

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій,
мехатроніки і робототехніки
Кафедра механічної інженерії та автомобільного транспорту

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
освітнього ступеня
магістр

Галузь знань 27 – «Транспорт»
Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт»

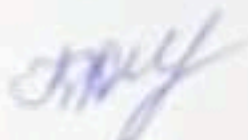
на тему: «Удосконалення стеку паливних комірок для автомобіля на водні»

Виконав: студент групи ААГ-22м



Дмитрій МОХОРТ

Керівник:



Руслана КОЛОДНИЦЬКА

Завідувач кафедри:



Олександр МЕЛЬНИК

Рецензент:



Дмитро БЕГЕРСЬКИЙ

Житомир – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет: комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра: механічної інженерії та автомобільного транспорту
Освітній ступінь: «магістр»
Галузь знань: 27 «Транспорт»
Спеціальність: 274 – Автомобільний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МІ та АТ

Олександр МЕЛЬНИК

« 06 » 10 2025р.

ЗАВДАННЯ

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня магістр
Мохорт Дмитрій Віталійович

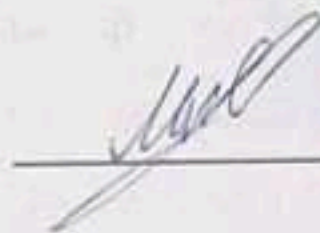
1. Тема роботи: «Удосконалення стеку паливних комірок для автомобіля на водні» затверджена наказом вищого навчального закладу від « 6 » листопада 2025 року № 569-С
Керівник роботи: к.т.н., Руслана КОЛОДНИЦЬКА
2. Строк подання студентом завершеної роботи 05.12.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: нормативно-правові документи, веб-ресурси, наукові літературні джерела.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Автомобілі з паливними комірками на водні. 2. Паливні комірки з протонно обмінною мембраною. 3. Конструкція поля потоку. 4. Проектування поля потоку паливної комірки в програмному середовищі SolidWorks. Загальні висновки та практичні рекомендації. Список використаних джерел. Додатки.
5. Презентація – 10 слайдів.

Дата видачі завдання « 06 » 10 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

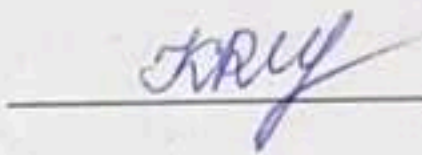
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Дослідження літературних джерел відносно водневих технологій в світі та Україні	25.09.2025	
2.	Дослідження наукових статей паливних комірок на водню	25.10.2025	
3.	Проектування запропонованої форми поля потоку	20.11.2025	
4.	Порівняння різних форм поля потоку	28.11.2025	
5.	Оформлення пояснювальної записки	29.11.2025	
6.	Рецензування	01.12.2025	
7.	Попередній захист	04.12.2025	
8.	Захист	11.12-31.12.2025	

Студент



Дмитрій МОХОРТ

Керівник роботи



Руслана КОЛОДНИЦЬКА

Анотація

Магістерської роботи на тему: «Удосконалення стеку паливних комірок для автомобіля на водні», виконаної студентом групи ААГ-22м, факультету комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки державного університету «Житомирська політехніка» Мохортом Дмитрієм Віталійовичем під керівництвом к.т.н., доц. Колодницької Р.В.

У процесі виконання магістерської роботи було досягнуто основної мети, а саме аналіз та оптимізації геометрії біполярних пластин катодної сторони, які визначають рівномірність розподілу повітря, тепловий режим та гідравлічні характеристики паливної комірки.

У роботі виконано аналітичний огляд сучасних конструкцій стеків паливних комірок, зокрема фрактальних та симетричних схем проточних каналів. Запропоновано модифіковану форму проточного поля біполярних пластин, що дозволяє скоротити довжину шляху повітря та зменшити місцеві й лінійні гідравлічні втрати. Для оцінювання ефективності запропонованих рішень застосовано теоретичні методи гідродинамічного аналізу.

В роботі проведено аналіз різних конфігурацій проточних каналів за показниками втрат тиску, прохідності та рівномірності розподілу реагентів. Отримані результати свідчать, що удосконалена геометрія паливної комірки забезпечує зниження втрат тиску в катодному тракті та потенційне зменшення енергоспоживання допоміжних систем автомобіля на водні. Практична цінність роботи полягає у можливості використання отриманих результатів під час проектування та оптимізації паливних комірок транспортного призначення.

Ключові слова: автомобіль з паливними комірками на водні, паливна комірка, мембрана, каталітичні шари, газодифузійні шари, мембрано-електродний блок, поле потоку, водень, кисень.

Зміст

Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1	9
Автомобілі з паливними комітками на водні.....	9
1.1 Актуальність водневих технологій.....	9
1.2 Порівняння з традиційними видами транспорту	10
1.3 Місце паливних коміток у сучасній автомобільній індустрії	11
1.4 Принцип роботи паливної комітки.....	13
1.5 Конструкція водневого автомобіля	16
1.6 Типи паливних коміток	18
1.7 Переваги та недоліки і обмеження автомобілів на водневих паливних комітках.....	20
1.8 Виробництво та зберігання водню	23
1.9 Світовий досвід впровадження	24
Висновки до розділу 1	27
РОЗДІЛ 2	28
Паливні комітки з протонно обмінною мембраною.....	28
2.1 Мембрано-електродний вузол (MEA).....	28
2.1.1 Типи MEA за конструкцією	28
2.1.2 Протонно-обмінна мембрана	29
2.1.3 Основні типи мембран	30
2.1.4 Каталітичні шари.....	32
2.1.5 Газодифузійні шари.....	36
2.2 Nafion і механізм переміщення.....	37
2.3 Переміщення та сорбція води	42
2.4 Розрахунки тиску пари.....	45
2.5 Розрахунок потоків води	46
2.6 Результати ефективного коефіцієнта дифузії Nafion-211	49
2.7 Вплив різниці відносної вологості	51
2.8 Вплив температури на мембрани Nafion 211	52
Висновки до розділу 2	54
Розділ 3.	55
Конструкція поля потоку.....	55
3.1 Конструкція поля потоку біполярних пластин.....	55

3.1.1 Паралельне та серпантинне поле потоку	55
3.1.2 Інтердигітальний дизайн.....	56
3.1.3 Біоінспіровані поля потоку.....	56
3.1.4 Інші конструкції в літературі	58
Висновки до розділу 3	62
РОЗДІЛ 4	63
Проектування поля потоку паливної комірки в програмному середовищі SolidWorks.....	63
4.1 Проектування поле потоку	63
4.2 Розрахунки та порівняння	71
Висновки до розділу 4	74
Висновки до роботи	75
Список використаних джерел	76
Додатки.....	82
Додаток А.....	83

Вступ

Перехід на чисті й відновлювані джерела енергії є одним із ключових напрямів глобального розвитку транспортного сектора. У зв'язку з посиленням екологічних норм, обмеженням викидів парникових газів та зростанням цін на викопне паливо, виникає необхідність у впровадженні альтернативних енергоносіїв і високоефективних енергетичних систем для автомобільного транспорту.

Паливні комірки на водні (водневі паливні елементи) пропонують значні переваги порівняно з традиційними двигунами внутрішнього згоряння та навіть електричними батареями. Вони забезпечують:

- високу ефективність перетворення енергії, значно вищу, ніж у ДВЗ;
- нульові викиди шкідливих речовин, оскільки єдиним продуктом реакції є вода;
- швидку “заправку” воднем, порівнянну з традиційним заповненням бака бензином чи дизелем;
- широкі перспективи використання у важкому та комерційному транспорті, де батареїні електромобілі мають обмеження через вагу й час зарядки.

Однак для широкого впровадження цієї технології потрібні технічні покращення, зокрема:

- підвищення питомої потужності та ефективності стеків паливних комірок, щоб зменшити масу та габарити системи;
- зниження вартості виробництва, що є однією з основних перешкод для комерціалізації;
- підвищення надійності та довговічності роботи у реальних умовах експлуатації;
- удосконалення терморегуляції та систем водного/газового менеджменту для стабільної роботи при різних навантаженнях.

Удосконалення стеку паливних комірок має важливе практичне значення, оскільки прямо впливає на конкурентоспроможність водневого транспорту на

ринку. Це дозволить збільшити пробіг автомобілів на одній “заправці”, знизити експлуатаційні витрати і наблизити водневі автомобілі до масового використання. Таким чином, обрана тема є своєчасною, науково та практично значущою, відповідає сучасним викликам у сфері екологічної безпеки і сталого розвитку транспорту.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення енергоефективності, надійності та експлуатаційних характеристик стеку паливних комірок водневого автомобіля шляхом удосконалення його конструкції та параметрів роботи з використанням методів теоретичного аналізу і комп’ютерного моделювання.

Об’єктом дослідження є енергетична система водневого автомобіля на основі паливних комірок.

Предметом дослідження є конструктивні, теплові, газодинамічні та електрохімічні процеси, що відбуваються у стеку паливних комірок автомобільного призначення.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі основні задачі:

- Провести аналітичний огляд сучасних технологій паливних комірок, що застосовуються у водневих автомобілях.
- Проаналізувати конструкцію та принцип роботи стеку паливних комірок у серійних водневих автомобілях.
- Дослідити вплив конструктивних параметрів стеку (геометрія каналів, матеріали мембран, біполярних пластин) на його енергетичні характеристики.

РОЗДІЛ 1

Автомобілі з паливними комірками на водні

1.1 Актуальність водневих технологій

Актуальність водневих технологій є надзвичайно високою і продовжує зростати в контексті глобального енергетичного переходу та декарбонізації економіки. Водень розглядається як ключовий універсальний енергоносіє, здатний вирішити проблеми викидів у секторах, які важко електрифікувати.

Ключові аспекти актуальності водневих технологій :

- Декарбонізація важкої промисловості: Водень може замінити викопне паливо у виробництві сталі, цементу та хімічних речовин, де пряме використання відновлюваної електроенергії є складним або неможливим.
- Транспорт: Водневі паливні елементи є перспективним рішенням для важкого транспорту (вантажівки, кораблі, авіація), забезпечуючи високу щільність енергії та швидку заправку, на відміну від акумуляторних батарей.
- Накопичення енергії: Водень діє як важливий буфер для зберігання надлишків електроенергії, виробленої з нестабільних відновлюваних джерел (сонце, вітер), протягом тривалого часу (тижні або місяці), що сприяє балансуванню електромереж.
- Енергетична безпека та гнучкість: Водень підвищує гнучкість енергосистеми, дозволяючи використовувати різноманітні джерела енергії для його виробництва (відновлювані, атомні) та застосовувати його в різних секторах економіки.
- Глобальна підтримка: Понад 60 урядів (включно з Європейським Союзом) вже прийняли або розробляють власні водневі стратегії, що свідчить про системний підхід до розвитку цієї галузі на найвищому рівні.

Виклики та перспективи

Незважаючи на значний потенціал, існують і виклики, зокрема:

- Витрати: Виробництво "зеленого" водню (за допомогою електролізу з використанням відновлюваної енергії) поки що дорожче, ніж "сірого" (з викопного палива).
- Інфраструктура: Потрібні значні інвестиції у створення інфраструктури для виробництва, транспортування та зберігання водню, зокрема мережі заправних станцій.

В Україні також активно обговорюються перспективи водневої енергетики, розробляються стратегії та меморандуми про співпрацю з ЄС, що відкриває можливості для створення водневого хабу. Отже, актуальність водневих технологій беззаперечна, і вони відіграватимуть вирішальну роль у формуванні сталої та низьковуглецевої енергетичної системи майбутнього.

1.2 Порівняння з традиційними видами транспорту

Порівняно з традиційними видами транспорту (з двигунами внутрішнього згоряння, що працюють на бензині або дизельному паливі), водневі технології мають низку суттєвих переваг, але також стикаються з певними викликами, головним чином пов'язаними з інфраструктурою та поточною вартістю.

Основні переваги водневого транспорту над традиційним :

- Нульові викиди: Найважливіша перевага полягає у відсутності шкідливих викидів під час роботи. Єдиним продуктом реакції в паливних елементах є вода (водяна пара), що робить їх екологічно чистими в експлуатації та сприяє покращенню якості повітря.
- Енергоефективність: Водневі паливні елементи перетворюють хімічну енергію безпосередньо в електричну з ефективністю близько 60%, що значно вище, ніж у традиційних бензинових або дизельних двигунів (20-30%).
- Швидкість заправки: Процес заправки водневого автомобіля займає всього 3-5 хвилин, що співмірності з часом заправки бензинового авто і набагато швидше, ніж зарядка більшості електромобілів (BEV).

