ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -8

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 8

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

ГИДРОФИЛЬНАЯ TiO_2–SiO_2-МОДИФИКАЦИЯ ПОЛИАМИДНЫХ МЕМБРАН ОБРАТНОГО ОСМОСА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ К ФУЛИНГУ И СОЛЕОТЛОЖЕНИЮ В СИСТЕМАХ ВОДОПОДГОТОВКИ ТЭС

Юлдашев Данияр Маратович
Докторант (PhD), Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан
E-mail: d.yuldashev@tdtu.uz
https://orcid.org/0009-0004-5857-8806
Юсупалиев Рисбек Маматович[1,a)]
К.х.н., профессор Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан
E-mail: risbek.yusupaliev@tdtu.uz
https://orcid.org/0000-0002-0433-5575

Аннотация. В статье рассмотрена проблема повышения устойчивости полиамидных мембран обратного осмоса к фулингу и солеотложению в системах водоподготовки теплоэлектростанций. На основе анализа современных научных публикаций обоснована перспективность формирования на поверхности полиамидного селективного слоя химически закреплённого TiO_2–SiO_2-содержащего гидрофильного покрытия. Показано, что TiO_2 может выполнять роль функционального нанокомпонента, повышающего гидрофильность и антифулинговую активность поверхности, тогда как SiO_2 благодаря развитой поверхности и наличию силанольных групп способствует стабилизации нанокомпозитного слоя и его химическому закреплению. Предложена методологическая схема модификации мембран с применением силановых агентов APTES/GPTMS и сформулированы основные критерии оценки эффективности: контактный угол, водопроницаемость, солезадержание, коэффициент восстановления потока и устойчивость к неорганическому солеотложению. Работа имеет обзорно-методологический характер и может служить основой для последующей экспериментальной оптимизации состава TiO_2–SiO_2-слоя.

Ключевые слова: обратный осмос, полиамидная мембрана, TiO_2, SiO_2, гидрофильная модификация, фулинг, солеотложение, водоподготовка ТЭС.

Annotatsiya. Maqolada issiqlik elektr stansiyalarining suv tayyorlash tizimlarida qo‘llaniladigan poliamidli teskari osmos membranalarining fouling va tuz cho‘kmasi hosil bo‘lishiga nisbatan barqarorligini oshirish muammosi ko‘rib chiqilgan. Zamonaviy ilmiy adabiyotlar tahlili asosida poliamid selektiv qatlam yuzasida kimyoviy biriktirilgan TiO_2–SiO_2 tarkibli gidrofil qoplama hosil qilishning istiqbolliligi asoslab berilgan. TiO_2 membrana yuzasining gidrofilligini

ISSN 3030-3907

va antifouling faolligini oshiruvchi funksional nanokomponent sifatida qaraladi, SiO_2 esa rivojlangan sirt tuzilishi va silanol guruhlari mavjudligi tufayli nanokompozit qatlamni barqarorlashtirish hamda uning kimyoviy birikishini ta'minlashga yordam beradi. Membranalarni APTES/GPTMS silan agentlari yordamida modifikatsiya qilishning metodologik sxemasi taklif etilgan. Samaradorlikni baholashning asosiy mezonlari sifatida kontakt burchagi, suv o'tkazuvchanligi, tuzlarni ushlab qolish darajasi, oqimni tiklash koeffitsiyenti va noorganik tuz cho'kmalariga chidamlilik ko'rsatkichlari belgilangan. Maqola sharhiy-metodologik xarakterga ega bo'lib, teskari osmos membranalari uchun TiO_2–SiO_2 qatlam tarkibini keyingi eksperimental optimallashtirishga asos bo'lib xizmat qilishi mumkin.

Kalit so'zlar: teskari osmos, poliamid membrana, TiO_2, SiO_2, gidrofil modifikatsiya, fouling, tuz cho'kmasi, IES suv tayyorlash tizimi.

Abstract. The paper discusses the problem of improving the resistance of polyamide reverse osmosis membranes to fouling and scaling in water treatment systems of thermal power plants. Based on the analysis of recent scientific literature, the formation of a chemically anchored TiO_2–SiO_2-containing hydrophilic coating on the polyamide selective surface is substantiated. TiO_2 is considered as a functional nanocomponent capable of increasing surface hydrophilicity and antifouling activity, whereas SiO_2 contributes to the stabilization and chemical anchoring of the nanocomposite layer due to its developed surface structure and the presence of silanol groups. A methodological scheme for membrane modification using APTES/GPTMS silane agents is proposed. The main evaluation criteria include water contact angle, water permeability, salt rejection, flux recovery ratio, and resistance to inorganic scaling. The article has a review and methodological character and provides a basis for subsequent experimental optimization of the TiO_2–SiO_2 layer composition for reverse osmosis membranes.

