

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Хіміко-технологічний факультет

Кафедра технології неорганічних речовин та загальної хімічної технології

«На правах рукопису»

УДК 54.084

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності _____

(код і назва)

на тему: *«Змішані іон-сольватовані електроліт-полімерні мембрани для електродів»*

Виконав (-ла): студентка 6 курсу, групи ХН-51м

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2017 року

Національний технічний університет України

**«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) _____
(повна назва)

Кафедра _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації _____

_____ ,

науковий керівник дисертації _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження _____

4. Предмет дослідження _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити _____

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Реферат

Пояснювальна записка: 93 стор., 48 рис., 39 табл., 29 бібл.

Електроліз води є перспективним підходом отримання водню з поновлюваних джерел енергії вільних від CO₂. Розробка та вдосконалення мембран є одним із пріоритетів для АЕМВЕ. Нещодавно, іонн-сольватовані полімерні електроліти або мембрани леговані електролітом стали предметом інтересу, так як вони можуть забезпечити високу провідність при збереженні маленької товщини сепаратору.

У цій роботі, суміші полібензімідазола (PBI) і FAA-3 іономера (з якого можуть бути відлиті аніонообмінні мембрани) були підготовлені для подальшого легування електролітом і тестування. При змішуванні механічно й хімічно стабільного PBI та FAA-3 іономеру з задовільною провідністю, було створено новий тип іонн-сольватованих мембран з поліпшеною іонною провідністю і стійкістю.

Проаналізовано характеристики іонн-сольватованих мембран. Результати механічних випробувань показали збільшення міцності на розриві до 40% в залежності від концентрації електроліту в порівнянні зі звичайною PBI мембраною. Крім того, змішані мембрани виявилися значно стійкішими до лужного середовища. Результати показали, що провідність нових мембран має більш високі значення при більш низьких концентраціях електроліту. Також, була досягнена одна з найвищих початкових продуктивностей у дослідженнях для АЕМВЕ, - 475 мА/см² при 1.8 В.

ВОДЕНЬ, ЕЛЕКТРОЛІЗ, МЕМБРАНА, АЕМВЕ, ІОННА СОЛЬВАТАЦІЯ, ПРОВІДНІСТЬ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, ХІМІЧНА СТАБІЛЬНІСТЬ, МЕХАНІЧНА СТАБІЛЬНІСТЬ, ГІДРОКСИД КАЛІЮ, ГЕРМЕТИЧНІСТЬ

1 Лужні та засновані на використанні мембран електролізери

Таким чином, приділяється все більше уваги до електролізу води в якості стійкого ресурсу водню [1, 2]. Найбільш розповсюдженими та вивченими за останні десятиліття вважаються прості лужні електролізери [3].

Принцип лужного електролізу води схематично показано на рисунку 1.1. Чотири молекули води перетворюється в дві молекули водню і чотири гідроксид-іонів на катоді. Водень відривається від поверхні катода у вигляді бульбашок газу, а гідроксид-іони мігрують під впливом електричного поля від катода до анода через пористу мембрану, де вони перетворюються в одну молекулу кисню, що відривається від поверхні аноду у вигляді бульбашок, і дві молекули води [4].

Рисунок 1.1 - Схематичне зображення лужного електролізу води

Як правило, електроліт - це висококонцентрований розчин гідроксиду калію (наприклад, 25-30 мас.% розчин КОН [5]) , який може бути досить корозійні для системи. Переваги використання такого роду систем включають в себе просту і добре відпрацьовану технологію, низьку вартість установки й використання каталізатора з недорогих металів. Однак, звичайно, існує ряд серйозних недоліків таких як кросовер при частковому навантаженні, викликаний накопиченням водню в кисні і низькою щільністю струму [6]. Крім того, як недолік, можна відзначити вплив CO_2 газу, який може бути поглинений з повітря, та випадіння його в осад у вигляді карбонату в порах каталізатора. Блокування порового простору може призвести до зниження продуктивності системи лужного електролізу води.

Щоб подолати недоліки лужного електролізу води, було винайдено привабливе рішення, яке базоване на використанні полімер- електролітної мембрани у системи електролізу води. Такий тип систем інтенсивно досліджувався протягом останніх декількох десятиліть. Є два типи полімерних електролітів: протон і аніон-обмінні мембрани.