- Запас ходу: Сучасні водневі автомобілі (наприклад, Hyundai Nexa) мають запас ходу, порівнянний із традиційними автомобілями з ДВЗ, часто перевищуючи 600 км на одному баку.
- Менші вимоги до обслуговування: Водневі автомобілі мають менше рухомих частин у системі паливних елементів, що потенційно може знизити витрати на обслуговування порівняно зі складними двигунами внутрішнього згоряння.

Основні виклики та недоліки (в порівнянні з традиційним транспортом) :

- Інфраструктура: Головна перешкода — вкрай обмежена мережа водневих заправних станцій. Це створює "тривогу діапазону" (range anxiety), подібну до тієї, що була у ранніх власників електромобілів, але з меншою кількістю альтернатив для заправки.
- Вартість: Початкова вартість водневих автомобілів, а також ціна самого водневого палива наразі значно вища, ніж у традиційних автомобілів.
- Виробництво водню: Хоча використання водню в автомобілі є чистим, 95% водню у світі сьогодні виробляється з природного газу (так званий "сірий" водень), процес якого супроводжується значними викидами CO₂. Екологічність водневого транспорту повністю залежить від використання "зеленого" водню, виробленого за допомогою відновлюваних джерел енергії.

Отже, водневий транспорт пропонує перспективну беземісійну альтернативу з високою зручністю використання (швидка заправка, великий запас ходу), але його широке впровадження стримується економічними факторами та відсутністю розвиненої інфраструктури.

1.3 Місце паливних комірок у сучасній автомобільній індустрії

Паливні комірки (або водневі паливні елементи) посідають нижче, але стратегічно важливе місце в сучасній автомобільній індустрії, виступаючи як доповнення, а не прямий конкурент для домінуючих сьогодні акумуляторних електромобілів (BEV).

Наразі автомобілі на паливних елементах (FCEV), такі як Toyota Mirai, Hyundai Nexo та Honda Clarity Fuel Cell займають дуже малу частку світового автомобільного ринку порівняно з автомобілями з двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) або акумуляторними електромобілями (BEV). Це пов'язано з кількома факторами:

- Домінування BEV: Акумуляторні електромобілі мають значну перевагу в комерціалізації, інфраструктурі зарядних станцій та кількості доступних моделей.
- Обмежена інфраструктура: Відсутність розгалуженої мережі водневих заправних станцій є головною перешкодою для масового впровадження FCEV.
- Висока вартість: Початкова вартість автомобілів на паливних елементах та виробництва "зеленого" водню залишається високою.

Стратегічна важливість та перспективи

Незважаючи на поточні виклики, паливні комірки розглядаються як ключова технологія для досягнення цілей декарбонізації, особливо в певних сегментах транспорту:

- Важкий та комерційний транспорт: Через вимоги до великого запасу ходу, швидкої заправки та ваги батарей, паливні елементи є ідеальним рішенням для вантажівок, автобусів та іншого важкого транспорту.
- Доповнення до BEV: Замість конкуренції, обидві технології розглядаються як взаємодоповнюючі частини загальної екосистеми "чистої" мобільності. BEV краще підходять для коротких та середніх поїздок, тоді як FCEV ефективніші для далеких відстаней та інтенсивного використання.
- Гібридні рішення: Деякі виробники розробляють гібридні системи, що поєднують невеликі батареї з паливними елементами, щоб оптимізувати продуктивність та ефективність.
- Державна підтримка та інвестиції: Уряди багатьох країн світу інвестують мільярди доларів у розвиток водневої інфраструктури та технологій, оскільки вони визнають потенціал водню як важливого енергоносія майбутнього.

Отже, місце паливних комірок у сучасній автомобільній індустрії - це технологія з великим потенціалом зростання, яка наразі перебуває на стадії комерціалізації та розвитку інфраструктури, особливо орієнтуючись на сектор комерційного та важкого транспорту.

1.4 Принцип роботи паливної комірки

Принцип роботи паливної комірки (fuel cell), зокрема PEM-типу, яка використовується в автомобілях на кшталт Toyota Mirai, Hyundai Nexo та Honda Clarity Fuel Cell, полягає в прямому перетворенні хімічної енергії водню та кисню на електричну енергію, тепло та воду.

Електрохімічне перетворення водню - це основний процес, який відбувається всередині паливної комірки (паливного елемента). Цей процес дозволяє генерувати електричну енергію, тепло та воду безпосередньо з хімічної енергії водню та кисню, без спалювання, що робить його високоефективним і чистим джерелом енергії.

Суть електрохімічного перетворення полягає у використанні водню (H_2) та кисню (O_2) для створення різниці електричних потенціалів через спеціальну мембрану.

Процес відбувається наступним чином :

1. Подача реагентів: Водень (H_2) подається на анод паливної комірки, а кисень (O_2), як правило, з повітря, подається на катод.
2. Реакція на аноді (окиснення): На аноді водень взаємодіє з каталізатором (зазвичай платиною), який розділяє молекулу водню (H_2) на позитивно заряджені іони водню (протони, H^+) та негативно заряджені електрони (e^-).
3. Хімічне рівняння анода: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
4. Рух іонів та електронів: Іони водню (H^+) проходять через спеціальну протонно-обмінну мембрану (PEM) до катода. Ця мембрана є ключовим елементом, що пропускає лише протони і блокує електрони. Електрони (e^-) не можуть пройти через мембрану і змушені рухатися зовнішнім електричним ланцюгом. Цей рух електронів і є електричним струмом, який

використовується для живлення електродвигуна автомобіля або іншого електричного пристрою.

5. Реакція на катоді (відновлення): На катоді електрони, що прибули із зовнішнього ланцюга, іони водню (H^+), що пройшли через мембрану, та кисень (O_2) поєднуються за допомогою іншого каталізатора. В результаті цієї реакції утворюється вода (H_2O) та виділяється тепло.
6. Хімічне рівняння катода: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
7. Загальна реакція: Сумарна реакція в паливній комірці — це зворотний процес до електролізу води: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{Електрична енергія} + \text{Тепло}$

Переваги електрохімічного перетворення

- Висока ефективність: Пряме перетворення хімічної енергії в електричну обходить обмеження теплових двигунів, досягаючи ККД до 60% і більше.
- Чистота: Єдиний "вихлоп" — це чиста вода та тепло.
- Постійна робота: На відміну від батарей, які розряджаються, паливна комірка виробляє електроенергію доти, доки подається паливо (водень).

Саме завдяки цьому процесу автомобілі на паливних елементах, такі як Toyota Mirai, Hyundai Nexo та Honda Clarity Fuel Cell функціонують як електромобілі з нульовими викидами, але пропонують зручність швидкої заправки паливом, подібно до традиційних автомобілів.

Будова паливної комірки з протонно-обмінною мембраною (PEM, Proton Exchange Membrane) є відносно простою за компонентами, але складною за технологією виготовлення. Це серце водневого автомобіля, що відповідає за електрохімічне перетворення водню в електрику.

Ключовим елементом будь-якої PEM-комірки є MEA (Membrane Electrode Assembly), який складається з п'яти шарів, щільно притиснутих один до одного:

- Анод (Anode): Негативний електрод, куди подається водень (H_2). Складається з газодифузійного шару (GDL) та каталітичного шару.
- Катод (Cathode): Позитивний електрод, куди подається кисень (O_2) або повітря. Також складається з газодифузійного шару (GDL) та каталітичного шару.

- Протонно-обмінна мембрана (PEM): Серцевина MEA, розташована між анодом і катодом.

Анод виконує дві основні функції: проводить електрони та забезпечує протікання хімічної реакції окислення водню та має :

- Газодифузійний шар (GDL): Зазвичай виготовляється з вуглецевого паперу або тканини. Його пориста структура дозволяє водню рівномірно розподілятися по поверхні електрода і дифундувати до каталізатора.
- Каталітичний шар: Тонкий шар, нанесений безпосередньо на мембрану або GDL. Містить високоефективний каталізатор на основі платини (Pt), закріплений на вуглецевому носії. Саме тут відбувається розщеплення молекул водню на протони та електрони.

Катод також складається з GDL та каталітичного шару і виконує дзеркальні функції: проводить електрони від зовнішнього кола, приймає протони через мембрану та забезпечує реакцію відновлення кисню та має :

- Газодифузійний шар (GDL): Аналогічно аноду, виготовлений з пористого вуглецевого матеріалу, що забезпечує ефективну подачу кисню та відведення утвореної води.
- Каталітичний шар: Також містить платиновий каталізатор. Тут кисень, протони та електрони поєднуються, утворюючи воду та виділяючи тепло.

Протонно-обмінна мембрана (PEM) є найважливішим технологічний елементом, який визначає назву комірки та має :

- Матеріал: Зазвичай це тонка плівка з полімерного матеріалу (наприклад, на основі Nafion від DuPont або подібних фторополімерів).
- Функція: Мембрана виконує роль твердого електроліту. Вона має унікальну властивість бути електричним ізолятором (не пропускає електрони), але при цьому високо провідною для позитивно заряджених іонів водню (протонів, H^+), за умови її зволоження.
- Бар'єр: Вона фізично розділяє водень та кисень, запобігаючи їх змішуванню та вибухонебезпечному прямому реагуванню.

Окрім MEA, паливна комірка включає:

- Біполярні пластини (Bipolar Plates): Ці пластини розташовані по обидва боки від МЕА. Вони мають вигравірувані канали для рівномірного розподілу газів (водень на анодній стороні, повітря на катодній). Вони також відводять електричний струм, що генерується, та забезпечують охолодження.
- Ущільнювачі (Gaskets): Забезпечують герметичність системи, запобігаючи витoku газів та води.

Багато окремих комірок (кожна генерує близько 0.7 В) з'єднуються послідовно в стек паливних елементів (fuel cell stack) для досягнення необхідної напруги для живлення електродвигуна автомобіля.

1.5 Конструкція водневого автомобіля

Електромобілі на паливних елементах працюють на найпоширенішому елементі у Всесвіті: водні. Хоча автомобіль на паливних елементах працює на електриці, він робить це інакше, ніж автомобілі на акумуляторах або гібридні автомобілі, що підключаються до мережі. У паливному елементі водень вступає в електрохімічну реакцію, виробляючи електроенергію для живлення автомобіля.

Автомобілі на паливних елементах, що представлені на рисунку 1.5.1 працюють на стисненому водневому газоподібному паливі, який подається у вбудований пакет паливних елементів, де газ не спалюється, а хімічна енергія палива перетворюється на електричну. Ця електроенергія потім живить електродвигуни автомобіля. Викиди вихлопних газів дорівнюють нулю, а єдиними відходами, що утворюються, є чиста вода.

Конструкція паливного елемента схожа на батарею. Водень потрапляє на анод, де він контактує з каталізатором, який сприяє розділенню атомів водню на електрон і протон. Електрони збираються струмопровідним колектором, який підключений до високовольної схеми автомобіля, живлячи бортовий акумулятор та/або двигуни, що обертають колеса.

Конструкція водневого автомобіля має такі основні частини : стек паливних комірок; паливний бак; електродвигун; акумулятор; вихлопні гази.