Keywords: reverse osmosis, polyamide membrane, TiO_2, SiO_2, hydrophilic modification, fouling, scaling, thermal power plant water treatment.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Обратный осмос является одной из ключевых технологий обессоливания и глубокой водоочистки. В энергетике обратноосмотические установки используются для предварительного снижения минерализации воды, уменьшения нагрузки на ионообменные фильтры и повышения стабильности водно-химического режима. Для теплоэлектростанций это особенно важно, поскольку качество подпиточной и технологической воды влияет на надёжность пароводяного тракта, теплообменного оборудования и вспомогательных систем.

ISSN 3030-3907

Современные обратноосмотические мембраны в основном представлены тонкоплёночными композитными полиамидными структурами. Их достоинствами являются высокая селективность по отношению к растворённым солям, сравнительно высокая водопроницаемость и технологическая зрелость. Вместе с тем полиамидные мембраны чувствительны к загрязнению поверхности органическими веществами, коллоидными частицами, микроорганизмами и минеральными отложениями. Эти процессы приводят к снижению потока пермеата, росту энергетических затрат, увеличению частоты промывок и сокращению срока службы мембранных элементов [1, 2].

Традиционные методы управления фулингом и солеотложением включают предварительную очистку, дозирование антискалантов, корректировку pH и периодические химические промывки. Однако такие меры не устраняют саму склонность полиамидной поверхности к взаимодействию с фулантами. Поэтому всё больше внимания уделяется модификации поверхности мембран, направленной на повышение гидрофильности, регулирование заряда и снижение адгезии загрязняющих веществ [3].

Цель настоящей статьи — обосновать перспективность формирования химически закреплённого TiO_2–SiO_2-содержащего гидрофильного слоя на полиамидных мембранах обратного осмоса для повышения их устойчивости к фулингу и солеотложению в системах водоподготовки теплоэлектростанций.

2. Проблема загрязнения полиамидных мембран в системах водоподготовки ТЭС

Загрязнение мембран обратного осмоса имеет сложную природу. В реальных водах теплоэнергетических объектов одновременно присутствуют природные органические вещества, соли жёсткости, сульфаты, хлориды, кремнезём, продукты коррозии, остатки коагулянтов, флокулянтов и антискалантов. При концентрировании воды в мембранном модуле эти компоненты накапливаются у поверхности мембраны и могут образовывать как рыхлые, так и плотные трудноудаляемые загрязняющие слои.

Для полиамидных RO-мембран наиболее значимыми являются четыре группы процессов: органический фулинг, коллоидное загрязнение, биофулинг и неорганическое солеотложение. Органический фулинг связан с адсорбцией гуминовых веществ, белковых соединений и синтетических органических реагентов. Коллоидное загрязнение обусловлено накоплением частиц глины, гидроксидов металлов, коллоидного кремнезёма и продуктов коррозии. Биофулинг развивается при закреплении микроорганизмов и

ISSN 3030-3907

формировании биоплёнки. Солеотложение связано с кристаллизацией $CaCO_3$, $CaSO_4$ и кремнезёмных фаз при локальном пересыщении раствора [10].

Таблица 1.

Основные типы загрязнений RO-мембран, актуальные для водоподготовки ТЭС

Тип загрязнения	Характерные компоненты	Основное влияние на работу мембраны
Органический фулинг	Гуминовые вещества, BSA, органические реагенты	Снижение потока, рост необратимой адсорбции, ухудшение восстановления после промывки
Коллоидное загрязнение	Коллоидный SiO_2, глина, гидроксиды Fe/Al	Формирование слоя частиц, увеличение гидравлического сопротивления
Биофулинг	Микроорганизмы, биоплёнки, EPS	Длительное снижение производительности, повышенная частота промывок
Солеотложение	$CaCO_3$, $CaSO_4$, SiO_2	Кристаллические/аморфные отложения, локальное повреждение и падение потока

С точки зрения эксплуатации ТЭС особую опасность представляет смешанный органоминеральный фулинг. Органические молекулы способны связывать ионы кальция и магния, изменять кинетику кристаллизации и повышать прочность загрязняющего слоя. В результате снижение потока может быть обусловлено не одним механизмом, а сочетанием органической адсорбции, коллоидного накопления и неорганического солеотложения. Это требует комплексного подхода к модификации поверхности, а не только повышения водопроницаемости.