У 1960-х роках General Electric розробили першу установку електролізу води з використанням протон-обмінної мембрани (РЕМ) у системі. Принцип РЕМ електролізу води схематично показано на рисунку 1.2.

Рисунок 1.2 - Схематичне зображення РЕМ електролізу води

Електроліз води заснований на протон-обмінній мембрані у якості полімерного електроліту базується на поданні напруги крізь термінали електролізера, яка розщеплює дві молекули води в одну молекулу кисню, чотири протони і чотири електрони на аноді. Протони мігрують через мембранний сепаратор до катоду, де чотири протона і чотири електрона в сукупності утворюють дві молекули водню, який відривається від поверхні у вигляді газу.

Очевидна перевага цієї системи - це значно зменшена відстань між катодом і анодом, що робить установку електролізу води з РЕМ більш компактною. Щільна природа мембрани забезпечує надійний газовий бар'єр в камері. Крім того, високі щільності струму і напруга високої ефективності забезпечують вищу продуктивність комірки. Тим не менше, як і в класичному лужному електролізі води, система РЕМ має серію недоліків. Домішки, присутні у воді для живлення системи або вулечені з комірки заміщені протони в мембранному сепараторі, знижують її провідність. Кисле середовище системи може бути вельми агресивне для неї. Висока вартість

компонентів, в зв'язку з використанням каталізаторів на основі благородних металів, без жодної альтернативи, робить РЕМ електроліз економічно не вигідним [6].

Другий тип мембранного електролізу води є електроліз води з використанням аніон-обмінної мембрани, схема якого представлена на рисунку 1.3. Цей тип системи був вперше описаний в 2012 році Nickner і співавторами [7].

Рисунок 1.3 - Схематичне зображення АЕМ електролізу

Електроліз води з використанням аніон-обмінної мембрани у якості полімер-електроліту заснований на поданні напруги на термінали електролізера, яка перетворює чотири молекули води на дві молекули водню і чотири гідроксид-іони на катоді. Водень відривається від поверхні катода у вигляді газу і гідроксид-іони мігрують під впливом електричного поля від катода до анода через мембранний сепаратор, де вони перетворюються в одну молекулу кисню і дві молекули води.

Переваги цього нового рішення виробництва водню частково співпадають з РЕМ електролізерами. Компактність системи не порушена, що викликано використанням тонкої мембрани. Крім того, низька лужність води для живлення не тільки знижує ризик корозії системи в порівнянні з традиційною коміркою лужного електролізу води, але і дозволяє використовувати неблагородні метали у якості каталізаторів, що значно знижує загальну вартість системи. Незважаючи на переваги АЕМ електролізерів, на жаль, не вдалося запобігти певних недоліків, таких як низька продуктивність і довговічність у порівнянні з іншими системами.

1.1 Мембрани для електролізу води

Як правило, протягом дуже довгого часу, хризотил використовувався в якості матеріалу-сепаратора для лужних систем електролізу води. Після заборони в деяких країнах і уникнення використання в інших, азбест був успішно замінений поліфеніленсульфід (PPS) тканиною. Ця альтернатива значно зменшила ризик для здоров'я та проблеми з якістю, але все ж, вона має кілька великих недоліків, таких як занадто великий розмір пір і занадто висока товщина, що обумовлює високу проникність.

Не так давно, для лужного електролізу води був розроблений новий вид матеріалу, який в даний час використовується в промисловому масштабі - ZIRFONE[®] композитний сепаратор. Цей тип сепаратора складається з пористої плівки полісульфону і цирконію (II) оксиду (Zr_2O), і пропонує в два рази зменшену товщину в порівнянні з PPS тканиною [8]. ZIRFONE[®] композитна діафрагма пропонує високу хімічну стабільність в лужних середовищах і низький іонний опір, що призводить до підвищення продуктивності системи.

Для PEM електролізу води, велика кількість протон-обмінних мембран є комерційно доступною, як наприклад найчастіше використовувані мембрани Nafion[®]-типу, а також інші PEM матеріали, такі як полібензімідазоли (PBI) і їх похідні. Мембрани, що використовуються в PEM електролізерах, повинні мати відмінну протонну провідність. Механічна міцність полімерного сепаратора має бути достатньою також.