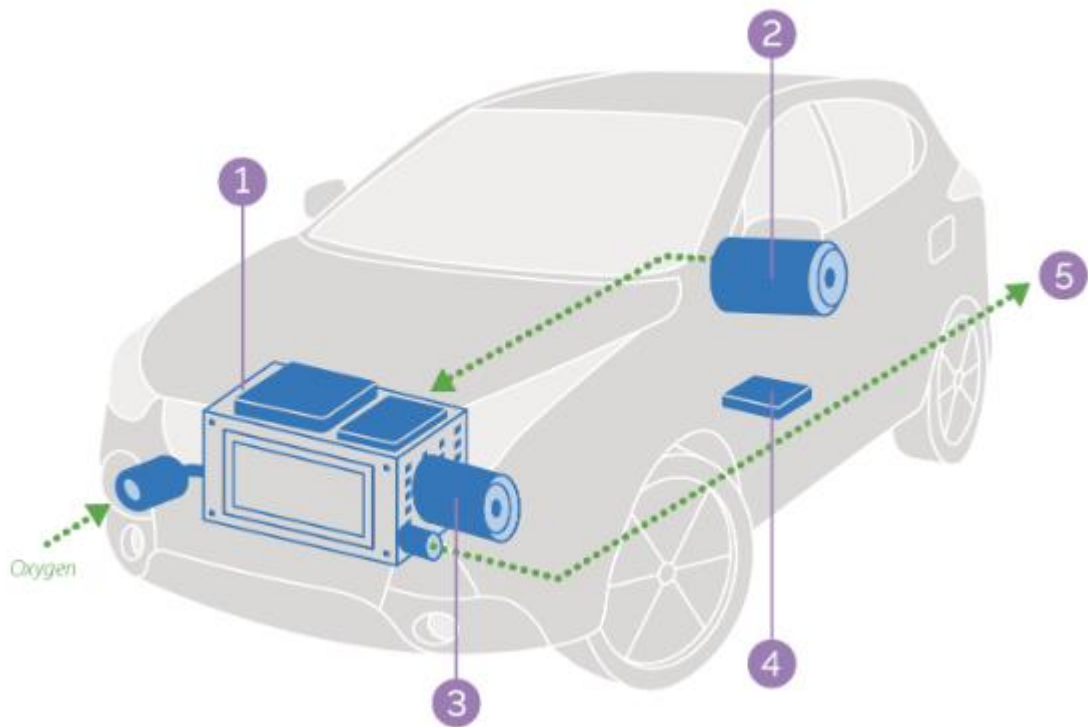


Рисунок 1.5.1 Схема автомобіля з паливними комірками на водню : 1 - Стек паливних елементів; 2 - Паливний бак; 3 – Електродвигун; 4 – Акумулятор; 5 - Вихлопні газы

Стек паливних комірок являє собою сукупність численних паливних елементів, які поєднують кисень і водень для вироблення електроенергії та живлення електродвигуна.

Паливний бак – бак в якому зберігається газоподібний водень, армованих вуглецевим волокном, для забезпечення паливом стеку паливних елементів

Електродвигун – живить автомобіль, використовуючи енергію, що виробляється в паливних комірках.

Акумулятор – збирає енергію від рекуперативного гальмування та забезпечує додаткову потужність для електродвигуна.

Вихлопні газы – побічним продуктом реакції, що відбувається в паливному елементі, є водяна пара, яка викидається через вихлопні газы.

1.6 Типи паливних комірок

Паливні комірки класифікують за типом електроліту та робочою температурою. Кожен тип має свої особливості, переваги та застосування (наприклад, деякі використовуються в автомобілях, інші — на електростанціях чи в космічній галузі).

Ось основні типи паливних комірок:

1. PEMFC (Протонно-обмінна мембрана)

Назва : Протонно-обмінна мембрана (Proton Exchange Membrane Fuel Cell).

Електроліт: Твердий полімер (наприклад, Nafion).

Робоча температура: Низька (50–100 °C).

Застосування: Це найпоширеніший тип для автомобільного транспорту (як у Toyota Mirai, Hyundai Nexo та Honda Clarity Fuel Cell), портативної електроніки та резервного живлення.

Переваги: Швидкий запуск (навіть при низьких температурах), висока щільність потужності, компактність.

Недоліки: Чутливі до домішок CO (чадний газ), потребують дорогого платинового каталізатора.

2. AFC (Лужні паливні комірки)

Назва : Лужні паливні комірки (Alkaline Fuel Cell).

Електроліт: Рідкий водний розчин гідроксиду калію (KOH).

Робоча температура: Низька/помірна (нижче 100 °C).

Застосування: Історично використовувалися в космічній програмі NASA (наприклад, на місіях "Аполлон"), де доступний чистий кисень.

Переваги: Висока ефективність, використання недорогих каталізаторів (не платина).

Недоліки: Дуже чутливі до CO₂ (вуглекислий газ з повітря), який деградує електроліт, що обмежує їх наземне застосування.

3. SOFC (Твердооксидні паливні комірки)

Назва : Твердооксидні паливні комірки (Solid Oxide Fuel Cell).

Електроліт: Твердий керамічний матеріал (наприклад, оксид цирконію).

Робоча температура: Дуже висока (500–1000 °C).

Застосування: Стаціонарна енергетика (електростанції, мікро-ТЕЦ), великі судна.

Переваги: Висока ефективність (може перевищувати 60%), стійкість до домішок, можуть працювати на різних видах палива (не тільки чистий водень, а й природний газ, біогаз, метанол).

Недоліки: Повільний запуск через високу температуру, вимогливість до матеріалів через екстремальний жар.

4. MCFC (Паливні комірки з розплавленим карбонатом)

Назва : Паливні комірки з розплавленим карбонатом (Molten Carbonate Fuel Cell).

Електроліт: Розплавлена суміш солей карбонату літію та калію, що утримується в керамічній матриці.

Робоча температура: Висока (близько 650 °C).

Застосування: Стаціонарне виробництво електроенергії промислового масштабу.

Переваги: Висока ефективність, можуть працювати на викопному паливі (природний газ, вугілля) з попередньою обробкою.

Недоліки: Агресивний та корозійний рідкий електроліт.

5. PAFC (Ортофосфорні паливні комірки)

Назва : Ортофосфорні паливні комірки (Phosphoric Acid Fuel Cell).

Електроліт: Рідка ортофосфорна кислота.

Робоча температура: Помірна (150–210 °C).

Застосування: Це був перший тип, комерційно доступний для стаціонарної генерації.

Переваги: Висока надійність та довговічність.

Недоліки: Нижча ефективність, ніж у інших типів, використання дорогої платини.

У сучасній автомобільній індустрії абсолютним стандартом є PEMFC через їхню низьку робочу температуру та швидкий час відгуку, що ідеально підходить для динаміки руху транспортного засобу.

1.7 Переваги та недоліки і обмеження автомобілів на водневих

паливних комірках

Автомобілі на водневих паливних комірках (FCEV) мають низьку суттєвих переваг, які роблять їх перспективною альтернативою як традиційним автомобілям з ДВЗ, так і акумуляторним електромобілям (BEV).

Основні переваги FCEV:

1. Нульові викиди під час експлуатації

Найважливіша екологічна перевага: FCEV виробляють електроенергію за допомогою електрохімічної реакції, єдиними побічними продуктами якої є чиста вода (водяна пара) та тепло. Вони не виділяють жодних шкідливих речовин, CO₂, NO_x чи твердих частинок, що сприяє покращенню якості повітря у містах.

2. Швидкість заправки

Критична перевага над акумуляторними електромобілями: Заправка повного бака водню займає всього від 3 до 5 хвилин. Це співмірно з часом заправки бензинового автомобіля і значно швидше, ніж швидка зарядка навіть найсучасніших BEV, яка може тривати від 20-30 хвилин до кількох годин.

3. Великий запас ходу

Сучасні FCEV пропонують запас ходу, порівнянний із традиційними автомобілями з повним баком бензину. Наприклад, Toyota Mirai, Hyundai Nexo та Honda Clarity Fuel Cell може проїхати понад 660 км за циклом WLTP на одній заправці. Це зменшує "тривогу діапазону" (range anxiety), яка часто виникає у власників BEV.

4. Висока енергоефективність

Паливні комірки перетворюють хімічну енергію безпосередньо на електричну з ефективністю близько 60% і вище. Це значно ефективніше, ніж

спалювання палива у двигунах внутрішнього згоряння (ККД яких інколи перевищує 30%).

5. Постійна продуктивність за будь-яких температур

На відміну від літій-іонних акумуляторів, продуктивність яких може значно знижуватися за низьких температур, паливні комірки працюють стабільно як у спеку, так і в мороз. Система використовує тепло, що виділяється під час роботи, для підтримки оптимальної робочої температури та обігріву салону.

6. Гнучкість використання енергії

Водень є універсальним енергоносієм. Його можна виробляти різними способами (електроліз з використанням відновлюваної енергії сонця та вітру), що дозволяє використовувати FCEV як частину більш широкої сталої енергетичної системи.

Хоча автомобілі на водневих паливних комірках (FCEV) мають значні переваги, вони також стикаються з критичними недоліками та обмеженнями, які наразі стримують їхнє масове впровадження.

Основні недоліки та обмеження FCEV:

1. Критична відсутність інфраструктури заправних станцій

Це, мабуть, найбільше обмеження. Кількість водневих заправних станцій у світі, а особливо в Україні, мізерно мала порівняно з тисячами АЗС для бензину/дизеля чи десятками тисяч зарядних станцій для електромобілів (BEV). Водії FCEV стикаються з серйозною "тривогою діапазону", оскільки не можуть заправитися будь-де і будь-коли.

2. Висока вартість автомобілів та палива

Вартість автомобілів: Через використання дорогих технологій, зокрема платинових каталізаторів у паливних комірках та складних композитних баків високого тиску, початкова ціна FCEV значно вища, ніж у аналогічних бензинових чи акумуляторних електромобілів.

Вартість водню: Ціна за кілограм водню на заправці залишається високою, що робить експлуатацію автомобіля дорожчою за традиційне паливо або зарядку BEV (з розрахунку на 100 км пробігу).

3. Ефективність "від колеса до джерела" (Well-to-Wheel Efficiency)

Хоча FCEV ефективніші за автомобілі з ДВЗ, вони менш енергоефективні, ніж акумуляторні електромобілі (BEV). Ланцюжок виробництва, транспортування, зберігання водню та подальшого перетворення його на електрику в автомобілі призводить до значних втрат енергії (близько 60-70% втрачається на різних етапах). У BEV цей ланцюжок коротший і ефективніший.

4. Виробництво "сірого" водню

Наразі понад 95% водню у світі виробляється з викопного палива (природного газу), що супроводжується значними викидами CO₂. Тому сьогодні більшість водневих автомобілів не є повністю "зеленими", якщо не використовувати "зелений" водень, вироблений за допомогою електролізу на відновлюваних джерелах енергії.

5. Складнощі зберігання та транспортування

Водень - це найлегший елемент, що ускладнює його зберігання та транспортування.

Для зберігання в автомобілі потрібні надміцні баки під тиском 700 бар.

Транспортування трубопроводами вимагає дорогої інфраструктури, а зрідження (для перевезення танкерами) є енергоємним процесом.

6. Занепокоєння щодо безпеки

Незважаючи на те, що сучасні FCEV мають надзвичайно високі стандарти безпеки (баки спроектовані витримувати екстремальні умови), уявлення про водень як про вибухонебезпечний газ (через асоціації з дирижаблем "Гінденбург") все ще викликає психологічний бар'єр у деяких споживачів.

1.8 Виробництво та зберігання водню

Виробництво та зберігання водню є критично важливими етапами водневої енергетики, які визначають її екологічність, ефективність та економічну доцільність.

Виробництво водню

Метод виробництва водню має вирішальне значення для його впливу на клімат. Водень класифікують за "кольорами" залежно від джерела енергії та процесу:

- Сірий водень (Grey Hydrogen): Наразі це основний (понад 95%) метод виробництва водню у світі. Він отримується з викопного палива, головним чином шляхом парової конверсії метану (steam methane reforming) з природного газу. Цей процес є дешевим, але супроводжується значними викидами CO₂ в атмосферу.
- Блакитний водень (Blue Hydrogen): Виробляється так само, як і сірий, але з використанням технологій уловлювання та зберігання вуглецю (CCS), що значно зменшує викиди CO₂. Це розглядається як перехідне рішення.
- Зелений водень (Green Hydrogen): Найперспективніший та екологічно чистий метод. Водень виробляється шляхом електролізу води, при цьому електроенергія надходить виключно з відновлюваних джерел (сонце, вітер, ГЕС). Викиди CO₂ при цьому нульові. Сьогодні це найдорожчий метод, але його вартість швидко знижується.
- Рожевий водень (Pink Hydrogen): Виробляється за допомогою електролізу, але з використанням електроенергії, виробленої на атомних електростанціях.

Зберігання водню

Водень має низьку об'ємну енергетичну густину, що ускладнює його компактне зберігання. Розроблено кілька методів зберігання:

1. Зберігання у стисненому вигляді (Compressed Hydrogen):

Найпоширеніший метод для автомобільного транспорту (наприклад, у Hyundai Nexo).

Водень зберігається як газ під високим тиском, зазвичай 350 або 700 бар (близько 5,000 або 10,000 psi), у міцних композитних баках.

- Переваги: відносно низька вартість системи та швидка заправка.
- Недоліки: процес стиснення потребує енергії, а баки займають значний об'єм.

2. Зберігання у зрідженому вигляді (Liquid Hydrogen):

Водень охолоджується до криогенних температур (-253°C) для перетворення на рідину.