3. Поверхностная модификация как направление повышения устойчивости RO-мембран

Поверхностная модификация мембран направлена на изменение свойств активного слоя без радикального изменения всей мембранной структуры. Для полиамидных мембран это особенно важно, поскольку селективный слой имеет малую толщину и определяет одновременно транспорт воды, задержание солей и взаимодействие с фулантами. Основные направления модификации включают гидрофилизацию поверхности, введение наночастиц, формирование полимерных покрытий, ковалентную

ISSN 3030-3907

прививку функциональных групп и создание гибридных органо-неорганических слоёв [3, 13].

Гидрофильная поверхность обычно обладает меньшей склонностью к адсорбции гидрофобных органических загрязнителей. Это связывают с формированием гидратированного межфазного слоя, который снижает прямой контакт фуланта с полимерной матрицей. Однако простое увеличение гидрофильности не всегда является достаточным условием антифулингового эффекта. Необходимо также контролировать шероховатость, химическую устойчивость и прочность закрепления модифицирующего слоя.

Одним из наиболее перспективных подходов является использование неорганических наночастиц. Они могут изменять гидрофильность, заряд, морфологию и функциональность поверхности. При этом ключевым ограничением остаётся стабильность: физически нанесённые частицы могут вымываться при фильтрации и промывках. Поэтому для практического применения важно обеспечить химическое или сильное межфазное закрепление модифицирующих компонентов.

4. Обоснование выбора TiO_2 и SiO_2 для гидрофильной модификации

В качестве нанокомпонентов для модификации полиамидной RO-мембраны в настоящей работе рассматриваются TiO_2 и SiO_2. Выбор этих оксидов обусловлен сочетанием гидрофильных, химически стабильных и функциональных свойств. TiO_2 известен как химически устойчивый материал с выраженной гидрофильностью и потенциальной фотокаталитической активностью. SiO_2 характеризуется развитой поверхностью и большим количеством силанольных групп Si–OH, которые являются удобными реакционными центрами для силанизации.

Таблица 2.

Функциональная роль TiO_2 и SiO_2 в модификации полиамидных мембран

Компонент	Ключевые свойства	Ожидаемая роль в модифицирующем слое
TiO_2	Химическая стабильность, гидрофильность, потенциальная фотокаталитическая и	Повышение гидрофильности, снижение адгезии органических загрязнителей, вклад в антибиофулинговый эффект

ISSN 3030-3907

	антибактериальная активность	
SiO_2	Развитая поверхность, силанольные группы Si–OH, высокая способность к силанизации	Повышение смачиваемости, стабилизация гибридного слоя, участие в химическом закреплении
TiO_2–SiO_2	Комбинация гидрофильных и функциональных свойств двух оксидов	Формирование гибридного гидрофильного слоя с возможным синергетическим эффектом
TiO_2–SiO_2 + силан	Органо-неорганическая сетка, связи Si–O–Si/Si–O–Ti	Повышение устойчивости покрытия и снижение риска вымывания наночастиц

Литературные данные показывают, что введение TiO_2 в полиамидный слой может повысить водный поток и улучшить устойчивость к органическому фулингу при сохранении солезадержания. Так, для TiO_2-полиамидных TFN-мембран сообщалось об увеличении потока с 40 до 65 л/(м²·ч) при росте концентрации наночастиц до 0,1 мас.% и сохранении солезадержания NaCl выше 96% [5]. Другие исследования показывают, что TiO_2 способен повышать термическую стабильность и антибиофулинговую устойчивость полиамидных мембран [7].

Для SiO_2 важным преимуществом является наличие поверхностных Si–OH-групп. Они повышают гидрофильность и облегчают химическое связывание с органосилановыми агентами. Сравнительное исследование TiO_2 и SiO_2 в тонкоплёночных нанокомпозитных мембранах показало, что при 0,5% TiO_2 контактный угол снижался с 58° до 38,7°, а водопроницаемость возрастала на 130%; при 0,5% SiO_2 контактный угол снижался до 28°, а рост водопроницаемости достигал 320% относительно контроля [8]. Эти данные указывают на различный, но взаимодополняющий вклад двух оксидов.