Компанія E. I. DuPont є виробником і розробником Nafion[®] іономірів. Хімічна структура Nafion[®], сульфоновий тетрафторетилен фторполімерний-кополімер, показана на рисунку 1.4. В даний час Nafion[®] застосовуються в PEM електролізерах води як полімерний електроліт, але через його вартість рідко використовується в великомасштабних операціях.

Рисунок 1.4 - Структура Nafion®

1.2 Аніонообмінні мембрани

Стан аніонообмінних мембран для електролізу води помітно покращився за останні кілька років. Дослідницькі сили в цій галузі активно зосереджені на розробці механічної і хімічної стабільності матеріалів, а також на провідних властивостях [9].

Як правило, матеріали на основі полістиролу, полі(ефір ефір кетону) (PEEK) і полісульфону вивчаються в даний час. Протягом багатьох років, Udel® полісульфон і Radel® полісульфон від компанії Solvay зарекомендували себе в якості гарного вихідного полімерного матеріалу для подальшої функціоналізації третинними амінами і використанням у електролізерах АЕМ. Структури амінірованих Udel® і Radel® полісульфону показані на рисунках 1.5 та 1.6, відповідно.

Рисунок 1.5 - Амінований Udel® полісульфон

Рисунок 1.6 - Амінований Radel® полісульфон

1.2.1 Властивості і недоліки

Незважаючи на багато переваг, АЕМ мають певні недоліки, які повинні бути більш детально вивчені. Іонообмінні мембрани Гідроксид-іонн-обмінні мембрани набагато менш хімічно стабільні, ніж протон-обмінні мембрани для електролізу води, особливо під впливом температури. Крім того, чутливість до CO_2 у гідроксидній формі є важливою проблемою, у якої немає шляху вирішення на даний час [10]. Відомі декілька типів деградаційних механізмів четвертинного амонію у функціоналізованих мембранах, як для найчастіше

використовуваних АЕМ [11]. Оскільки ці катіони легко деградують під дією високого рН та при високій температурі, є два основних шляхи розкладу: усунення і деградації, як показано на рисунку 1.7.

Рисунок 1.7 - Основні шляхи деградації групи четвертинного амонію в лужному середовищі при високій температурі: 1 – реакція елімінування, 2, 3 – реакції нуклеофільного заміщення

Існують принаймні три способи забезпечення аніонної провідності для полімерної мембрани [9]. Перший зі способів – це пориста мембрана з порами, заповненими водним розчином лугу (переважно КОН), що нагадує фіброзні розділові матеріали з азбесту, використовуваного в традиційних електролізерах. Основними вимогами є хімічна стабільність і висока змочуваність. Недоліком такої системи є те, що мембрана повинна мати значну товщину, щоб забезпечити розподіл газу і це призводить до збільшення опору.

Аніон-обмінні мембрани з катіонними бічними ланцюгами (еквівалентні до протонопровідних перфторсульфонових кислот, наприклад як Nafion, з аніонними бічними ланцюгами). Бічні ланцюги утворюють гідрофільні канали з високою іонною силою, яка є основою для іонної провідності. У електролізерах з протонно-обмінною мембраною (РЕМ) так само як і в паливних елементах з РЕМ мембрани показують високу ефективність, але для таких самих аніон-обмінних мембран аналогічна провідність ще не була продемонстрована. Перевага системи з іонообмінною мембраною полягає в

тому, що не потрібно додавання лугу (або кислоти) в систему, так як рухомі іони вже містяться і надійно закріплені в мембрані.

Можливістю номер три є введення гідроксиду калію в матеріал мембрани. Ця система може бути зрозумілою як проміжна між структурою перших двох способів забезпечення провідності.

1.3 Іон-сольватовані мембрани

Систему, що згадана вище, можна назвати іон-сольватованою або електроліт-легованою, бо вона має введенний КОН у вигляді водного розчину лугу розчиненого безпосередньо всередині мембрани. Гідроксид калію забезпечує провідність як і в пористій мембрані, але так як не існує жодної реальної поруватості, то ризик газового кросовера менше й тонша мембрана може бути застосована. Мембрана, таким чином, щільно прилягає до електроду, що є спільним з тонкою іонообмінною мембраною. До того ж вона може мати кислотні центри, які полегшать розчинність КОН, але ці функціональні групи не розташовані таким чином, щоб утворювати гідрофільні домени для достатньої іонної провідності і, отже, вільний водний розчин лугу повинен бути доданий в систему. Схематичне зображення цієї системи в порівнянні з іншими представлено на рисунку 1.8.