- Переваги: вища об'ємна щільність енергії порівняно зі стисненим газом.
- Недоліки: процес зрідження надзвичайно енергоємний, а постійна підтримка низької температури призводить до втрат (випаровування). Використовується рідше, переважно у великих масштабах або в аерокосмічній галузі.

3. Твердотільне зберігання (Solid-State Storage):

Водень зберігається хімічно або фізично зв'язаним усередині матеріалу-носія, такого як металеві гідриди або вуглецеві наноматеріали.

- Переваги: потенційно висока щільність зберігання та безпека.
- Недоліки: технологія все ще перебуває на стадії досліджень та розробок; проблеми з вагою матеріалів, швидкістю "завантаження" та "вивантаження" водню.

Ефективне виробництво "зеленого" водню та розробка досконаліших методів зберігання є ключовими завданнями для повноцінного розкриття потенціалу водневої енергетики.

1.9 Світовий досвід впровадження

Світовий досвід впровадження автомобілів на водневих паливних комірках (FCEV) свідчить про те, що ця технологія розвивається повільно, стратегічна альтернатива, яка має сильну державну підтримку в певних регіонах, але поки що значно відстає від акумуляторних електромобілів (BEV) за обсягами продажів та інфраструктурою.

Основні країни-лідери та їхній досвід

Кілька країн активно інвестують у водневу мобільність, часто розглядаючи її як частину своєї національної стратегії енергетичної безпеки та декарбонізації:

- Південна Корея: Є світовим лідером за кількістю зареєстрованих пасажирських FCEV. Уряд поставив амбітні цілі — мати мільйони водневих автомобілів до 2040 року. Країна активно інвестує в інфраструктуру та пропонує значні фінансові стимули для покупців.
- США (Каліфорнія): Штат Каліфорнія є основним ринком FCEV у Північній Америці. Завдяки ініціативам Каліфорнійського партнерства з паливних елементів (California Fuel Cell Partnership) та суворим мандатам на автомобілі з нульовими викидами, тут розгорнуто найбільшу мережу заправних станцій у США.
- Японія: Була піонером у технології водневих паливних елементів і має комплексну національну водневу стратегію. Японські автовиробники, такі як Toyota (модель Mirai) та Honda, є ключовими гравцями на ринку FCEV. Японія також інвестує у виробництво водню та інфраструктуру.
- Китай: Швидко нарощує свою присутність, особливо у сегменті комерційного транспорту. Китай лідирує у світі за кількістю водневих вантажівок та автобусів, маючи понад 95% світового парку вантажівок FCEV. Уряд Китаю також має на меті розширити парк пасажирських автомобілів.
- Німеччина: Вважається лідером у Європі за якістю покриття мережі водневих заправних станцій. Німеччина також впроваджує водневі технології в інших секторах, наприклад, у залізничному транспорті, запустивши перші у світі водневі пасажирські поїзди.

Загальні тенденції та висновки

Пасажирський транспорт проти комерційного: Світовий досвід показує, що FCEV наразі краще комерціалізуються в сегменті пасажирських автомобілів у Південній Кореї, Японії та Каліфорнії, тоді як у Китаї та Європі технологія знаходить сильне застосування у важкому транспорті (вантажівки, автобуси, поїзди).

Залежність від державної підтримки: Впровадження FCEV майже повністю залежить від значних державних субсидій, інвестицій в інфраструктуру та нормативних актів, оскільки ринкові механізми ще не роблять FCEV конкурентоспроможними порівняно з BEV чи ДВЗ.

Виклики інфраструктури: Незважаючи на прогрес, обмежена кількість заправних станцій залишається головною перешкодою для масового впровадження в усьому світі.

Фокус на "зеленому" водні: Існує зростаюча потреба переходу від "сірого" водню (з викопного палива) до "зеленого" водню (з відновлюваних джерел), щоб реалізувати повні екологічні переваги технології.

Висновки до розділу 1

1. В даному розділі було розглянуто актуальність водневих технологій, принцип роботи паливних комірок, конструкцію автомобіля з паливними комірками на водню, типи паливних комірок, порівняли з іншими видами транспорту, вказали переваги та недоліки водневих автомобілів.
2. Водневий транспорт пропонує перспективну беземісійну альтернативу з високою зручністю використання (швидка заправка, великий запас ходу), але його широке впровадження стримується економічними факторами та відсутністю розвиненої інфраструктури.

РОЗДІЛ 2

Паливні комірки з протонно обмінною мембраною

2.1 Мембрано-електродний вузол (MEA)

Мембрано-електродний вузол, або MEA (Membrane Electrode Assembly), є ядром будь-якої паливної комірки, де відбувається електрохімічна реакція. Це високо інтегрована багатошарова структура, ефективність якої критично важлива для продуктивності всієї системи.

Стандартний і найпоширеніший MEA складається з п'яти основних шарів, які щільно притиснуті один до одного (на рисунку 2.2.1 – MEA5):

- Протонно-обмінна мембрана (PEM): Центральний елемент, який діє як твердий електроліт. Вона пропускає лише протони (H^+) і блокує електрони та газоподібні реагенти, запобігаючи короткому замиканню та змішуванню водню з киснем. Зазвичай виготовляється з полімерів на основі перфторсульфонової кислоти (наприклад, Nafion).
- Каталітичні шари (анодний та катодний): Тонкі шари з обох боків мембрани. Вони містять каталізатор (найчастіше наночастинки платини, закріплені на вуглецевому носії), який прискорює хімічні реакції. На аноді відбувається окиснення водню, на катоді — відновлення кисню.
- Газодифузійні шари (GDL, анодний та катодний): Пористі матеріали (зазвичай вуглецевий папір або тканина) розташовані зовні від каталітичних шарів. Вони забезпечують рівномірний розподіл газів (водню та повітря) по всій поверхні електрода, відводять утворену воду і проводять електрони від та до зовнішніх колекторів струму.

2.1.1 Типи MEA за конструкцією

Окрім стандартної 5-шарової конфігурації, також існують інші варіації MEA, що відрізняються способом інтеграції GDL та каталізаторів:

- 3-шаровий MEA (CCM) (на рисунку 2.2.1 – MEA3): Цей тип також називають мембраною з нанесеним каталізатором (Catalyst Coated Membrane, CCM). У цій конфігурації каталітичні шари наносяться безпосередньо на поверхню

мембрани, а газодифузійні шари (GDL) не входять до складу MEA і додаються окремо під час збирання паливної комірки. Це дає більшу гнучкість для експериментів з різними типами GDL.

- 7-шаровий MEA (на рисунку 2.2.1 – MEA7): Ця конфігурація включає додаткові шари (наприклад, ущільнювачі або додаткові мікропористі шари) для підвищення продуктивності, довговічності або герметизації, що може бути корисним у високопродуктивних застосуваннях.

Вибір типу MEA залежить від конкретних вимог застосування: 5-шаровий тип є найбільш збалансованим за продуктивністю та простотою збирання, тоді як 3-шаровий CCM пропонує більшу гнучкість для досліджень та розробок.

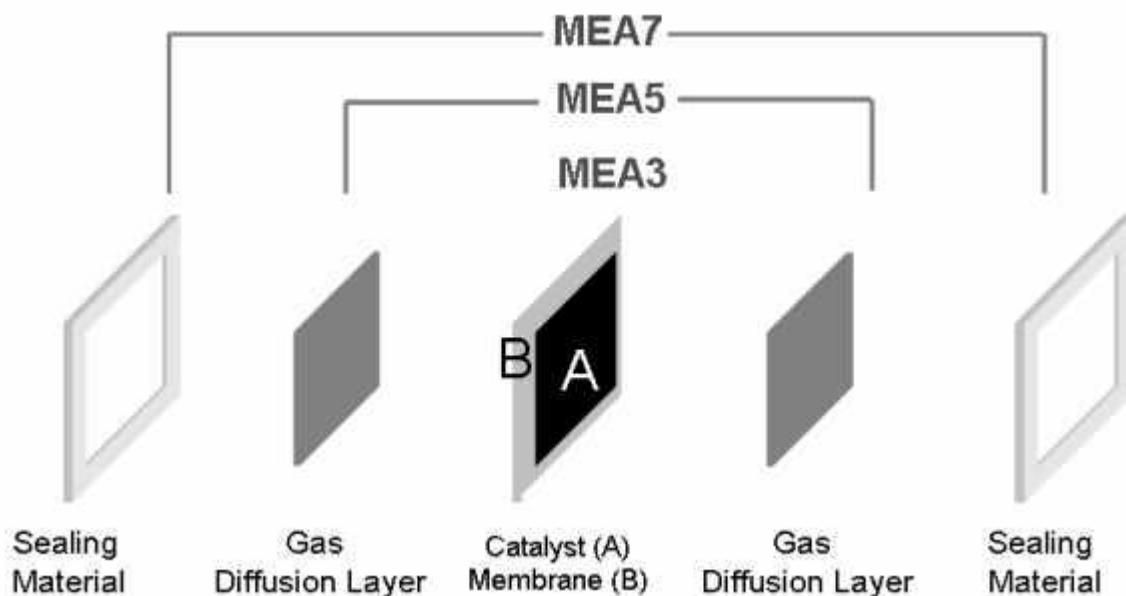


Рисунок 2.1.1.1 Типи MEA : MEA3 – 3 - шаровий MEA (CCM); MEA5 – 5 - шаровий MEA; MEA7 – 7 - шаровий MEA

2.1.2 Протонно-обмінна мембрана

Мембрана є центральним і найважливішим компонентом мембранно-електродного вузла (MEA) в паливній комірці з протонно-обмінною мембраною (PEMFC). Вона являє собою тонку полімерну плівку з унікальними властивостями.

Основні характеристики мембрани PEM:

- Матеріал: Зазвичай це полімер на основі тefлону (політетрафторетилену, PTFE), хімічно модифікований сульфоновими кислотами. Найвідомішим

комерційним прикладом є матеріал Nafion компанії DuPont Inc виготовлений у 1970 році.

- Товщина: Мембрани дуже тонкі, зазвичай мають товщину від 10 до 50 мікрометрів.
- Зволоження: Для ефективної роботи мембрана має бути постійно зволоженою водою. Вода допомагає протонам (іонам водню) вільно переміщатися через полімерну структуру.

Функції мембрани

Мембрана виконує три ключові функції в паливній комірці:

- Твердий електроліт (провідність протонів): Це її головна роль. Вона забезпечує шлях для переміщення позитивно заряджених іонів водню (протонів, H^+) від анода до катода.
- Електричний ізолятор: Мембрана абсолютно не проводить електрони (e^-). Це критично важливо, оскільки електрони повинні рухатися по зовнішньому електричному ланцюгу, створюючи корисний струм. Якщо мембрана пропустить електрони, відбудеться коротке замикання.
- Газовий бар'єр: Вона фізично розділяє гази-реагенти — водень (H_2) на аноді та кисень (O_2) на катоді, запобігаючи їх змішуванню та неконтрольованому, потенційно вибухонебезпечному прямому реагуванню.

Виходить що, мембрана є високотехнологічним "серцем" паливної комірки, що дозволяє контролювати електрохімічний процес та ефективно генерувати електроенергію.

2.1.3 Основні типи мембран

У 2025 році розробка мембран спрямована на підвищення робочої температури (понад $100^{\circ}C$) та зменшення залежності від зволоження. Основні типи мембран класифікують за їхнім хімічним складом (порівняння типів наведено в табл. 2.1.3.1:

1. Перфторовані сульфокислотні мембрани (PFSA) Це найпоширеніший тип, до якого належить знаменитий Nafion.

- Особливості: Складаються з тefлоноподібної основи та бокових ланцюгів із сульфогрупами.
- Переваги: Висока протонна провідність, хімічна та механічна стабільність.
- Застосування: Hyundai Nexon, Toyota Mirai.
- Виклики: Потребують постійного зволоження та втрачають ефективність при температурах вище 80 – 90°C.

2. Композитні (армовані) мембрани

Це вдосконалений варіант PFSA (наприклад, Gore-Select).

- Особливості: Всередину тонкого шару Nafion вплітається надміцна сітка (зазвичай із пористого ПТФЕ/тефлону).
- Переваги: Це дозволяє зробити мембрану екстремально тонкою (5 – 15 мкм) без втрати міцності. Тонша мембрана краще проводить протони та воду.

3. Безфторні вуглеводневі мембрани (Hydrocarbon Membranes)

- Особливості: Використовують дешевші полімери без вмісту фтору (наприклад, сульфований поліефірефіркетон — sPEEK).
- Переваги: Дешевші у виробництві, менш шкідливі для довкілля при утилізації, витримують вищі температури.
- Станом на 2025: Активно тестуються як бюджетна альтернатива Nafion для масових авто.