ISSN 3030-3907

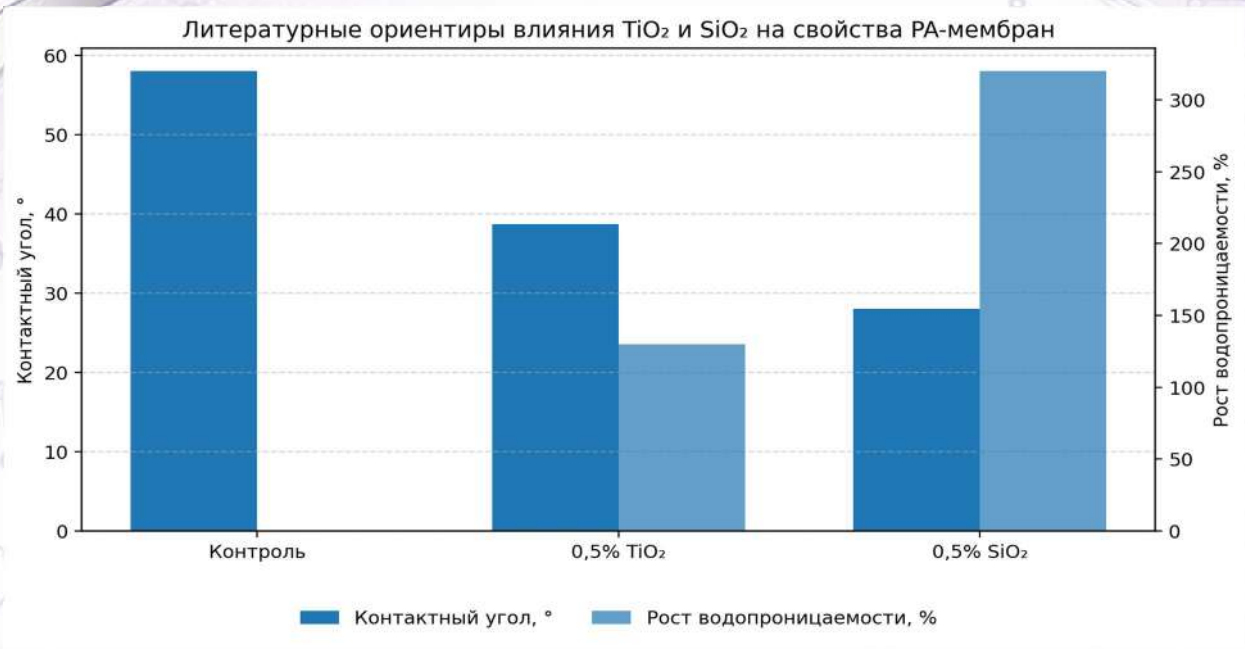


Рисунок 1. Литературные ориентиры влияния TiO_2 и SiO_2 на контактный угол и водопроницаемость полиамидных мембран по данным [8].

Таблица 3.

Литературные значения контактного угла и прироста водопроницаемости полиамидных мембран при введении TiO_2 и SiO_2 (пояснение к Рисунку 1)

Образец	Контактный угол, °	Рост водопроницаемости относительно контроля, %
Контроль	58	0
0,5% TiO_2	38,7	130
0,5% SiO_2	28	320

5. Роль силановых агентов в химическом закреплении TiO_2–SiO_2-слоя

Главное ограничение многих наночастичных покрытий заключается в недостаточной устойчивости к вымыванию. В условиях RO-фильтрации мембрана подвергается давлению, сдвиговым нагрузкам, изменению ионной силы, pH и периодическим промывкам. Если наночастицы удерживаются только физической адсорбцией, эффект гидрофилизации и антифулинга может снижаться во времени.

Для повышения стабильности целесообразно использовать органосилановые агенты, такие как APTES и GPTMS. После гидролиза алкоксисилановых групп образуются силанольные группы, способные конденсироваться с поверхностными гидроксильными группами SiO_2 и TiO_2. В результате могут формироваться связи Si–O–Si и Si–O–Ti. Органическая часть силана при этом может взаимодействовать с полиамидной

ISSN 3030-3907

поверхностью или формировать промежуточный органо-неорганический слой.

APTES содержит аминопропильную группу, которая может влиять на заряд и реакционную способность поверхности. GPTMS содержит эпоксидную группу и может участвовать в реакциях раскрытия эпоксидного цикла. Выбор между APTES и GPTMS должен определяться не только способностью к закреплению, но и итоговым влиянием на водопроницаемость, солезадержание и фулинг.

