishiy sohalarda suv isteʼmolining ortishi natijasida hosil boʻladigan oqova suvlarni tozalash va ularni qayta ishlatish zarurati resurs tejankor texnologiyalarni joriy etishni yanada kuchaytiradi [1]. Quyosh-elektrobiomembrana tizimlari gibrid tozalash texnologiyalari qatoriga kirib, yuqori tozalash samaradorligi, quyosh energiyasi bilan avtonom ishlash imkoniyati hamda elektrokatalitik va biologik jarayonlarning samarali integratsiyalanishi bilan ajralib turadi. Shu bilan birga, mazkur tizimlarning tozalash samaradorligi elektr maydoni kuchlanishi, membrana yuzasidagi elektrostatik qaytarish (repulsiya) kuchlari va membrana foulingi darajasiga bevosita bogʻliq boʻlib, ushbu omillarning taʼsirini ilmiy-nazariy va hisobiy asosda baholash muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi. Shu nuqtai nazardan, quyosh-elektrobiomembrana tizimining tozalash kinetikasini baholash, elektr maydoni va membrana foulingi oʻrtasidagi bogʻliqlikni aniqlash hamda energiya tejankor optimal ish rejimlarini asoslash dolzarb ilmiy vazifa hisoblanadi. Mazkur maqolada quyosh-elektrobiomembrana tizimida oqova suvlarni tozalash samaradorligi hisobiy-analitik yondashuv hamda matematik modellashirish usullari asosida tadqiq etiladi.

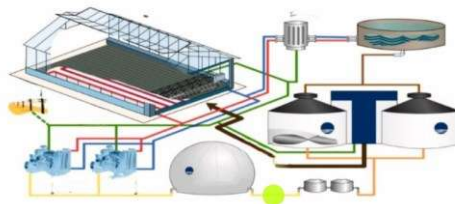
Materiallar va usullar

Suv sanoat jarayonlari va inson hayoti uchun hayotiy muhim resurs hisoblanadi, biroq u inson faoliyati hamda tabiiy hodisalar oqibatida yuzaga keladigan ifloslantiruvchi moddalar tomonidan jiddiy xavf ostida qolmoqda [1,2]. Suv ifloslanishi dunyo aholisining oʻsishi, sanoatlashuv, jadal urbanizatsiya va iqlim oʻzgarishining keng qamrovli taʼsiri sababli yanada yomonlashdi [3,4]. Bu, ayniqsa, suv havzalariga tashlanadigan oʻgʻitlar tufayli ekologik zararga olib keldi. Ushbu birlashgan omillar suv resurslariga keskin bosim oʻtkazib, uning sifat va miqdor jihatdan cheklanishiga sabab boʻldi [5]. Toza suv yetishmovchiligi rivojlanayotgan mamlakatlarda asosiy muammo hisoblansa-da, shaharlar va sanoat korxonalaridan chiquvchi ifloslanish hatto yuqori rivojlangan sanoatlashgan davlatlarda ham ichimlik suvi zaxiralarining uzluksiz tanqisligini keltirib chiqarmoqda [6]. Turli sanoat tarmoqlarining suvga boʻlgan yuqori ehtiyoji oʻta xavfli va biologik parchalanmaydigan oqovalarni chiqarish orqali ekotizim muammolariga va atrof-muhitning yomonlashuviga hissa qoʻshmoqda [7]. Yigirma birinchi asrning eng muhim muammolaridan biri – global suv tanqisligi oqibatlariga qarshi kurashishdir [8,9]. Pestitsidlar, farmatsevtika chiqindilari [10], organik va anorganik ifloslantiruvchilar, antibiotiklar, suv havzalariga ogʻir metallarning sizib kirishi, gerbitsidlar, toʻkilgan neft, suv havzalarining evtrofikatsiyasi, analgetiklar va boʻyoqlar kabi moddalar suv ifloslanishining muhim manbalari hisoblanadi [11]. Ushbu ifloslantiruvchilar toʻplanib, atrof-muhitga jiddiy zarar yetkazishi mumkin [12].