4. Високотемпературні мембрани (HT-PEM)

- Особливості: Найчастіше базуються на полібензімідазолі (PBI), просоченому фосфорною кислотою.
- Переваги: Працюють при 120 – 200°C. Не потребують зволоження водою, стійкі до домішок у водні (наприклад, чадного газу CO).
- Застосування: Стаціонарні генератори та важкий транспорт.

5. Аніонообмінні мембрани (АЕМ) Особливості: Пропускають не протони (H⁺), а іони гідроксиду (OH⁻).

- Переваги: Дозволяють використовувати недорогі метали (нікель, срібло) замість дорогої платини як каталізатор.
- Станом на 2025: Вважаються технологією майбутнього, яка може радикально здешевити водневі авто, але поки що мають менший термін служби, ніж PEM.

Таблиця 2.1.3.1

Порівняльна таблиця основних типів мембран

Тип мембрани	Робоча Т	Провідність	Вартість	Основна проблема
PFSA (Nafion)	60 - 80°C	Дуже висока	Висока	Залежність від води
Армована	60 - 95°C	Максимальна	Висока	Складність виробництва
HT-PEM (PBI)	120 - 200°C	Середня	Середня	Корозія кислотою
AEM	40 - 70°C	Середня	Низька	Швидка деградація

Для сучасного легкового транспорту (як Hyundai Nexo та Toyota Mirai) стандартом залишаються армовані та PFSA мембрани через їхню ідеальну збалансованість характеристик.

2.1.4 Каталітичні шари

Каталізатори, або два каталітичні шари (по одному на аноді та катоді), є надзвичайно важливими компонентами мембранно-електродного вузла (MEA) паливної комірки.

Ці шари не просто "прискорюють" реакцію; вони роблять можливим ефективно електрохімічне перетворення водню та кисню за низьких температур, яке інакше відбувалося б дуже повільно.

Каталітичні шари - це тонкі (товщиною всього кілька мікрметрів), пористі покриття, які наносяться на поверхню мембрани або газодифузійного шару.

Основні характеристики та склад:

- Каталізатор (Платина Pt): Активним матеріалом є дорогоцінний метал - платина. Платина використовується через її високу стійкість до корозії в кислому середовищі та виняткову ефективність у прискоренні необхідних електрохімічних реакцій.
- Носій (Вуглець): Щоб зменшити кількість дорогої платини та максимально збільшити площу її контакту з газами та мембраною, наночастинки платини розподіляють на поверхні високодисперсного вуглецевого порошку. Вуглець слугує електропровідним каркасом.
- Сполучник (Іономер): Використовується спеціальний полімерний сполучник (іономер, часто той самий матеріал, що і мембрана, наприклад, Nafion) для зв'язування частинок каталізатора та вуглецю між собою. Іономер також забезпечує шлях для переміщення протонів (H^+) до/від місця реакції.

Функції двох різних шарів

Хоча обидва шари використовують платину, вони виконують різні хімічні функції:

1. Анодний каталітичний шар (Anode Catalyst Layer)

- Функція: Забезпечує реакцію окиснення водню.
- Процес: Молекула водню (H_2) підводиться до поверхні каталізатора і розпадається на протони (H^+) та електрони (e^-). Протони далі рухаються через іономер до мембрани, електрони — по зовнішньому ланцюгу.

2. Катодний каталітичний шар (Cathode Catalyst Layer)

- Функція: Забезпечує реакцію відновлення кисню.
- Процес: Ця реакція є складнішою і повільнішою, тому катодний шар зазвичай містить трохи більше платини, ніж анодний. Тут кисень (O_2) поєднується з протонами (H^+), що пройшли через мембрану, та електронами (e^-), що повернулися із зовнішнього ланцюга, утворюючи воду (H_2O).

Катодний каталітичний шар або каталізатор катода

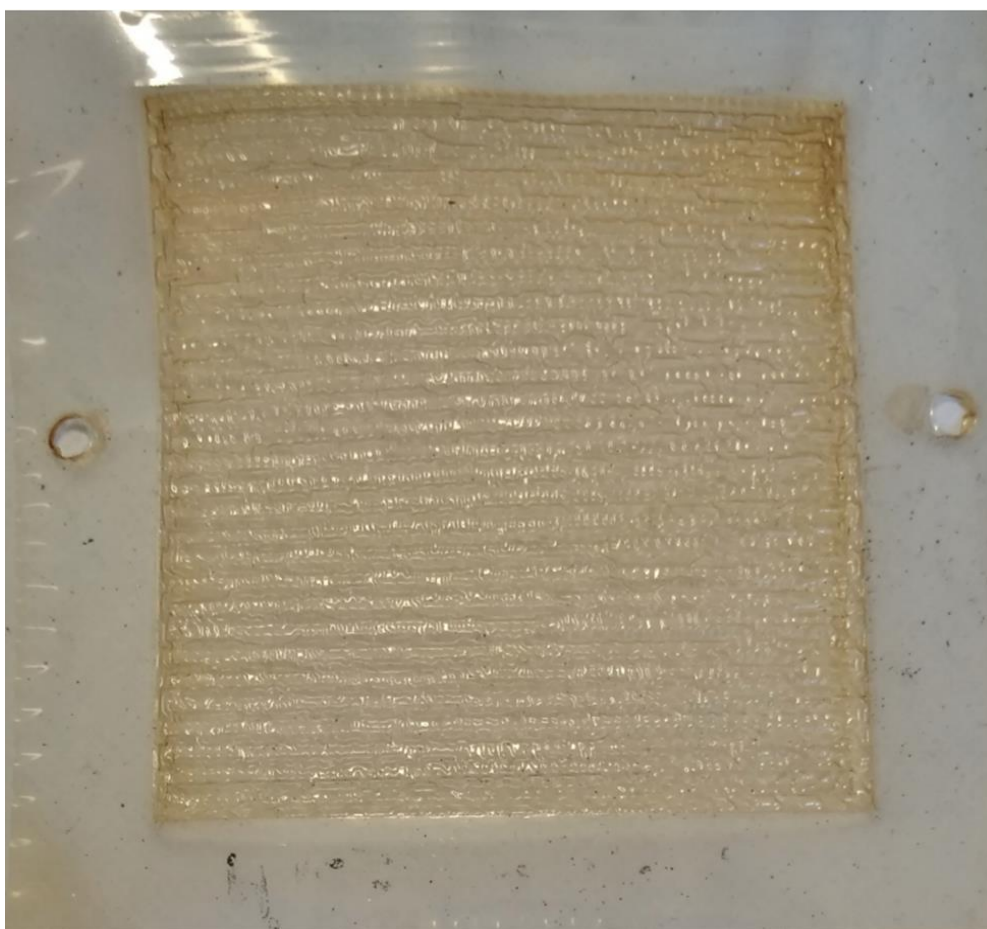


Рисунок 2.1.3.1: Мембрана Nafion (катодна) – NRE-211 [73]

Мембрана, що показана на (рис. 2.1.3.1) є протонопровідною і пропускає тільки протони. Це є основною функцією цих мембран у PEMFC. Ці мембрани містять негативні заряди (наприклад, PO_3^- , COO^- , $\text{C}_6\text{H}_4\text{O}^-$, SO_3^-) у основній структурі мембрани, що обмежує проходження аніонів (іонів з негативним зарядом) і пропускає тільки катіони (іони з позитивним зарядом H^+). Мембрани з катодним каталітичним шаром мають низький внутрішній опір і високу провідність.

Анодний каталітичний шар або каталізатор анода

Ці мембрани мають позитивні заряди, такі як PR^{3+} , SR^{2+} та NH_3^+ , приєднані до мембран, і відповідають за перенесення аніонів [41].

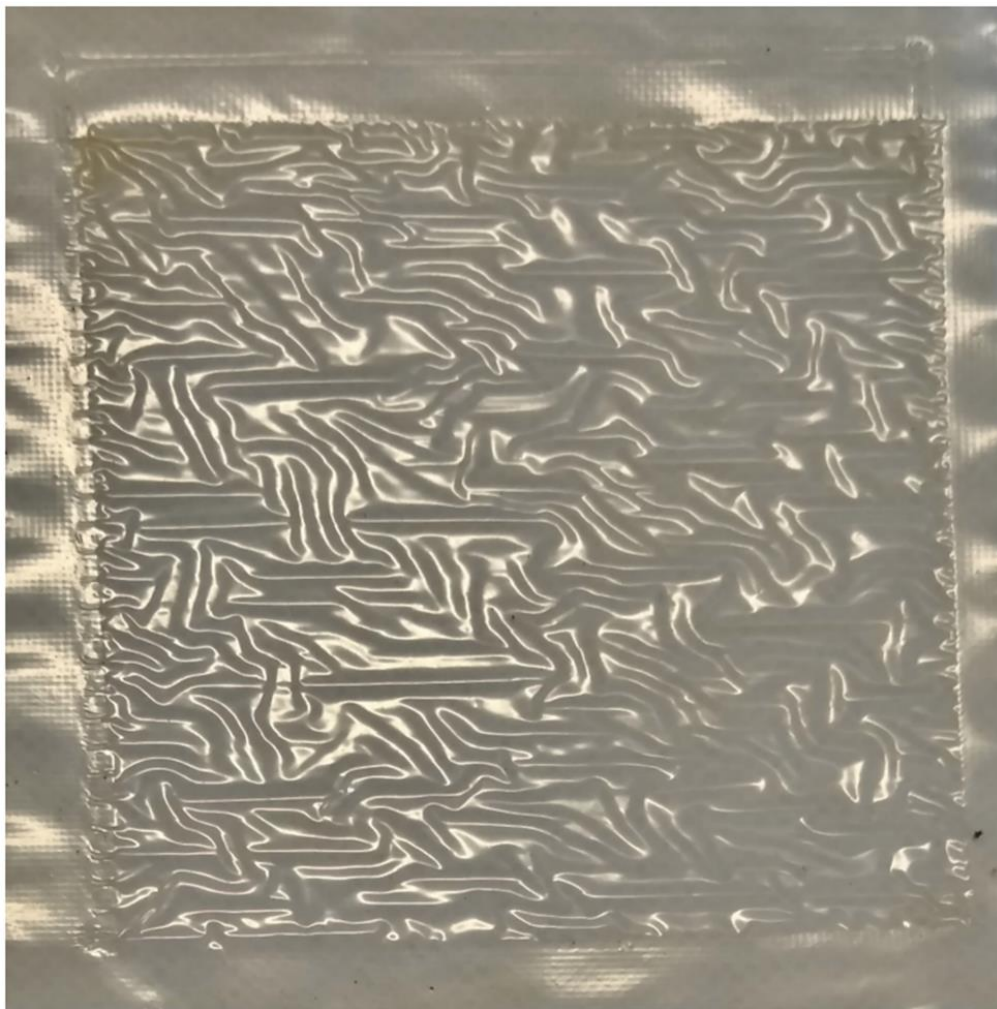


Рисунок 2.1.3.2 : Мембрана Токууата (анодна) – А 201 [73]

З метою поліпшення протонної провідності аніонообмінні мембрани (рис. 2.1.3.2) виконують спеціальну функцію, оскільки використовують карбонат і фосфат і, отже, безпосередньо спрямовані на поліпшення ефективності перенесення протонів [42]. Однак коефіцієнти дифузії та рухливість (OH^-) менш дисоційовані, ніж типові сульфонові кислотні групи, а нуклеофільна властивість аніону (OH^-) може призвести до поганої хімічної стабільності паливного елемента [43].

Подвійні обмінні мембрани

Подвійні обмінні мембрани використовують як анодні, так і катодні властивості. Вони розташовані послідовно з вирівняними МЕА, які складаються з аніонної обмінної мембрани та катіонної обмінної мембрани.

2.1.5 Газодифузійні шари

Два GDL, або газодифузійні шари (Gas Diffusion Layer), є зовнішніми пористими компонентами мембранно-електродного вузла (MEA) паливної комірки. Вони розташовані з обох боків від каталітичних шарів і мембрани (між ними та біполярними пластинами).

GDL виконують критично важливі функції, які можна порівняти з "легеннями" та "електричними дротами" паливної комірки одночасно.