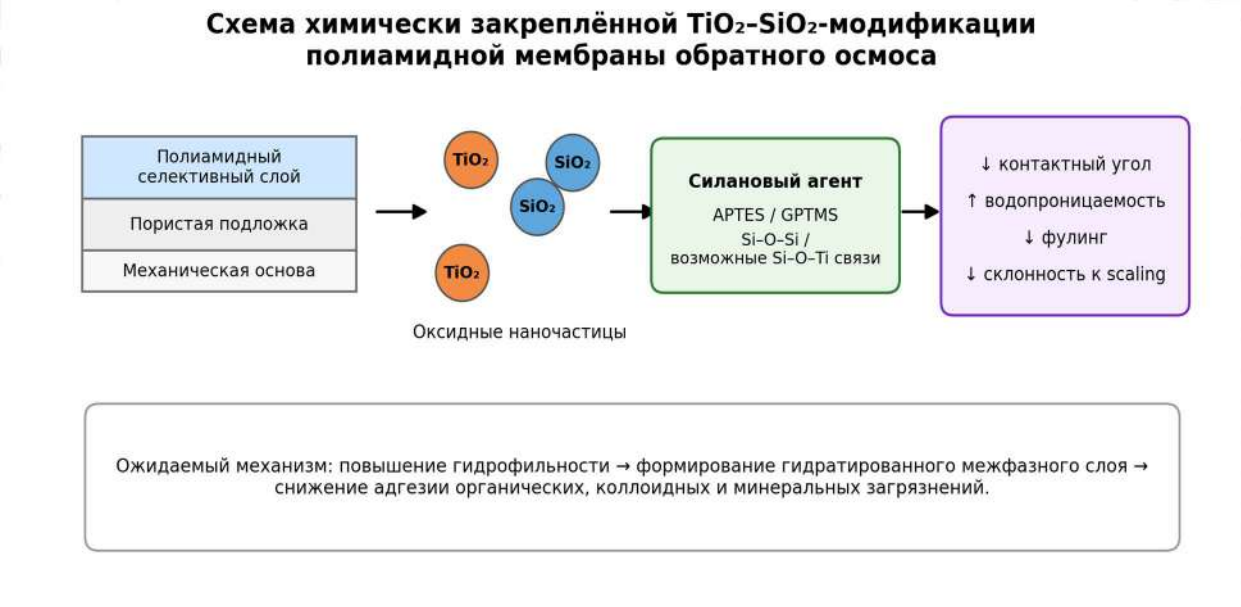


Рисунок 2. Концептуальная схема формирования химически закреплённого TiO_2–SiO_2-содержащего гидрофильного слоя на полиамидной RO-мембране.

6. Предлагаемая методологическая схема исследования

Для проверки предложенной концепции целесообразно использовать экспериментальную матрицу, включающую исходную полиамидную мембрану, однооксидные модификации, смешанные TiO_2–SiO_2-композиции и варианты с силановым закреплением. Такая схема позволяет разделить вклад отдельных компонентов и оценить роль химического закрепления.

Таблица 4.

Рекомендуемая матрица образцов для оценки TiO_2–SiO_2-модификации

Код	Тип образца	Цель сравнения
M0	Исходная полиамидная RO-мембрана	Базовый контроль
M1	PA + TiO_2	Оценка самостоятельного влияния TiO_2
M2	PA + SiO_2	Оценка самостоятельного влияния SiO_2

ISSN 3030-3907

M3	PA + TiO_2–SiO_2 (1:1)	Оценка совместного действия оксидов
M4	PA + TiO_2–SiO_2 с преобладанием TiO_2	Оценка влияния повышенной доли TiO_2
M5	PA + TiO_2–SiO_2 с преобладанием SiO_2	Оценка влияния повышенной доли SiO_2
M6	PA + TiO_2–SiO_2 + APTES	Оценка аминопропильного силанового закрепления
M7	PA + TiO_2–SiO_2 + GPTMS	Оценка эпоксисодержащего силанового закрепления

Ключевым требованием к экспериментальной схеме является сопоставимость условий. Все мембраны должны испытываться при одинаковой площади, давлении, температуре, концентрации солевого раствора, времени фильтрации и условиях промывки. В противном случае различия в потоке и фулинге могут быть связаны не с модификацией, а с изменением режима опыта.

7. Критерии физико-химической и мембранной оценки

Эффективность TiO_2–SiO_2-модификации не может оцениваться по одному показателю. Снижение контактного угла является важным признаком повышения гидрофильности, однако оно должно сопровождаться сохранением солезадержания и устойчивости модифицирующего слоя. Поэтому необходима комплексная система критериев.

Таблица 5.

Основные показатели оценки эффективности TiO_2–SiO_2-модификации полиамидных мембран обратного осмоса

Группа показателей	Метод / параметр	Интерпретация
Гидрофильность	Контактный угол воды	Снижение контактного угла указывает на повышение смачиваемости поверхности
Морфология	Сканирующая электронная микроскопия (SEM), атомно-силовая микроскопия (AFM)	Оценка равномерности модифицирующего слоя, наличия агломератов, дефектов и изменения шероховатости
Химический состав	Фурье-ИК-спектроскопия (FTIR), рентгеновская	Подтверждение присутствия Ti и Si на