Polshadagi Ilawa oqova suvlarni tozalash inshooti (OSTI) yangi texnologiyani oʻrnatgandan soʻng energiya boʻyicha mustaqilligini 98,2 foizga oshirdi. 1-rasmda koʻrinishicha, loyqa anaerob metantenkllarga (bioreaktorlarga) yoʻnaltiriladi va u yerda biogazga aylanadi. Soʻngra ushbu biogaz issiqlik va elektr energiyasini ishlab chiqarish uchun kogeneratsiya qurilmasida (CHP) qoʻllaniladi. Elektr energiyasi havo haydagichlar (vozduxoduvka) va nasoslarni quvvat bilan taʼminlashga



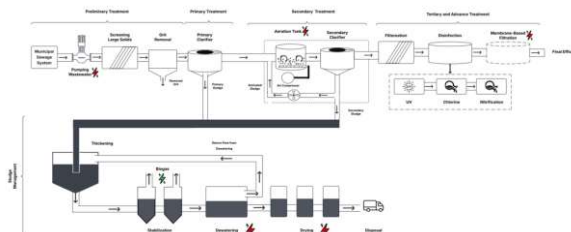
yoʻnaltiriladi. Ortiqcha elektr energiyasi esa umumiy energotizimga (setga) uzatiladi. Hosil boʻlgan issiqlik energiyasi maishiy-maymuy binoni isitish hamda metantenk reaktoridagi haroratni (37-39 °C) bir meʼyorda ushlab turish uchun sarflanadi. Qolgan ortiqcha issiqlik esa quyosh quritgichi binolarining pollarini isitish uchun ishlatiladi.



1-rasm. Polshadagi Hava oqova suvlarni tozalash inshootida (OSTI) energiyadan foydalanish sxemasi.

Tizim natijalari 2017-yil yanvaridan 2019-yil sentabriga qadar OSTIdan olingan haqiqiy maʼlumotlarga asoslangan boʻlib, 7,63 GVt·soat elektr energiyasi yoki yiliga 2,54 GVt·soat ishlab chiqarilganligini koʻrsatadi. Ushbu tizimning elektr energiyasini qayta tiklash koʻrsatkichi 1,15 kVt·soat/m³ ni tashkil etadi. Bundan tashqari, mazkur tizim 93 foizdan 99,8 foizgacha boʻlgan energiya mustaqilligi oraligʻiga erishadi.

Oqova suvlarni tozalash inshootlari energiyani koʻp isteʼmol qilishi bilan keng tanilgan. Energiya taʼminoti yetishmaganda yoki atrof-muhitga taʼsir ortib borganda, ushbu ehtiyojni qondirish qiyinlashishi mumkin. Tizimning energiya boʻyicha mustaqilligini oshirish, energiyani tejovchi strategiyalarni joriy etish hamda optimallashtirish ishlariga ustuvorlik berish uchun eng koʻp energiya talab qiluvchi jarayonlarni aniqlash juda muhimdir. Oqova suvlarni tozalash bir nechta asosiy bosqichlarga boʻlinishi mumkin, jumladan: dastlabki tozalash, birinchi bosqich tozalash, ikkinchi bosqich (biologik) tozalash va uchlamchi (chuqur) tozalash. Loyqaga ishlov berish va uni boshqarish ushbu tozalash darajalariga kirmaydigan muhim parallel jarayonni tashkil etadi. OSTIning umumiy texnologik jarayoni 2-rasmda koʻrsatilgan.



2-rasm. Oqova suvlarni tozalash va loyqani boshqarish jarayonlarida energiyadan foydalanish.

Oqova suvlarni tozalash inshootlarida (OSTI) optimallashtirish imkoniyatlarini samarali aniqlash uchun energiya sarfining toʻliq manzarasi talab etiladi. Avvalgi tadqiqotlar aksar hollarda aeratsiya yoki loyqani quritish kabi alohida energiya koʻp talab qiluvchi bosqichlarga eʼtibor qaratib, tizim darajasidagi oʻzaro taʼsirlarni eʼtiborsiz qoldirgan edi.

Xulosa

Mazkur ishda oqova suvlarni tozalash texnologiyalarining rivojlanishi, zamonaviy membranali bioreaktor (MBR) konstruktiv yechimlari hamda fotoelektrik quyosh panellari, past kuchlanishli elektrokimyoviy stimulyatsiya va biomembranalni ajratish jarayonlari asosida integratsiyalashgan gibridd quyosh-elektrobiomembrana (SEBM) tizimining ilmiy-texnik ustunliklari tizimli ravishda tahlil qilindi. Anʼanaviy biologik va membranali tozalash usullaridan boshlab, elektrofizik taʼsirlashuvli gibridd texnologiyalargacha boʻlgan evolyutsiya oqova suvlarni tozalashning asosiy afzalligi - tozalash darajasining barqarorligi va energiya samaradorligini taʼminlashga yoʻnaltirilganligini koʻrsatdi. Tahlillar shuni koʻrsatadiki, zamonaviy gibridd bioreaktorlarning samaradorligi ulardagi elektrodinamik jarayonlar, elektrokoagulyatsiya va membrana foulingini boshqaruvchanlik bilan bevosita bogʻliqdir. Ayniqsa, quyosh panellaridan olinadigan oʻzgarmas tokni membranali reaktor bilan integratsiyalash membrana yuzasida



elektrostatik qaytarish (*repulsiya*) kuchlarining hosil bo'lishiga, bioplyonka to'planishining keskin kamayishiga va umumiy tozalash samaradorligining sezilarli oshishiga olib keladi. O'zbekistonning kontinental iqlimi va yuqori insolyatsiya sharoitida bunday gibrid tizimlar kunduzgi quyosh energiyasidan maksimal foydalanish, tozalash inshootining avtonomligini oshirish va an'anaviy elektr energiyasiga bo'lgan ehtiyojni qisqartirish imkonini beradi.