GDL складаються:

- Матеріал: Зазвичай виготовляються з високопористого, електропровідного матеріалу, найчастіше це вуглецевий папір або вуглецева тканина.
- Гідрофобність: Матеріал обробляють водовідштовхувальними (гідрофобними) речовинами, такими як тефлон (PTFE), щоб вода не блокувала пори.
- Мікропористий шар (додатково): Іноді між GDL і каталітичним шаром додають ще тонший мікропористий шар для кращого контакту та управління водою.

Основні функції двох GDL

Обидва шари (анодний та катодний GDL) виконують схожі функції, але в різних умовах:

1. Управління потоком газів (Дифузія)

GDL мають пористу структуру, яка дозволяє газам (водню на аноді та кисню/повітрю на катоді) рівномірно та швидко дифундувати (розповсюджуватися) від каналів у біполярних пластинах до каталітичних шарів, де відбувається реакція.

2. Проведення електронів (Електропровідність)

Оскільки GDL виготовлені з вуглецю, вони є добрими провідниками електрики. Вони збирають електрони з анодного каталітичного шару та передають їх до зовнішнього ланцюга, а потім повертають на катодний каталітичний шар.

3. Управління водою (Водовідведення)

На катодному боці це особливо важливо. В процесі реакції утворюється вода. Гідрофобні властивості GDL допомагають ефективно відводити цю воду з комірки в канали біполярних пластин.

Якщо вода заблокує пори (явище, відоме як "затоплення" або flooding), гази не зможуть дістатися до каталізатора, і комірка перестане працювати.

4. Механічна підтримка

GDL також забезпечують структурну цілісність MEA і захищають крихкі каталітичні шари та тонку мембрану від пошкоджень під час стиснення при збиранні стека паливних комірок.

2.2 Nafion і механізм переміщення

Nafion є найбільш розповсюджений тип полімерної протонно-обмінної мембрани (PEM), розроблений компанією DuPont. Це «золотий стандарт» у сучасній водневій енергетиці, зокрема в автомобілях як Toyota Mirai, Hyundai Nexo та Honda Clarity Fuel Cell, завдяки його хімічній стійкості, високій протонній провідності, хороша міцність і здатність витримувати різні робочі температури паливного елемента. Що робить мембрану Nafion більш корисною, так це дифузія через мембрану в різних умовах, що відрізняються температурою паливного елемента, відносною вологістю та товщиною.

Через мембрану може відбуватися декілька механізмів транспортування на різних відстанях та в різний час, і нелегко визначити або відстежити будь-який окремий процес в будь-який момент часу. При нормальній роботі паливного елемента рідина може переноситися за допомогою (1) гідравлічного механізму (закон Дарсі) (2) термоосмосу (потік внаслідок градієнта температури) (3) електроосмосу [44] (внаслідок струму) (4) масоперенесення (закон Фіка). Масоперенесення за законом Фіка можна додатково розділити на (інтерфейс + об'єм) [45] перенесення і попереднє випаровування. Оскільки в експериментальній установці, що досліджені цими авторами не було можливості конденсації рідкої води з зволоженого повітря, вони не враховували ефект попереднього випаровування. Термоосмос [46] можливий, але термоосмос на 1 або 2 порядки менший за об'ємну дифузію [47].

У паливних комірок гідравлічний механізм описує фізичне переміщення рідкої води або газів крізь пористу структуру мембрани чи газодифузійних шарів (GDL) під дією різниці загального тиску. На відміну від дифузії (яка виникає через різницю концентрації), цей механізм базується на механічному проштовхуванні речовини і описується законом Дарсі.

По закону Дарсі для паливної комірки виходить, що швидкість потоку рідини крізь пористе середовище прямо пропорційна перепаду тиску. У паливних комітках він використовується для розрахунку гідравлічного потоку води :

для мембрани :

$$J_{hyd} = \frac{K \cdot \rho}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} = \frac{10^{-18} \cdot 1000}{0,36 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{2039,43}{25 \cdot 10^{-6}} = 0,0022 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2) ; \quad (2.2.1)$$

для газодифузійного шару (GDL) :

$$J_{hyd} = \frac{K \cdot \rho}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} = \frac{10^{-11} \cdot 1000}{0,36 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{2039,43}{25 \cdot 10^{-6}} = 22660,3334 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2) ; \quad (2.2.2)$$

де : K - проникність матеріалу (наскільки легко мембрана або GDL пропускає воду) (для мембрани (Nafion) дорівнює від 10^{-18} м^2 до 10^{-20} м^2 , для газодифузійного шару (GDL) - від 10^{-11} м^2 до 10^{-12} м^2);

ρ - густина рідини (базове значення приймають 1000 кг/м^3 або 1 г/см^3);

μ - динамічна в'язкість води ($0,36 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}$ (при 80°C));

ΔP - різниця тисків між анодом і катодом ($2039,43 \text{ кг/(м} \cdot \text{с}^2)$);

L - товщина мембрани (для Nafion 211 має товщину 25 мкм).

У реальних умовах експлуатації цей механізм проявляється у двох напрямках:

- Перенесення від анода до катода: Якщо водень подається в баки під вищим тиском, ніж повітря на катоді, тиск "тисне" на воду всередині мембрани, змушуючи її рухатися до катода.
- Протидія затопленню: Інженери можуть навмисно підвищувати тиск на одному з боків (зазвичай анодному), щоб гідравлічно "виштовхувати" надлишок води з мембрани назад до каналів, запобігаючи накопиченню рідкої води (затопленню катода).

Гідравлічний механізм є найшвидшим способом переміщення води.

У сучасних системах керування водневими авто закон Дарсі використовується для:

- Балансування зволоження: Розрахунку оптимального тиску газів, щоб мембрана залишалася вологою, але пори GDL не забивалися краплями води.
- Діагностики: Якщо для проштовхування газів потрібен вищий тиск, ніж розраховано за законом Дарсі, система сигналізує про "затоплення" (flooding) комірки.

Газодифузійні шари (GDL) мають набагато вищу проникність K , ніж мембрана Nafion. Тому основний опір гідравлічному потоку чинить саме мембрана, тоді як у GDL закон Дарсі більше застосовується до руху газів і відведення води в канали біполярних пластин.

Використовується гідравлічний механізм являє собою "грубу силу" тиску, яка допомагає або заважає тонким процесам дифузії та електроосмосу всередині паливного елемента.

2. Термоосмос у паливних комірках є автоматичним процесом перенесення води крізь мембрану, що виникає через різницю температур між анодом і катодом. Оскільки реакція утворення води на катоді є екзотермічною (виділяє тепло), катод зазвичай на 2–5°C тепліший за анод.

Потік термоосмосу J_{th} описує переміщення молекул води від теплішої сторони до холоднішої (або навпаки, залежно від властивостей мембрани). Для мембран типу Nafion потік зазвичай спрямований від гарячого катода до холоднішого анода. Розрахункова формула потоку:

$$J_{thermo} = D_T \cdot \frac{dT}{dx} = 1,1 \cdot 10^{-11} \cdot 118110 = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2) \quad (2.2.3)$$

де: D_T - коефіцієнт термоосмотичної дифузії (становить приблизно $1,1 \cdot 10^{-11}$ кг/(м·с·K));

dT/dx - градієнт температури по товщині мембрани (становить 118 110 K·м).

У сучасних високоефективних стеках паливних елементів термоосмос відіграє критичну роль у «пасивному» зволоженні:

- Повернення води: Вода, що утворилася на катоді, не лише дифундує через різницю концентрацій, а й «підштовхується» теплом назад до анода.

- Захист від пересихання: Це допомагає підтримувати анодну сторону мембрани вологою без використання громіздких зовнішніх зволожувачів.
- Стабільність при високих навантаженнях: Коли автомобіль їде вгору або швидко прискорюється, температура на катоді зростає, посилюючи термоосмос і автоматично прискорюючи рециркуляцію вологи.

Для матеріалу Nafion у робочих діапазонах температур (60 – 80°C) встановлено, що термоосмотичний потік спрямований від гарячого до холодного. Оскільки, термоосмос допомагає зворотній дифузії повертати воду на анод. Це протидіє електроосмотичному драгуванню, яке тягне воду від анода до катода разом із протонами.

Термоосмос по суті це тепловий «насос», який допомагає перерозподіляти воду всередині паливного елемента, підтримуючи здоров'я мембрани за рахунок тепла самої реакції.

3. Електроосмос (або електроосмотичне драгування) у паливних комірках - це процес перенесення молекул води крізь мембрану Nafion разом із протонами (H^+), що рухаються від анода до катода під дією електричного струму. Згідно з дослідженнями [68] та класичними моделями, цей механізм є одним із домінуючих факторів осушення анода.

Потік електроосмосу J_{eod} розраховується за формулою:

$$J_{eod} = n_d \frac{I}{F} M_w = 1,0 \frac{10000}{96485} 0,018 = 0,104 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2) \quad (2.2.4)$$

де: n_d (Electro-osmotic drag coefficient) - коефіцієнт драгування, що показує кількість молекул води, які переносить один протон. За [44], для повністю зволоженої мембрани Nafion при температурах близько 80°C цей показник становить приблизно 1,0 – 2,5;

I - щільність електричного струму (зазвичай коливається в межах від 1 000 до 25 000 А/м²);

F - стала Фарадея (96485 Кл/моль);

M_w - молярна маса води (0,018) кг/моль).

У сучасних системах керування автомобілях з паливними комірками на водню :

- Електроосмос завжди спрямований від анода до катода. При високих навантаженнях (високий струм (I)) він настільки швидко викачує воду з анодного боку, що мембрана може пересохнути та вийти з ладу.
- Система зворотного зв'язку автомобіля розраховує цей потік у реальному часі, щоб збалансувати його за допомогою зворотної дифузії (за рахунок градієнта концентрації) та термоосмосу.

Коефіцієнт n_d критично залежить від стану мембрани. Якщо мембрана недостатньо зволожена, n_d падає, що погіршує провідність протонів і знижує ККД всього двигуна.

4. Масоперенесення за законом Фіка у паливних комірках описує процес дифузії - переміщення молекул води (або газів) з області високої концентрації в область низької концентрації.

Але в мембрані Nafion цей процес називають зворотною дифузією, оскільки він спрямований від катода (де вода утворюється) назад до анода.

Потік дифузії J_{diff} прямо пропорційний градієнту концентрації води по товщині мембрани:

$$J_{diff} = D_w \frac{dc}{dx} = D_w \frac{\Delta c}{L} M_w = 10^{-10} \frac{18\,000}{25 \cdot 10^{-6}} 0,018 = 0,001 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2) \quad (2.2.5)$$

де: D_w - коефіцієнт дифузії води в мембрані. Для мембран типу NRE-211 при температурі 80°C типові значення D_w становлять приблизно: 10^{-10} - 10^{-9} м²/с. (м²/с) за [47]. Він не є постійним і дуже сильно залежить від температури та рівня зволоження мембрани (λ);

dc/dx - градієнт концентрації води (зміна кількості води на одиницю товщини);

Δc - різниця концентрацій. При типовій різниці зволоження $\Delta \lambda \approx 10$, значення $\Delta c = 18\,000$ моль/м³. Саме ця величезна різниця концентрацій створює рушійну силу для зворотної дифузії, яка повертає воду на анод, рятуючи мембрану від пересихання;

L - товщина мембрани(для Nafion 211 має товщину 25 мкм).

У сучасних системах керування автомобілем (як у Hyundai Nexoh) закон Фіка використовується для динамічного балансування: якщо розрахунок показує, що зворотна дифузія не встигає за електроосмосом, комп'ютер дає команду зволожувачу повітря додати вологи на вхід, щоб запобігти деградації стека.

Масоперенесення за законом Фіка — це природний балансер, який намагається рівномірно розподілити воду по всій товщині паливного елемента.

2.3 Переміщення та сорбція води

Загалом, сорбцію води, враховуючи мембрани Nafion, можна визначити як кількість води, що поглинається мембраною в рівновазі з парою або рідкою водою при відомій температурі. Вона визначає рівень зволоження мембрани (λ). Мембрана вбирає воду всім своїм об'ємом, як губка. Коли молекули води потрапляють всередину, вони приєднуються до сульфогруп ($-\text{SO}_3^-$) полімеру.

Ступінь сорбції залежить від активності води в газах. Якщо повітря на вході сухе, мембрана віддає воду (десорбція), а якщо вологе або є рідка вода - вбирає (сорбція).

При сорбції мембрана збільшується в об'ємі (до 10–15%), що створює механічне напруження в стеку.

Коли вода вже знаходиться всередині мембрани або пористих шарів, вона починає рухатися під дією різних фізичних сил які наведені в табл. 2.3.1.

