

ЕЛЕКТРОЛІЗНЕ КОНЦЕНТРУВАННЯ ТРИТІЮ У РІДКИХ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДАХ: ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ NAFION 115

О. В. Коваленко¹, О. О. Кряжич²

¹Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна

Ключовим етапом у детритизації води, яка незамінна у ядерних системах на зразок ITER чи CANDU, є концентрування тритію. Використовуючи твердополімерні електроліти (ТПЕ), вдається уникнути проблем із корозією, притаманною лужним системам, забезпечуючи водночас вищу ефективність розділення ізоотопів Н/Т при компактніших розмірах обладнання [1, 2].

Відомо, що фізичні властивості мембрани в лужному електролізері стабільні при γ дозі опромінення 1,3 MGy (еквівалент 15 А, опромінюваному у воді з тритієм при $6,7 \times 10^{12}$ Бк/л), а після 18 місяців опромінення у воді, що містить тритій, при $2,96 \times 10^{12}$ Бк/л, [3].

Під час роботи з малими об'ємами РРВ (у рамках дослідження та моделювання визначено об'єм у 10 л) основну увагу варто приділити не стільки енергозатратам, скільки скороченню залишкового об'єму системи та підвищенню коефіцієнта розділення ізоотопів Н/Т.

Для об'єму 10 літрів найоптимальнішим варіантом є застосування одно- чи двокоміркових ТПЕ-електролізерів, які мають активну площу мембрани Nafion 115 у межах 25–50 см². Для виготовлення анодних пластин застосовується титан із покриттям IrO₂, який забезпечує високу корозійну стійкість. Катодні пластини виготовляються з графіту або нержавіючої сталі, вкритих платиновим каталізатором [4].

Робочий принцип і структура резервуара електролізера ТПЕ показані на рис. 1. Між катодам та анодом розташована мембрана обміну протонів, через яку пропускає лише Н⁺, а Н⁺, утворений анодом, потрапляє в катод через мембрану обміну протонами для реакції.

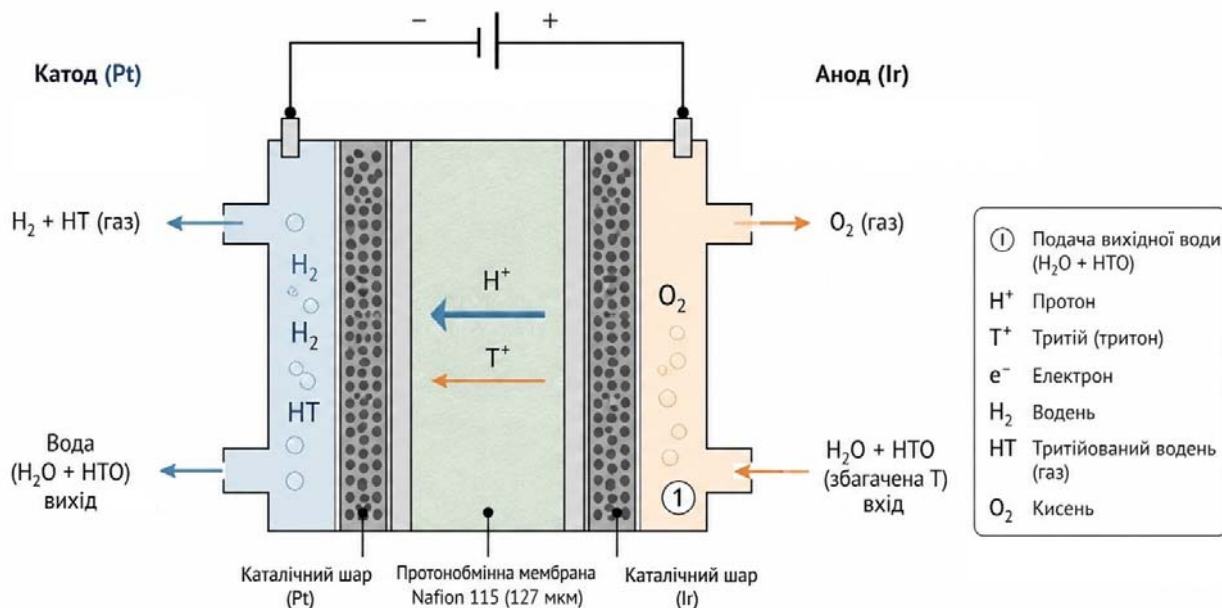


Рис. 1. Схематичне зображення протон-обмінного мембранного електролізера з мембраною Nafion 115 для розділення ізоотопів водню.