Рисунок 1.8 - Три типу систем мембран з аніонною провідністю: 1) мембрани з великими порами, заповнених розчином електроліту; 2) аніонообмінні мембрани; 3) іонн-сольватовані мембрани

Існує ряд робіт виконаних Департаментом перетворення і зберігання енергії у Технічному Університеті Данії, присвячене іон-сольватованим

мембранам на основі полібензімідазолу і їх характеристикам [12 - 15], а також більш ранні роботи Xing і Savado [16].

Через наявність високої механічної стабільності і хіміко-термічної міцності, полібензімідазоли - це ще один варіант для АЕМ електролізу води. PBI сам по собі не є аніон-обмінною мембраною сам по собі. Це ізолятор, який може бути оброблений кислотою або лугом для використання у електролізері. Хімічна назва meta-PBI (так як фенілен кільце мета-скоординоване) являє собою полі-2,2-м-(фенілен)-5,5-бібензімідазол і його структура показана на рисунку 1.9.

Рисунок 1.9 - Структура mPBI (полі-2,2-м-(фенілен)-5,5-бібензімідазол)

Так як mPBI має амфотерний характер, матеріал може бути депротонованою і протонований в лузі й кислому середовищі, відповідно , як це показано на рисунку 1.10.

Рисунок 1.10 - Схеми перетворення mPBI в кислому (зліва) і лужному (праворуч) середовищі [14]

Комерційна форма mPBI може бути легована в розчині гідроксиду лужного металу, щоб сформувати систему, яка складається з солі і води, розчинених у тілі полімеру. Так як константа дисоціації для імідазолу складає $pK_b \approx 7$, а гідроксид калію становить $pK_b \approx 0,5$, то КОН є більш сильною основою, яка може легко втрутитись у структуру бензімідазолу. У результаті легування отримують полібензімідазоліт калію як одну з форм mPBI, хімічна структура якого показана на рисунку 1.11.

Рисунок 1.11 - Схема mPBI із депротонованими бензимидазолами в розчині лугу

1.3.1 Властивості і недоліки

Введений у мембрану гідроксид калію забезпечує провідність, аналогічну провідності сепараторів з великими порами, що заповнені розчином лугу. Тим не менше, ймовірність газового кросовера значно знижується через відсутність реальних пір. Крім того, товщина сепаратора не є проблемою, так як більш тонкі мембрани можуть бути використані, в чому є схожість до аніонообмінних мембран.

В якості недоліку необхідно зазначити можливу лужну деградацію іон-сольватованого полімера, так як легування залежить від концентрації водного розчину гідроксиду калію і, отже, вимагає високої концентрації КОН. Крім того, проблема довговічності була зазначена в процесі електролізу води [17]. Можлива схема деградації показана на рисунку 1.12.

Крім того, не слід забувати, про можливість впливу поглиненого з повітря CO_2 , що може дещо зменшити провідність цієї системи.

Рисунок 1.12 - Імовірна схема деградації лужного імідазолу

ВИСНОВКИ

Досліджено леговані гідроксидом калію змішані мембрани на основі полібензімідазола (mPBI) і комерційно доступної аніонообмінної мембрани (FAA3i) в якості нового підходу для іон-сольватованих полімер електролітних мембран для застосування у електролізі води.

Всі спроби безпосереднього змішування цих матеріали були провальними. Скоріш за все, FAA-3i містить деякі непрореаговані групи бромметилу, які повинні бути вилучені шляхом реакції з триметиламіном, перш ніж розчини FAA-3i і mPBI можуть бути змішані. Без реакції з ТМА, mPBI, ймовірно, вступає в реакцію з FAA-3i, утворюючи нерозчинний гель хімічно кросслінкованого полімеру. Більшість змішаних мембран показали більш високу міцність на розриві і модуль Юнга, ніж mPBI. Найвищі значення були отримані при mPBI і FAA-3i змішаних у співвідношенні 4:1. В цілому, додавання АЕМ зменшує еластичність мембран і робить їх більш жорсткими. mPBI легований у КОН показує найвищу провідність при зануренні в 25 мас.% розчин КОН. В той час як, додавання FAA-3i збільшує іонну провідність при більш низьких лужних концентраціях, що є більш вигідним для системи.