Таблиця 2.3.1

4 основні механізми руху переміщення

Механізм	Напрямок	Рушійна сила	Опис
Гідравлічний потік	Залежить від (P)	Різниця тисків (ΔP)	Механічне проштовхування води за законом Дарсі.
Термоосмос	Катод $\rightarrow$ Анод	Різниця температур (ΔT)	Рух води від гарячого катода до холоднішого анода.
Електроосмос	Анод $\rightarrow$ Катод	Електричний струм	Протони "тягнуть" за собою

			молекули води (драгування).
Масоперенесення (закон Фіка)	Катод → Анод	Різниця концентрацій (Δc)	Вода повертається з вологого катода на сухий анод за законом Фіка.

Для стабільної роботи автомобіля з паливними комірками на водні, система управління постійно розраховує сумарний потік (J_{net}):

$$J_{net} = J_{eod} - J_{diff} + J_{hyd} - J_{thermo} = 0,104 - 0,001 + 0,0022 - 1,3 \cdot 10^{-7} = 0,105 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2) \quad (2.3.1)$$

Якщо J_{eod} (драгування) набагато більше за J_{diff} (дифузію), анод мембрани висохне за лічені секунди.

На високих потужностях (20 000 А/м²) вода на катоді утворюється так швидко, що виникає ризик затоплення (flooding), а на аноді - висушування (drying).

У сучасних автомобілях з паливними комірками на водні використовує спеціальний зволожувач (Humidifier) та система рециркуляції водню. Надлишок води, що вийшов з катода, захоплюється і подається на вхід анода, підтримуючи сорбцію на оптимальному рівні без потреби в баку з водою.

Сорбція "заряджає" мембрану водою для провідності, а механізми переміщення розподіляють цю воду, щоб уникнути перегріву або зупинки реакції [48] [44] .

Ізотерми сорбції мембран Nafion можуть мати різну поведінку, як показано на рисунку 2.3. Різні типи механізмів сорбції можуть бути пов'язані з різними формами ізотерми сорбції.

1. Теорія Ленгмюра: дисоціація кислотної групи SO₃H (λ -(2-3))
2. Закон Генрі: адсорбція до міцно зв'язаної води ($4 < \lambda < 10$)
3. Теорія Флорі-Хаггінса: агрегація молекул води (кластеризація $\lambda > 10$)

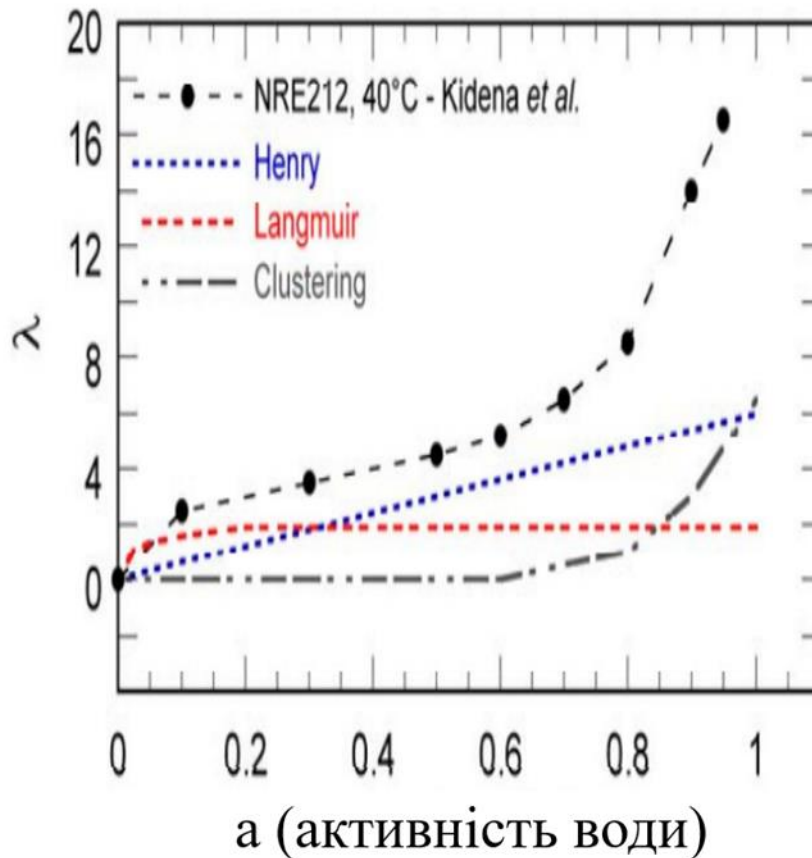


Рисунок 2.3.1: Ізотерма сорбції Nafion NRE212 при 40 °C, адаптована з [49]
Криву можна розкласти на три складові: Генрі, Ленгмюра та кластеризації.[73]

Одним з ключових процесів для ефективної роботи паливних елементів є сорбція та транспорт води в полімерних мембранах, а вміст води є важливою змінною, що характеризує сучасний стан полімерної електролітної мембрани.

Структурні властивості, а також транспортні властивості, що визначають загальну довговічність паливних елементів, можуть сильно залежати від вмісту води, що впливає на протонну провідність, деградацію, однорідність, набрякання в різних умовах експлуатації паливних елементів [49, 50, 51, 52, 53].

В літературі існують різні моделі для розуміння поведінки сорбції води в полімерних електролітних мембранах. Ізотерми сорбції води цими мембранами мають сигмоїдну форму. При низькій відносній вологості вони є увігнутими до активності води, а при високій відносній вологості — опуклими. Ці моделі можна додатково класифікувати на (1) Двох режимний режим сорбції (2) Сигмоїдна

модель сорбції (3) Нова модель подвійного режиму сорбції . Ізотерми, сигмоїдна форма сорбції води в мембранах були проаналізовані за допомогою нової моделі подвійного режиму Фенга для аналізу мембран Nafion з різними протиіонами та протонованих мембран Nafion за різних рівнів вологості. Потім модель Фенга була використана для аналізу взаємозв'язків між структурою та властивостями мембран [54].

2.4 Розрахунки тиску пари

Тиск пари води - це тиск, при якому водяна пара перебуває в стані термодинамічної рівноваги зі своїм конденсованим станом, і тому це дуже важлива властивість для розуміння фізики, що лежить в основі методу водного балансу.

Найпростішим рівнянням є рівняння Клаузіуса-Клапейрона [55] з припущенням про постійну молярну ентальпію випаровування. Воно не є точним для загальних застосувань, тому було запропоновано різні інші кореляції для розуміння з різними емпіричними константами на основі певного набору експериментів.

1. Формула Антуана. Для розрахунку тиску пари в широкому діапазоні температур широко використовується кореляція за формулою Антуана [55], яка визначається як $\log(P_{vp}) = A - B/(T + C)$ і використовує три емпіричні константи. Ця кореляція є більш точною при вищих температурах, але має низьку ефективність при температурах замерзання вище 0°C.

2. Формула Магнуса :

$$P = 0.61094(e^{17.625 \times T}) / (T + 243.03); \quad (2.4.2)$$

[57] описали алгоритми, засновані на рівнянні Магнуса, для мінімізації різниці між декількома співвідношеннями між температурою і тиском води при насиченні.

3. Формула Тетен

Формула Тетен — ще один такий метод обчислення тиску насиченої пари, заданого формулою :

$$P_s = 0.611(e^{17.27 \times T} / (T + 273)); \quad (2.4.3)$$

Рівняння Бака :

$$P_s = 0.61121(e^{18.67 - (T / 234.5)} / (257.4 + T)), \text{ if } T > 0^\circ \text{Celsius}. \quad (2.4.4)$$

[57] оцінили тиск насиченої пари за допомогою різних формул і виявили, що формула Бака дає прийнятний тиск насиченої пари за всіх температурних умов від -50°C до +50°C, тоді як формула Тетена показує збільшення похибки при розрахунку, коли температура нижча за 0°C.

5. Формула Ренкіна

Формула Ренкіна також може бути використана для розрахунку тиску насиченої пари, як це зробили [58], що задається рівнянням, де T - температура, для якої розраховується P_{sat} , і це температура паливного елемента. Аналогічно, для розрахунку P_{sat} зволожувача використовується рівняння 2.11, фіксуючи відносну вологість.

$$P_{sat} = P_{atm} \times \exp\left\{\left(13.669 - \left(\frac{5096.23}{T}\right)\right)\right\}; \quad (2.4.5)$$

Формула Ренкіна забезпечує більшу гнучкість розрахунків. Формула Антуана має багато констант. Для розрахунків вона вимагає використання A , B і C , а отже, схильна до більшої кількості помилок. Формула Бака має обмеження температури від -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$, а формула Тетен показує помилки при розрахунках нижче 0°C . Експерименти стосуються зміни відносної вологості, тому було забезпечено підтримання правильного рівня відносної вологості, аналітичний вираз для цього наведено нижче 0°C .

$$RH = \frac{P_{sat}(\text{Humidifier})}{P_{sat}(\text{Cell})}. \quad (2.4.6)$$

У всіх проведених експериментах комірка перебуває при фіксованій температурі, що означає, що відносна вологість підтримувалася шляхом зміни температури води в зволожувачах, через які проходить повітря. Можливий і зворотний варіант, що не впливає на розрахунки.

2.5 Розрахунок потоків води

Молярні швидкості подачі води до комірок n_{in}^a і n_{in}^c можна розрахувати за температурами зволожувача T_{ha} і T_{hc} . Щоб переконатися, що газ повністю насичений на виході зі зволожувача, використовували нижчу швидкість потоку газу, що надходить у зволожувач, і відповідно виміряли вхід і вихід за допомогою водного балансу.

$$n_{in}^a = n_{in}^{air} \times \frac{RH_a \times P_{sat}(T_{ha})}{(P - RH_a \times P_{sat}(T_{ha}))}; \quad (2.5.1)$$

де,

$$n_{in}^{air} = 310 \text{ ml/min} = 9.25 \times 10^{-4} \text{ mol/s}. \quad (2.5.2)$$

Ця швидкість потоку відповідала швидкості потоку, яка була б тут, якби в експериментах з паливними елементами використовувалася щільність струму $0,5 \text{ A/cm}^2$.

Аналогічно, для катода :

$$n_{in}^c = n_{in}^{air} \times \frac{RH_c \times P_{sat}(T_{hc})}{(P - RH_c \times P_{sat}(T_{hc}))}; \quad (2.5.3)$$

$$n_{in}^{air} = 310 \text{ ml/min} = 9.25 \times 10^{-4} \text{ mol/s}; \quad (2.5.4)$$

Молярну швидкість води на виході можна отримати за допомогою двох балансів, зваживши масу води, що конденсується і збирається на виході, поділену на час і молярну масу води за рівняннями 2.5.5 і 2.5.6.

На аноді :

$$n_{out}^a = \frac{(Wt \text{ of water collected by time (g) })}{\Delta t \times (M_{H_2O})}; \quad (2.5.5)$$

$$n_{out}^c = \frac{(Wt \text{ of water collected by time (g) })}{\Delta t \times (M_{H_2O})}. \quad (2.5.6)$$

Молярний потік води через мембрану n_m отримується шляхом встановлення балансу між витратою води на вході та виході з кожного боку з урахуванням втрат:

На аноді :

$$n_{in}^a - n_{out}^a - n_{in_{leakout}}^a - n_{out_{condense}}^a = n_m. \quad (2.5.7)$$

На катоді :

$$n_{in}^c - n_{out}^c - n_{in_{leakout}}^c - n_{out_{condense}}^c = -n_m. \quad (2.5.8)$$

Для розрахунків використовуються рівняння 2.5.7 і 2.5.8. Розглянемо рівняння 2.5.7: зволожене повітря схильне до двох втрат – конденсації та витоку, і цей ефект враховується. Рівняння 2.5.8 можна використовувати аналогічним чином, але знак потоку через мембрану змінюється на протилежний. У цьому випадку потік води через мембрану вважається позитивним від анода до катода.