Мембранно-електродний вузол включає каталітичні шари на основі Pt (катод) та IrO₂ (анод), газодифузійні шари та біполярні пластини. В анодній камері відбувається електроліз води (Н₂О/НТО) з утворенням Н⁺ і Т⁺, які транспортуються через мембрану до катода, де відновлюються до Н₂ та НТ. Різниця у рухливості іонів забезпечує ізоотопне розділення і накопичення тритію.

Оптимального результату вдається досягти під час використання рециркуляційного режиму. Вихідний об'єм у 10 літрів проходить постійну циркуляцію через анодний відсік до тих пір, доки об'єм не скоротиться до 100–200 мл. Це дозволяє здійснити концентрування тритію у 50–100 разів.

Для об'єму 10 л значна кількість тепла, що утворюється під час електролізу, може швидко спричинити перевищення критичної температури близько 80 °С. Запропоновано інтегрувати мікроканалні системи охолодження безпосередньо в структуру біполярних пластин електролізера. Це рішення дає змогу підтримувати робочу температуру на рівні приблизно 30 °С, де коефіцієнт розділення S досягає максимального значення.

Для початкової активності тритію A_0 в об'ємі 10 л системи на основі Nafion 115/Pt буде мати такі параметри:

Розрахункові параметри процесу концентрування (10 л)

Параметр	Розрахункове значення	Примітка
Струм електролізу, А	30-85	Залежить від часу переробки
Напруга на комірці, В	1,8-2,2	
Тривалість процесу, год	48-72	До досягнення ~90% конверсії
Теплове виділення	≈ 40-60 Вт	при 84 А
Кінцевий об'єм концентрату, мл	200-500	Залежить від конструкції
Вихід газів ($H_2 + O_2$)	≈ 62 л/год	
Завантаження платини	0,5-1,0 мг/см ²	
Коефіцієнт розділення S	6,2-6,8	При температурі 25 °С

У процесі переробки такого обсягу води утворюється велика кількість водню (приблизно 6000 л H_2), тому необхідно обладнати систему мікрорекомбінатором для перетворення водню на воду або його безпечного виведення через вентиляцію. Аналіз оптимальних режимів роботи електролізера демонструє, що сила струму має становити $I=81,1$ А. При цьому, враховуючи щільність струму 1,5 А/см², площа активної мембрани дорівнюватиме близько 56 см². Для розкладання 1 л води теоретично необхідно близько 2974 А·год електроенергії.

При зменшенні об'єму у 20 разів ($V/V_0 = 0,05$) активність тритію в концентраті зростає приблизно у 12,1 раза, тоді як частина тритію переходить у газову фазу у вигляді ізотополога.

Подальші дослідження будуть спрямовані на підвищення радіаційної стійкості матеріалів, створення нанокомпозитних мембран типу Nafion/SiO₂, Nafion/графен [5].

1. G. Tejera, E. Teliz, V. Díaz. Memorias del VIII Congreso Regional de Ingeniería Química (Montevideo: Universidad de la República, 2025) 12.
2. Y. Iwai, T. Yamanishi, M. Nishi, et al. Journal of Nuclear Science and Technology (Tokyo: Taylor & Francis, 2005) 637.
3. J. M. Miller. Fusion Science and Technology (La Grange Park: American Nuclear Society, 2008) 326.
4. J.-D. Kim, A. Ohira. Membranes, MDPI, 2021, Vol. 11, Iss. 5, 330.
5. J. Smith, L. Tanaka, M. Rossi. ResearchGate (Berlin: ResearchGate GmbH, 2024) p. 3404.