Змішані мембрани показали значне покращення лужної стабільності. Навіть після зберігання протягом одного місяця в 25 мас.% розчині КОН при температурі 85 °C, 3:1 mPBI/FAA3i мембрана показує аналогічну міцність на розриві, як і mPBI перед випробуванням на стабільність. Мембрана FAA-3i була знищена вже після декількох днів.

В електролізері, 3:1 mPBI/FAA3i мембрана показала первісну продуктивність 475 мА/см² при 1,8 В, яка є вищою, ніж повідомлялося раніше у АЕМ електролізерах [5]. У зв'язку із затопленням катодного простору, щільність струму зменшується до тих пір, доки сягає значення 250 мА/см².

Таким чином, mPBI/FAA3i змішані мембрани показали поліпшену провідність при низьких концентраціях розчину легування, сильно підвищену лужну стабільність і хорошу продуктивність в електролізері.

Посилання

1. S. Dunn Hydrogen futures: toward a sustainable energy system *Int. J. Hydrog. Energy*, 27 (2002), pp. 235–264
2. I.P. Jain Hydrogen the fuel for 21st century *Int. J. Hydrog. Energy*, 34 (2009), pp. 7368–7378
3. L. Gandia, R. Oroz, A. Ursua. (2007) “Renewable hydrogen production: performance of an alkaline water electrolyzer working under emulated wind conditions.” *Energy Fuels* 21, pp. 1699-1706.
4. A. Ursua, L.M. Gandia, P. Sanchis Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends *Proc. IEEE*, 100 (2012), pp. 410–426
5. M. Bodner, A. Hofer, and V. Hacker. (2015) “H₂ generation from alkaline electrolyzer.” *WIREs Energy Environ* 4, pp. 365-381.
6. M. Carmo, D. L. Fritz, J. Mergel, D. Stolten. (2013) “A comprehensive review on PEM water electrolysis.” *International Journal of Hydrogen Energy* 38, pp. 4901-4934.
7. Y. Leng, G. Chen, A. J. Mendoza, T. B. Tighe, M. A. Hickner, C. Wang. (2012) “Solid-State Water Electrolysis with an Alkaline Membrane.” *Journal of the American Chemical Society* 134, pp. 9054–9057.
8. Ph. Vermeiren, W. Adriansens, J. P. Moreels, R. Leysen. (1998) “Evaluation of the Zirfon® separator for use in alkaline water electrolysis and Ni-H₂ batteries.” *International Journal of Hydrogen Energy* 23(5), pp. 321-324.

9. J. Donald Joe, D. B. Siva Kumar, P. Sivakumar. (2014) "Production of Hydrogen by Anion Exchange Membrane Using AWE." *International Journal of Scientific & Technology Research* 3 (6), pp. 38-42.
10. J. R. Varcoe, P. Atanassov, D. R. Dekel, A. M. Herring, M. A. Hickner, P. A. Kohl, A. R. Kucernak, W. E. Mustain, K. Nijmeijer, K. Scott, T. Xu and L. Zhuang. (2014) "Anion-exchange membranes in electrochemical energy systems." *Energy & Environmental Science* 7, pp. 3135-3191.
11. G. Couture, A. Alaaeddine, F. Boschet, B. Ameduri. (2011) "Polymeric materials as anion exchange membranes for alkaline fuel cells." *Progress in Polymer Science* 36, pp. 1521-1557.
12. J. O. Jensen, D. Aili, M. K. Hansen, Q. Li, N. J. Bjerrum and E. Christensen. (2014) "A stability study of alkali doped PBI membranes for alkaline electrolyser cell." *ECS Transactions* 64(3), pp. 1175-1184.
13. D. Aili, A. G. Wright, M. Rykaer Kraglund, K. Jankova, S. Holdcroft, J. O. Jensen. (2017) "Towards a stable ion-solvating polymer electrolyte for advanced alkaline water electrolysis." *Journal of Materials Chemistry A*, 5, pp. 5055-5066.
14. D. Aili, K. Jankova, J. Han, N. J. Bjerrum, J. O. Jensen, Qingfeng Li. (2016) "Understanding ternary poly(potassium benzimidazole)-based polymer electrolytes." *Polymer* 84, pp. 304-310.
15. M. Rykaer Kraglund, D. Aili, K. Jankova, E. Christensen, Q. Li, J. O. Jensen. (2016) "Zero-gap alkaline water electrolysis using ion-solvating polymer electrolyte membranes at reduced KOH concentrations." *Journal of the Electrochemical Society* 163(11), pp. 3125-3131.

