

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Тивоненка Артема Вікторовича  
на тему «Екологізація процесів зворотного осмосу»,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
в галузі знань 16 Хімічна та біоінженерія  
за спеціальністю 161 Хімічні технології та інженерія

### **Актуальність теми дисертації**

Сучасні технології водопідготовки важко уявити без використання систем зворотного осмосу. Близько 4 мільярдів літрів води на день опріснюється за технологією зворотного осмосу, при цьому використовується близько 4 млн мембранних елементів. Строк дії полімерних мембран, що є основною частиною ЗО елементів, в результаті їх забруднення знижується, що і призводить до утворення до 50 т на рік пластикових відходів. Дисертаційна робота Артема Тивоненка присвячена розв'язанню актуальних екологічних проблем, пов'язаних зі скороченням пластикових відходів, що утворюються при використанні комерційних зворотноосмотичних мембранних елементів, а також отриманню абсолютно безпечної та фізіологічно повноцінної питної води. Дисертаційне дослідження має велике практичне значення, а запропоновані рішення можуть бути реалізовані у промислових масштабах.

В роботі показано доцільність та актуальність проведення модифікування відпрацьованих мембранних елементів із визначенням шляхів подовження їх життєвого циклу. Встановлені раціональні методи регенерації комерційних ЗО мембранних елементів, а також їх модифікації шляхом обробки розчинами активного хлору для впливу на їхню селективність з метою подальшого використання в процесі одержання придатної до споживання води.

**Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження не підлягає сумніву та полягає в наступному:

Вперше встановлено факт і характер змін структурних, хімічних та фізико-хімічних характеристик поліамідного мембранного полотна під впливом шести модифікуючих агентів, що сприяє зниженню схильності мембранних елементів до утворення мембранного забруднення в процесі очищення води. Також визначено критичні межі забруднення відпрацьованих зворотноосмотичних мембранних елементів комерційного класу, що забезпечують практично повне відновлення їхніх властивостей під час регенерації.

Отримані експериментальні результати можуть застосовуватись для впровадження процесів регенерації відпрацьованих зворотноосмотичних



елементів та їх модифікації з метою використання у комерційних установках для виробництва безпечної та фізіологічно повноцінної питної води.

Достовірність експериментальних результатів підтверджена використанням сучасних фізико-хімічних методів аналізу, а саме, скануючої електронної мікроскопії, інфрачервоної мікроскопії, електрокінетичними вимірюваннями. Отримані результати по опрісненню та очищенню води зворотнім осмосом добре узгоджуються з описаними результатами аналогічних досліджень. Отримані результати доповнюють відомі теорії баромембранного очищення та узгоджуються з ними за основними положеннями.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової роботи.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Тивоненка А.В. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Хімічні технології та інженерія».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям екологізації процесів зворотного осмосу. Отримані результати стимулюють розвиток хімічних технологій та інженерії, зокрема в сфері переробки використаних комерційних мембранних елементів і виробництва води, що відповідає фізіологічним вимогам.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Тивоненка Артема Вікторовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою. Представлений матеріал характеризується послідовністю викладу, ясністю та зрозумілістю. В роботі використаний науковий стиль мовлення, побудований на загальноприйнятих термінах та відповідає сучасним стандартам у галузі хімічних технологій та інженерії. Дисертант демонструє глибоке розуміння досліджуваної проблематики та вміло передає результати своєї роботи.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 139 сторінок.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної тематики, окреслено мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет, описано застосовані методи дослідження, а також наведено наукову новизну й практичне значення



отриманих результатів. Крім того, підкреслено взаємозв'язок роботи з існуючими науковими програмами, планами та темами, а також наведено дані про апробацію, публікації за темою дисертації та впровадження розроблених методик у виробничу та освітню практику.

У першому розділі детально розглянуто екологічні проблеми, що супроводжують застосування методу зворотного осмосу, зокрема, питання утворення пластикових відходів і отримання очищеної води, яка не відповідає вимогам фізіологічної повноцінності. Показано, що ці проблеми можуть бути вирішені шляхом використання регенованих та хімічно модифікованих зворотноосмотичних елементів. Аналіз літературних джерел свідчить, що типовий термін експлуатації комерційних мембранних елементів становить 6–12 місяців, після чого вони перетворюються на пластикові відходи, що утилізуються на сміттєзвалищах. Наведено статистичні дані щодо кількості таких відходів і темпів їх щорічного зростання, а також проаналізовано причини їх утворення й існуючі методи продовження життєвого циклу мембранних елементів. Доведено, що повторне використання мембранних елементів після регенерації або модифікації (зокрема, обробки розчином активного хлору для зменшення селективності) є одним із найефективніших рішень.

Отримана питна вода, вироблена за допомогою зворотного осмосу, є абсолютно безпечною, проте не відповідає стандартам фізіологічної повноцінності: мінералізація має бути не менше 100 мг/дм<sup>3</sup>, а загальна жорсткість – не менше 1 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Зазвичай ці показники досягають лише на окремій стадії домінералізації, яка має свої недоліки. У зв'язку з цим доцільним є застосування одноступеневої мембранної системи із зворотноосмотичними елементами з точно заданою селективністю, що дозволить отримувати воду, яка відповідатиме як нормативам безпеки, так і стандартам фізіологічної повноцінності.

Другий розділ присвячено характеристиці об'єктів дослідження – нових та відпрацьованих комерційних зворотноосмотичних елементів. Детально описано методику визначення стартових характеристик мембранних елементів, а також представлено режим регенерації відпрацьованих елементів шляхом послідовної обробки лужним, кислотним та окисним реагентами. Окремо розглянуто процедури модифікації зворотноосмотичних елементів та методи визначення змін їх робочих характеристик під впливом солівмісту вихідної води, температури та робочого тиску.