ISSN 3030-3907

	фотоэлектронная спектроскопия (XPS), энергодисперсионный рентгеновский анализ при SEM (SEM/EDX)	поверхности, выявление Si–O–Si, органосилановых фрагментов и возможных Si–O–Ti связей
Транспорт воды	Чистый водный поток, водопроницаемость	Оценка изменения проницаемости мембраны и гидравлического сопротивления после модификации
Селективность	Солезадержание NaCl, общее содержание растворённых веществ (TDS), электропроводность пермеата	Проверка сохранения разделительной способности мембраны после нанесения модифицирующего слоя
Антифулинг	Коэффициент восстановления потока (FRR), общий фулинг (Rt), обратимый фулинг (Rr), необратимый фулинг (Rir)	Оценка общего, обратимого и необратимого загрязнения, а также способности мембраны восстанавливать поток после промывки
Антискейлинг	Падение потока при фильтрации растворов $CaCO_3$, $CaSO_4$ и SiO_2; SEM/EDX-анализ после испытаний	Оценка устойчивости мембраны к минеральным отложениям и подтверждение состава отложений
Стабильность слоя	Повторные промывки, циклы «фулинг–очистка», повторное измерение контактного угла и потока	Проверка сохранения гидрофильности, производительности и признаков присутствия TiO_2–SiO_2-слоя после эксплуатационных воздействий

ISSN 3030-3907

Для оценки фулинга целесообразно использовать стандартные безразмерные показатели. Коэффициент восстановления потока FRR рассчитывается как отношение потока после промывки к начальному потоку. Общий фулинг Rt определяется как относительное падение потока после загрязнения. Обратимая часть Rr соответствует восстановленной доле потока, а необратимая Rir показывает остаточную потерю производительности после промывки. Для практического применения наиболее важны высокий FRR и низкий Rir.

Для наглядного представления многофакторного подхода к оценке эффективности модификации может быть использована радиальная диаграмма (Рис.3), отражающая основные критерии: гидрофильность, водопроницаемость, солезадержание, антифулинговые свойства, антискейлинговую устойчивость и стабильность слоя. Диаграмма носит концептуальный характер и не заменяет экспериментальную оценку.

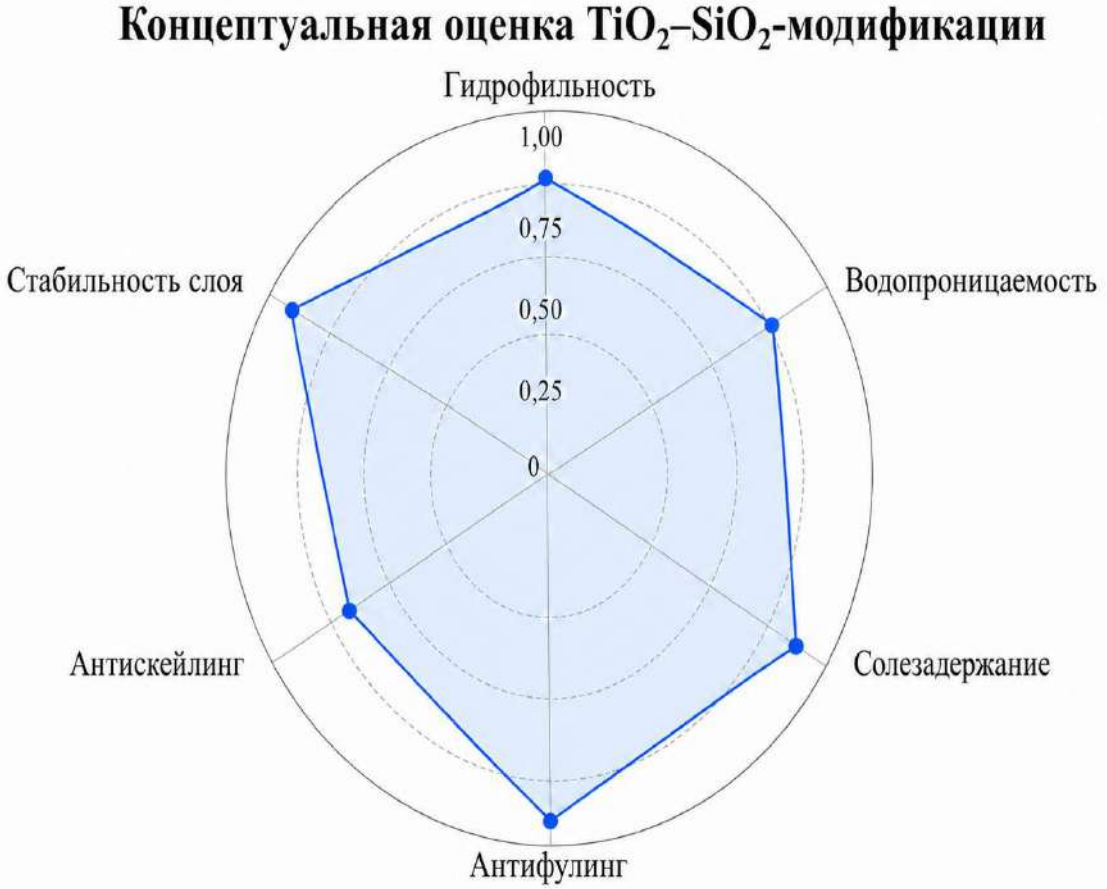


Рисунок 3. Комплекс критериев оценки эффективности TiO_2–SiO_2-модифицированного слоя.