16. B. Xing, O. Savadogo. (2000) "Hydrogen/oxygen polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) based on alkaline-doped polybenzimidazole (PBI)." *Electrochemistry Communications* 2 (10), pp. 697-702.
17. M. Paidar, V. Fateev, K. Bouzek. (2016) "Membrane electrolysis – History, current status and perspective." *Electrochimica Acta* 209, pp. 737-756.
18. Q. K. Dang, D. Henkensmeier, N. N. Krishnan, J. H. Jang, H.J. Kim, S. W. Nam, T. H. Lim. (2014) "Nafion membranes with a porous surface." *Journal of Membrane Science* 460, pp. 199-205.
19. W. Germer, J. Leppin, C. N. Kirchner, H. Cho, H. J. Kim, D. Henkensmeier, K. Y. Lee, M. Brela, A. Michalak, A. Dyck. (2015) "Phase separated methylated polybenzimidazole (O-PBI) based anion exchange membranes." *Macromolecular Materials and Engineering* 300 (5), pp. 497-509.
20. Q. Li, D. Aili, H. A. Hjuler, J. O. Jensen (2015) "High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Approaches, Status, and Perspectives." Springer, 2015, 545 pages.
21. X. Luo, S. Holdcroft. (2016) "Water transport through short side chain perfluorosulfonic acid ionomer membranes." *Journal of Membrane Science* 520, pp. 155-165. [19] S. Kazemi, M. Mohseni and K. Fatih. (2016) "A Systematic Study of Separators in Air-Breathing Flat-Plate Microbial Fuel Cells—Part 1: Structure, Properties, and Performance Correlations." *Energies* 9(2):78, pp. 1-18.
22. M. G. Marino, J. P. Melchior, A. Wohlfarth, K. D. Kreuer. (2014) "Hydroxide, halide and water transport in a model anion exchange membrane." *Journal of Membrane Science* 464, pp. 61-71.

23. T. P. Pandey, H. N. Sarode, Yatig Yang, Yuan Yang, K. Vezz, V. D. Noto, S. Seifert, D. M. Knauss, M. W. Liberatore, and A. M. Herringa. (2016) “A Highly Hydroxide Conductive, Chemically Stable Anion Exchange Membrane, Poly(2,6 dimethyl 1,4 phenylene oxide)-*b*-Poly(vinyl benzyl trimethyl ammonium), for Electrochemical Applications.” *Journal of the Electrochemical Society* 163(7), pp. H513-H520.
24. Бланк, С. Стартап. Настольная книга основателя / С. Бланк, Б. Дорф ; пер. с англ. Т. Гутман, И. Окунькова, Е. Бакушева. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2014. – 614 с.
25. Дрейпер, У. Стартапы : профессиональные игры Кремниевой долины / У. Дрейпер ; предисл. Э. Шмидта ; пер. с англ. В. Егорова. – Москва : Эксмо, 2012. – 378 с.
26. Коэн, Д. Стартап в Сети : мастер-классы успешных предпринимателей / Д. Коэн, Б. Фелд ; пер. с англ. М. Иутина. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2013. – 337 с.
27. Маллинс, Дж. Поиск бизнес-модели : как спасти стартап, вовремя сменив план / Дж. Маллинс, Р. Комисар ; пер. с англ. М. Пуксант и Е. Бакушевой. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2012. – 329 с.
28. Тиль, П. От нуля к единице : как создать стартап, который изменит будущее / П. Тиль, Б. Мастерс; перевод с англ. – Москва : Альпина паблишер, 2015. – 188 с.
29. Харниш, В. Правила прибыльных стартапов : как расти и зарабатывать деньги / В. Харниш ; пер. с англ. В. Хозинского. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2012. – 279 с.