

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# ПЕРЕДОВІ МЕМБРАННІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

## **Навчальний посібник**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів другого  
(магістерського) рівня вищої освіти  
за спеціальністю 161 Хімічні технології та інженерія  
галузі знань 16 Хімічна інженерія та біоінженерія  
кваліфікація: магістр з хімічних технологій та інженерії*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2025

- Укладачі: *Кириї Світлана Олександрівна*, канд. техн. наук  
*Донцова Тетяна Анатоліївна*, док. техн. наук, проф.  
*Куриленко Віктор Сергійович*
- Рецензент *Коновалова В.В.*, канд. техн. наук, старш. співроб.,  
доцент кафедри хімії, Національний Університет  
«Києво-Могилянська Академія»
- Відповідальний редактор *Янушевська О.І.*, канд. техн. наук, доц.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_ р.)  
за поданням Вченої ради хіміко-технологічного факультету  
(протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_ р.)*

У навчальному посібнику розкриваються останні тенденції та наукові і технологічні досягнення в індустрії мембранних технологій, які використовуються для екологічного застосування. Розглянуто основи мембранних процесів, особливості керамічних мембран, електромембранних процесів, зворотного та прямого осмосу, сучасного апаратурного оформлення. Зосереджено увагу на екологічних аспектах мембранних технологій, їхні переваги у зниженні викидів, збереженні ресурсів та підвищенні стійкості виробничих процесів. Особлива увага приділяється інноваційним стратегіям і матеріалам, які покращують ефективність і довговічність мембран, а також зменшують вплив на навколишнє середовище. Крім того, посібник включає численні приклади реальних застосувань мембранних технологій, що робить його цінним ресурсом для студентів, науковців, інженерів та професіоналів у галузі охорони навколишнього середовища.

Реєстр. № НП \_\_\_\_\_. Обсяг 6,05 авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© Кириї С.О., Донцова Т.А., Куриленко В.С. 2025

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

## Зміст

<u>Вступ.....</u>	<u>5</u>
<u>Розділ 1. Основи мембранних процесів .....</u>	<u>6</u>
1.1 Сучасний стан ринку мембранних технологій .....	12
1.2 Переваги та недоліки мембранних технологій водоочищення в порівнянні з традиційними.....	21
1.3 Огляд матеріалів, методів отримання, виготовлення мембран, модулів і реакторів та відмінності мембранних процесів.....	23
Мембранні модулі .....	39
1.4 Концентраційна поляризація.....	60
1.5 Старіння мембран під час водопідготовки: механізми, моніторинг та контроль .....	61
1.6 Фоулінг та його попередження .....	70
<u>Розділ 2. Керамічні мембрани .....</u>	<u>75</u>
2.1 Матеріали для керамічних мембран .....	81
2.2 Способи синтезу та технології отримання керамічних мембран .....	88
2.3 Селективний шар – надання специфічних властивостей .....	103
2.4 Транспорті та механічні властивості керамічних мембран.....	108
2.5 Застосування керамічних мембран: від розділення газів до очищення стоків .....	111
<u>Розділ 3. Електромембранні процеси .....</u>	<u>116</u>
3.1 Фундаментальні аспекти електромембранних процесів. Електродіаліз, електродеіонізація та зворотний електродіаліз в процесах очищення води .....	116
3.2 Переваги та недоліки електромембранних процесів.....	122
3.3 Останні розробки в електромембранних процесах, що мають промислове значення .....	123
<u>Розділ 4. Зворотний, прямий осмос .....</u>	<u>125</u>
4.1 Різниця між осмосом, зворотнім осмосом та прямим осмосом.....	125

4.2 Зворотний та прямий осмос .....	127
4.2 Мембрани для прямого осмосу в промисловому застосуванні .....	131
4.3 Мембранні технології для опріснення морської води та очищення солонуватої води .....	135
<u>Розділ 5. Передові технології в мембранній індустрії.....</u>	<u>140</u>
5.1 Нанокмпозитні мембрани .....	140
5.2 Рідинні мембрани .....	145
5.2.1 Підтримувані рідинні мембрани, емульсійні рідинні мембрани, полімерні інклюзійні мембрани. Застосування рідинних мембран у очищенні стічних вод.....	149
5.3 Мембранна дистиляція .....	153
5.4 Мембранний біореактор .....	157
5.5 Фотокаталітичний мембранний реактор.....	165
5.6 Біоміметичні мембранні реактори для виробництва водню .....	171
5.7 Останні досягнення в галузі полімерних та керамічних мембран для очищення води.....	180
<u>Розділ 6. Кейси екологічного застосування мембранних технологій .....</u>	<u>186</u>
6.1 Планування та проектування екологічних мембранних систем для водопідготовки .....	186
6.2 Мембранні технології для очищення та повторного використання води в харчовій промисловості та виробництві напоїв .....	189
6.3 Мембранні технології для очищення та повторного використання води у целюлозно-паперовій промисловості.....	195
6.4 Мембранні технології для очищення та повторного використання води в енергетиці, в газовій та нафтохімічній промисловості.....	205
6.5 Мембранні технології для очищення та повторного використання води в текстильній промисловості.....	215
<u>Список посилань .....</u>	<u>220</u>

## **ВСТУП**

Сучасний технологічний розвиток промисловості, а також темпи споживання ресурсів людиною, призвели до безпрецедентних екологічних викликів, і мембранні технології виступають як ключовий елемент у вирішенні цих проблем, пропонуючи ефективні та стійкі рішення для очищення води, повітря та інших ресурсів.

Мембрани зайняли важливе місце в хімічній технології і використовуються для широкого спектру застосувань. Ключовою властивістю, яка використовується, є здатність мембрани контролювати швидкість проникнення хімічної речовини через мембрану.

В навчальному посібнику розглянуто основні принципи мембранних процесів, від традиційних методів до найсучасніших інноваційних розробок. Зокрема увагу зосереджено для різних типів мембран, їхнім матеріалам, структурі, механізмам функціонування, а також технологічним аспектам їх використання. Крім того, особливу увагу приділено застосуванню цих технологій у різних екологічних сферах, включаючи обробку стічних вод, відновлення ресурсів та зниження викидів забруднюючих речовин.