8. Ожидаемое влияние TiO_2–SiO_2-модификации на фулинг и солеотложение

ISSN 3030-3907

Ожидаемое антифулинговое действие TiO_2–SiO_2-модификации связано прежде всего с повышением гидрофильности поверхности. Гидрофильный слой способен снижать прямой контакт органических молекул с полиамидной матрицей, уменьшать адгезию белковых и гуминовых соединений и облегчать удаление загрязнений промывкой. При наличии TiO_2 дополнительно возможен антибактериальный и фотокаталитический вклад, хотя в реальных RO-модулях этот эффект требует специальной организации УФ-воздействия [4, 7].

Антискейлинговое действие модификации следует рассматривать осторожно. Повышение гидрофильности может снижать адгезию зарождающихся кристаллов, однако сама по себе гидрофильность не гарантирует предотвращение $CaCO_3$, $CaSO_4$ или SiO_2-отложений. На кристаллизацию влияют степень пересыщения, pH, ионная сила, температура и концентрационная поляризация. Поэтому антискейлинговый эффект должен подтверждаться испытаниями на модельных растворах, а не только контактным углом.

Наиболее перспективным является не максимальное увеличение потока, а сохранение баланса между проницаемостью и селективностью. Избыточное количество наночастиц может привести к агломерации, росту шероховатости, дополнительному сопротивлению или появлению дефектов. Поэтому оптимальный слой должен быть тонким, равномерным, химически закреплённым и стабильным после промывки.

9. Практическое значение для систем водоподготовки теплоэлектростанций

Для ТЭС практическое значение модифицированных мембран заключается в повышении стабильности работы обратноосмотических блоков. Если TiO_2–SiO_2-содержащий слой обеспечивает снижение необратимого фулинга и уменьшает интенсивность минеральных отложений, это может привести к снижению частоты химических промывок, стабилизации потока пермеата и увеличению срока службы мембранных элементов.

Особый интерес представляет применение таких мембран на стадиях предварительного обессоливания, где исходная вода содержит природную органику, соли жёсткости и кремнезём. В этих условиях мембраны испытывают комбинированную нагрузку, и поэтому модификация поверхности должна быть не только гидрофильной, но и устойчивой к вымыванию. Именно по этой причине химическое закрепление через силановые агенты является более перспективным направлением, чем простое физическое нанесение наночастиц.

ISSN 3030-3907

Для промышленного внедрения необходимо учитывать технологичность метода. Модификация должна быть воспроизводимой, не должна ухудшать солезадержание, должна быть совместимой с коммерческими полиамидными мембранами и не должна требовать агрессивных условий, разрушающих селективный слой. В этом отношении TiO_2–SiO_2-силановые системы представляют практический интерес, поскольку могут быть адаптированы к поверхностной обработке готовых мембранных купонов или элементов.

10. Ограничения и направления дальнейших исследований

Настоящая статья имеет обзорно-методологический характер. Она обосновывает научную гипотезу и предлагает схему экспериментальной проверки, но не заменяет полноценные лабораторные испытания. Для подтверждения эффективности TiO_2–SiO_2-модификации необходимы измерения контактного угла, SEM/EDX, FTIR/XPS, водопроницаемости, солезадержания, FRR и устойчивости к $CaCO_3$, $CaSO_4$ и кремнезёмному солеотложению.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на подбор оптимального соотношения TiO_2/SiO_2, сравнение APTES и GPTMS, определение концентрации силанового агента, проверку стабильности после многократных циклов фулинг–промывка и испытания на реальных водах ТЭС. Также важным является изучение возможного влияния модификации на стойкость полиамидного слоя к химическим промывкам и длительному воздействию солевых растворов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Выполненный анализ показывает, что формирование химически закреплённого TiO_2–SiO_2-содержащего гидрофильного слоя является перспективным направлением повышения устойчивости полиамидных мембран обратного осмоса к фулингу и солеотложению. TiO_2 и SiO_2 обладают взаимодополняющими свойствами: TiO_2 может вносить функциональный антифулинговый и антибактериальный вклад, а SiO_2 повышает гидрофильность и облегчает силановое закрепление за счёт поверхностных силанольных групп.