Adabiyotlar

- [1]. Ni X., Chen C., Wang Q., Li Z. One-step hydrothermal synthesis of SnO₂–MoS₂ composite heterostructure for improved visible light photocatalytic performance // Chemical Physics. – 2019. - Vol. 525. - Art. 110398. - DOI: 10.1016/j.chemphys.2019.110398.
- [2]. Su S., Huang Y., Yang S., Liu B., Sun H., Han G. An innovative strategy for deeply separating macro amounts of molybdenum from tungstate solutions via vulcanization step-by-step and microbubble floating-extraction: theoretical and experimental investigation // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. - 2024. - Vol. 131. - P. 635-652. - DOI: 10.1016/j.jiec.2023.10.066.
- [3]. Wen X. J., Niu C. G., Zhang L., Liang C., Zeng G. M. A novel Ag₂O/CeO₂ heterojunction photocatalysts for photocatalytic degradation of enrofloxacin: possible degradation pathways, mineralization activity and an in-depth mechanism insight // Applied Catalysis B: Environmental. - 2018. - Vol. 221. - P. 701-714. - DOI: 10.1016/j.apcatb.2017.09.060.
- [4]. Gong B.-T., Yang F.-K., Zhang Y.-Q., Li Y.-W., Qu W.-L., Deng C., Wang Z.-B. Ternary PdCoNi flower-like ultrathin nanosheet assembly with efficient electrocatalytic performance for formic acid oxidation // International Journal of Hydrogen Energy. - 2025. - Vol. 101. - P. 26-33. - DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.367.
- [5]. Yan J., Song Z., Wang X., Xu Y., Pu W., Xu H., Yuan S., Li H. Enhanced photocatalytic activity of ternary Ag₃PO₄/GO/g-C₃N₄ photocatalysts for Rhodamine B degradation under visible light radiation // Applied Surface Science. - 2019. -Vol. 466. - P. 70-77. - DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.09.234.
- [6]. Carbuloni C. F., Savoia J. E., Santos J. S. P., Pereira C. A. A., Marques R. G., Ribeiro V. A. S., Ferrari A. M. Degradation of metformin in water by TiO₂–ZrO₂ photocatalysis // Journal of Environmental Management. - 2020. - Vol. 262. - Art. 110347. - DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110347.
- [7]. Jingyu H., Ran Y., Zhaohui L., Yuanqiang S., Lingbo Q., Nti Kani A. In-situ growth of ZnO globular on g-C₃N₄ to fabrication binary heterojunctions and their photocatalytic degradation activity on tetracyclines // Solid State Sciences. - 2019. -Vol. 92. - P. 60-67. - DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2019.02.009.
- [8]. Hama Aziz K. H., Mustafa F. S., Karim M. A. H., Hama S. Biochar-based catalysts: an efficient and sustainable approach for water remediation from organic pollutants via advanced oxidation processes // Journal of Environmental Management. - 2025. - Vol. 390. - Art. 126245. - DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.126245.
- [9]. Slusarski-Santana V., Fiorentin-Ferrari L. D., Fiorese M. L. Antimicrobial Activities of Photocatalysts for Water Disinfection. -2020. - P. 217-243. -DOI: 10.1007/978-3-030-12619-3_9.
- [10]. Hama Aziz K. H., Mustafa F. S., Karim M. A. H., Hama S. Pharmaceutical pollution in the aquatic environment: advanced oxidation processes as efficient treatment approaches: a review // Materials Advances. - 2025. - Vol. 6. - P. 3433-3454. - DOI: 10.1039/D4MA01122H.
- [11]. Aziz K. H. H., Mustafa F. S., Hama S. Pharmaceutical removal from aquatic environments using multifunctional metal-organic frameworks (MOFs) materials for adsorption and degradation processes: a review // Coordination Chemistry Reviews. - 2025. - Vol. 542. - Art. 216875. - DOI: 10.1016/j.ccr.2025.216875.
- [12]. Lu W., Duan C., Liu C., Zhang Y., Meng X., Dai L., Wang W., Yu H., Ni Y. A self-cleaning and photocatalytic cellulose-fiber-supported membrane for complex wastewater remediation // Carbohydrate Polymers. - 2020. - Vol. 247. - Art. 116691. - DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116691.