Для оцінки змін властивостей поверхні мембранного полотна після модифікації використано такі методи, як інфрачервона спектроскопія, скануюча електронна мікроскопія, вимірювання контактного кута змочування (для оцінки гідрофільності), визначення дзета-потенціалу та аналіз розміру пор. Також



наведено умови проведення пілотних випробувань очищення водопровідної води м. Києва на комерційній установці зворотного осмосу з використанням нового, регенованого, нового модифікованого та регенованого модифікованого мембранних елементів.

У третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень процесів регенерації відпрацьованих мембранних елементів та модифікації як нових, так і регенованих зворотноосмотичних елементів. У розділі 3.1 продемонстровано ефективність обраного режиму регенерації за допомогою фотографій, мікрофотографій, інфрачервоних спектрів та аналізу хімічного складу фоулінгу на поверхні як відпрацьованих, так і регенованих елементів. Встановлено граничні показники забруднення, при досягненні яких можливе повне відновлення властивостей мембранних елементів, а результати пілотних випробувань очищення води із застосуванням як нових, так і регенованих елементів виявились ідентичними.

У розділі 3.2 проведено порівняння різних режимів модифікації зворотноосмотичних елементів і визначено оптимальні умови їх проведення. Для отримання елементів із різною селективністю використовували режими з однаковим часом експозиції та різною концентрацією активного хлору. Доведено, що обрані режими є актуальними для нових і регенованих елементів. Встановлено також вимоги до заданої селективності для досягнення фізіологічної повноцінності води залежно від солевмісту вихідної води; зокрема, для київської води із середнім вмістом солей 300 мг/дм<sup>3</sup> селективність модифікованих елементів не повинна перевищувати 60 %. Досліджено вплив основних робочих параметрів – солевмісту, температури та тиску – на характеристики модифікованих елементів: при збільшенні солевмісту знижується як селективність, так і продуктивність, при зниженні температури селективність підвищується, а продуктивність падає, а при підвищенні тиску зростають обидва показники.

Аналіз впливу модифікації на властивості поверхні поліамідного мембранного полотна показав, що після обробки поверхня стає більш гладкою, гідрофільною та набуває негативного заряду, а розмір пор збільшується з 4 до 4,5 Å.

Четвертий розділ зосереджений на аналізі екологічних наслідків та економічної доцільності регенерації відпрацьованих комерційних зворотноосмотичних елементів. За методикою розрахунку витрат матеріалів на одиницю продукції та коефіцієнтів інтенсивності маси встановлено, що застосування процесу регенерації, який продовжує життєвий цикл мембранних елементів, дозволяє не лише зменшити кількість пластикових відходів, але й знизити обсяги матеріалів, що потрапляють до навколишнього середовища.



Також проведено розрахунок вартості регенованих елементів, що демонструє можливість значної економії при їх використанні замість нових.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 10 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 1 стаття у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 2 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 2 статей у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports. Також результати дисертації були апробовані на 7 наукових фахових конференціях.

Публікації дисертанта відзначаються високим науковим рівнем, при цьому всі принципи академічної доброчесності були дотримані під час написання та публікації наукових робіт. Особистий внесок здобувача, як у співавторських публікаціях, так і у роботах, зарахованих за темою дисертації, є вагомим.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

1. Стр.7. Список публікацій здобувача оформлений не в одному стилі
2. На стр. 30, Таблиця 1.1 вказана модель «Транспорт йонів». Що це за модель? Посилання 31 для опису цієї моделі не відповідає вказаній моделі, а описує застосування молекулярної динаміки для розуміння мембранної архітектури та транспорту для поліамідних мембран.
3. Стр. 36, автор стверджує, що концентраційна поляризація є «наслідком утворення прикордонного шару на мембрані». Примембранний, або дифузійний шар існує на поверхні (межі поділу фаз) будь-якої гетерогенної системи. А збільшення концентрації речовин в примембранному шарі відбувається за рахунок різниці конвективного та дифузійного потоку через мембрану.
4. Стр 47. Вживання терміну карбонові групи не правильне. Групи є карбоксильні або карбонільні.
5. Рис. 2.5, калібрувальний графік для сахарози відсутній.
6. Стр. 66, щодо селективності мембрани, R -коефіцієнт затримування або відскання. Також автор часто використовує поняття відторгнення, що є перекладом слова rejection з іноземної літератури.
7. Яка ефективна площа фільтрування мембранних елементів, що досліджувались?



8. Рис. 3.5, важко інтерпретувати спектри, так як вони накладені один на інший.
9. Рис. 3.9, нема пояснення за рахунок чого відбувається зміна значення рН в пермеаті. Крім того, чому рН водопровідної води = 8. Чи регулювали це значення?
10. Розділ 3.2.2. Чому модифікація при температурі 25 градусів є найбільш раціональним рішенням, якщо при вищій температурі модифікування не проводили?

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Тивоненка Артема Вікторовича на тему «Екологізація процесів зворотного осмосу» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для *хімічної та біоінженерної галузі*. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Тивоненко Артем Вікторович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 16 Хімічна та біоінженерія за спеціальністю 161 Хімічні технології та інженерія.

### **Офіційний опонент:**

доцент кафедри хімії  
Національного Університету  
«Києво-Могилянська Академія»  
к.т.н., ст. наук. сп.



Вікторія КОНОВАЛОВА

М.П.

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 року