Применение силановых агентов APTES/GPTMS позволяет перейти от физически нанесённого покрытия к более устойчивой органо-неорганической структуре, что особенно важно для эксплуатации мембран в условиях давления, промывок и переменного состава воды. Для систем водоподготовки ТЭС такой подход может быть полезен за счёт снижения необратимого фулинга, повышения стабильности потока и уменьшения риска минерального загрязнения.

ISSN 3030-3907

Предложенная методологическая схема включает экспериментальную матрицу M0–M7 и комплекс критериев оценки: контактный угол, морфология, химический состав, водопроницаемость, солезадержание, FRR, Rt, Rr, Rir и устойчивость к $CaCO_3$, $CaSO_4$ и SiO_2. Наиболее перспективным следует считать состав, который обеспечивает не максимальное изменение одного параметра, а оптимальный баланс между гидрофильностью, селективностью, антифулинговой устойчивостью и стабильностью после промывки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee K. P., Arnot T. C., Mattia D. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination — Development to date and future potential. Journal of Membrane Science. 2011;370(1–2):1–22. DOI: 10.1016/j.memsci.2010.12.036.
2. Werber J. R., Osuji C. O., Elimelech M. Materials for next-generation desalination and water purification membranes. Nature Reviews Materials. 2016;1:16018. DOI: 10.1038/natrevmats.2016.18.
3. Rana D., Matsuura T. Surface modifications for antifouling membranes. Chemical Reviews. 2010;110(4):2448–2471. DOI: 10.1021/cr800208y.
4. Kwak S. Y., Kim S. H., Kim S. S. Hybrid organic/inorganic reverse osmosis (RO) membrane for bactericidal anti-fouling. 1. Preparation and characterization of TiO_2 nanoparticle self-assembled aromatic polyamide thin-film-composite membrane. Environmental Science & Technology. 2001;35(11):2388–2394. DOI: 10.1021/es0017099.
5. Al Mayyahi A. TiO_2 polyamide thin film nanocomposite reverse osmosis membrane for water desalination. Membranes. 2018;8(3):66. DOI: 10.3390/membranes8030066.
6. Al Mayyahi A. Important approaches to enhance reverse osmosis (RO) thin film composite membrane performance. Membranes. 2018;8(3):68. DOI: 10.3390/membranes8030068.
7. Khorshidi B., Biswas I., Ghosh T., Thundat T., Sadrzadeh M. Robust fabrication of thin film polyamide-TiO_2 nanocomposite membranes with enhanced thermal stability and anti-biofouling propensity. Scientific Reports. 2018;8:784. DOI: 10.1038/s41598-017-18724-w.
8. Urper-Bayram G. M., Bossa N., Warsinger D. M., Koyuncu I., Wiesner M. R. Comparative impact of SiO_2 and TiO_2 nanofillers on the performance of thin-film nanocomposite membranes. Journal of Applied Polymer Science. 2020;137(44):49382. DOI: 10.1002/app.49382.
9. Petukhov D. I., et al. Graphene oxide surface modification of reverse osmosis membrane via Langmuir-Blodgett technique: balancing performance and

antifouling properties. Membranes. 2024;14(8):172. DOI: 10.3390/membranes14080172.
10. Maddah H. A., Chogle A. Biofouling in reverse osmosis: phenomena, monitoring, controlling and remediation. Applied Water Science. 2017;7:2637–2651. DOI: 10.1007/s13201-016-0493-1.
11. Elimelech M., Phillip W. A. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. Science. 2011;333(6043):712–717. DOI: 10.1126/science.1200488.
12. Greenlee L. F., Lawler D. F., Freeman B. D., Marrot B., Moulin P. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. Water Research. 2009;43(9):2317–2348. DOI: 10.1016/j.watres.2009.03.010.
13. Pendergast M. M., Hoek E. M. V. A review of water treatment membrane nanotechnologies. Energy & Environmental Science. 2011;4:1946–1971. DOI: 10.1039/C0EE00541J.
14. Petersen R. J. Composite reverse osmosis and nanofiltration membranes. Journal of Membrane Science. 1993;83(1):81–150. DOI: 10.1016/0376-7388(93)80014-O.
15. Malaeb L., Ayoub G. M. Reverse osmosis technology for water treatment: state of the art review. Desalination. 2011;267(1):1–8. DOI: 10.1016/j.desal.2010.09.001.
16. Pasternack R. M., Rivillon Amy S., Chabal Y. J. Attachment of 3-(aminopropyl)triethoxysilane on silicon oxide surfaces: dependence on solution temperature. Langmuir. 2008;24(22):12963–12971. DOI: 10.1021/la8024827.
17. Baker R. W. Membrane Technology and Applications. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons; 2012.
18. Mulder M. Basic Principles of Membrane Technology. 2nd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 1996.

ISSN 3030-3907