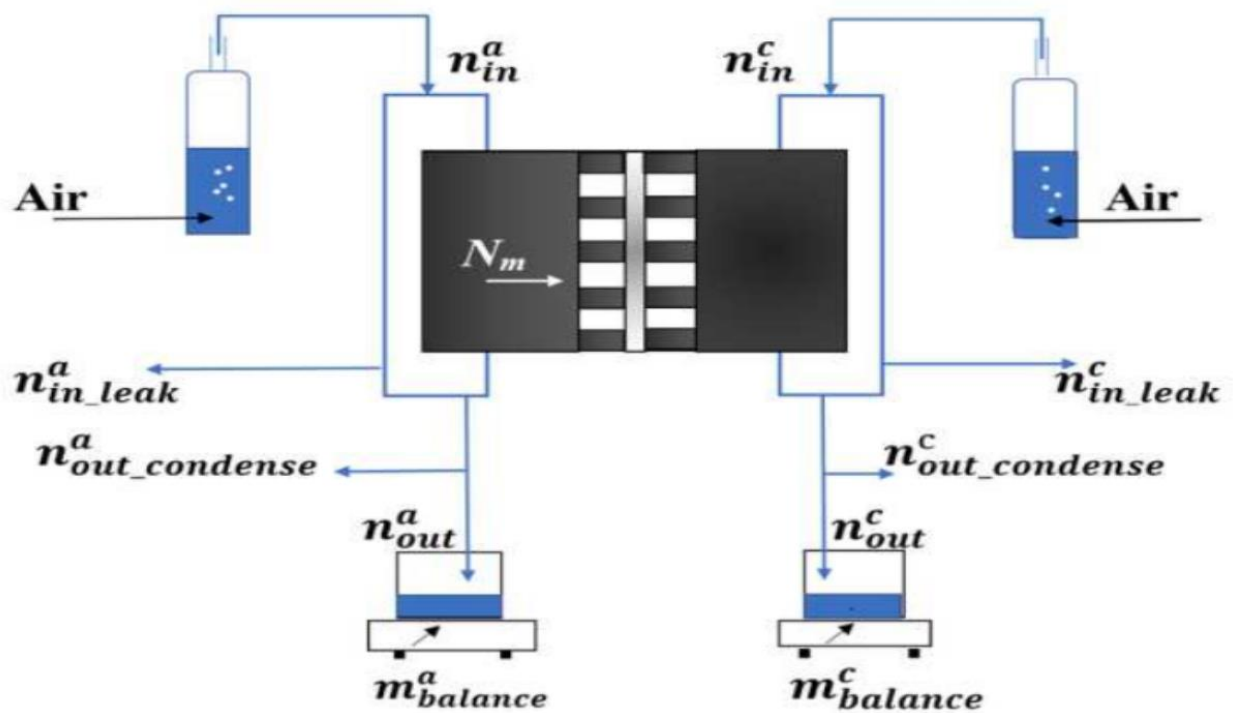


Рисунок 2.5.1: Експериментальна установка з втратами [73]

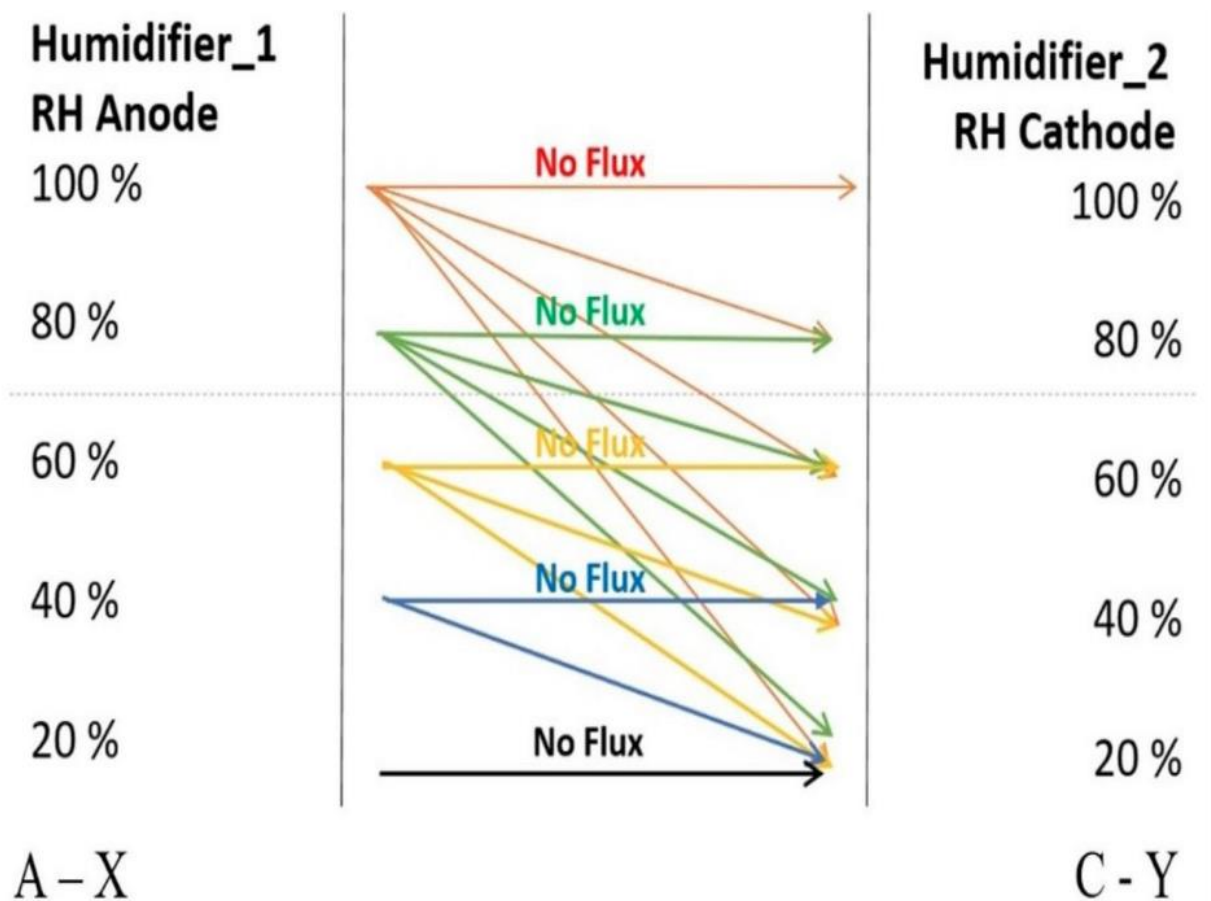


Рисунок 2.5.2: Випадки відносної вологості [73]

2.6 Аналіз ефективного коефіцієнта дифузії Nafion-211

Нижче приведені результати [73], пов'язані зі зміною коефіцієнта дифузії залежно від відносної різниці вологості та температури. Вміст води λ визначається як кількість молекул води до кількості присутніх сульфонових груп. Це важливий параметр, який впливає на ступінь зволоження в паливній комірці, а отже, сорбційна поведінка стає більш важливою, оскільки вона може визначати загальні транспортні та структурні властивості. На рисунку 2.6.1 показано вміст води в мембрані λ як функцію відносної вологості. Він надає дані про поглинання води мембранами Nafion. В [59] наведено результати щодо попередньої обробки мембрани та вплив температури сушіння на ізотерму сорбції на Nafion в діапазоні $30^\circ\text{C} < T < 80^\circ\text{C}$. Значення λ_{sat} значно змінюється залежно від умов попереднього сушіння.

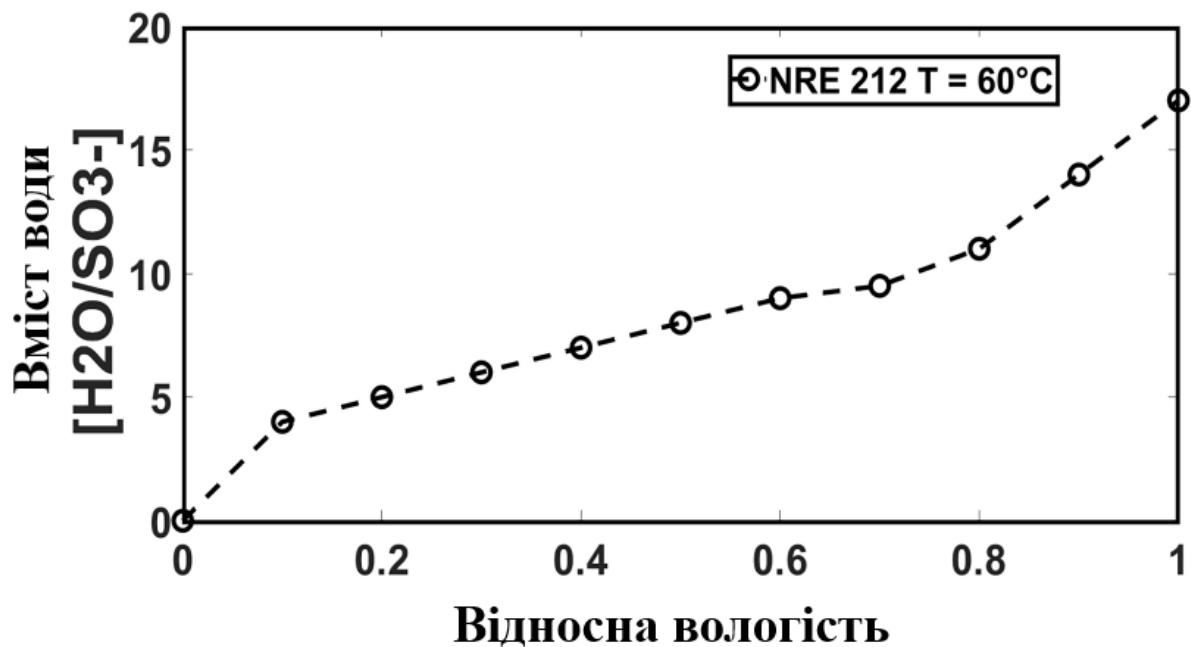


Рисунок 2.6.1: Крива поглинання Nafion NRE 212 при $T = 60^\circ\text{C}$, перемальована [59] [[73]]

Відомий вираз, наведений у [47], який враховує вплив щільності, еквівалентної ваги, потоку та поглинання, зображений у рівнянні 2.6.1, яке дає співвідношення для зв'язку потоку через мембрану з коефіцієнтом дифузії.

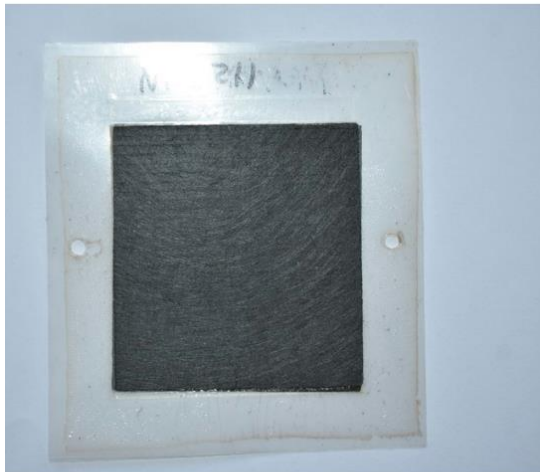
$$N_m = \frac{\rho}{EW} \times D_\lambda \times \frac{\Delta\lambda}{e_m}. \quad (2.6.1)$$

Видно, що N_m залежить від 5 факторів: ρ , EW , D_λ , $\Delta\lambda$ та e_m . У експериментах [73] буде виміряно N_m та розраховано D_λ . Для $\Delta\lambda = \lambda_a - \lambda_c$ використовується крива сорбції з рисунка 2.6.1. Насправді товщина мембрани залежить від відносної вологості та температури $e_m(RH, T)$, що може значною мірою впливати на результати дифузії, де

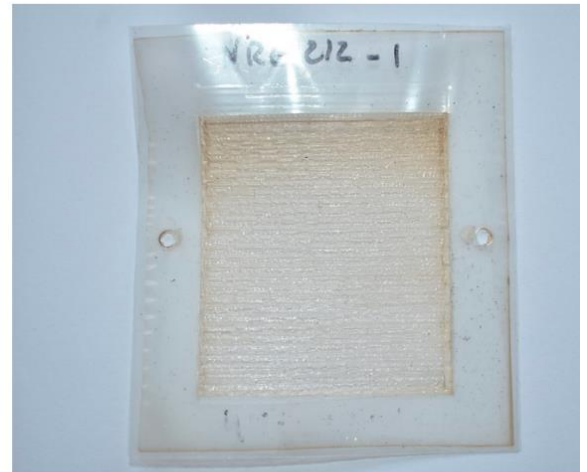
старіння може впливати як на набухання, так і на стискання мембрани [60]. Щільність мембрани змінюється і може мати різні значення за різних умов експлуатації [61], а старіння може впливати на щільність. Еквівалентна вага також може мати великий вплив на коефіцієнт дифузії [64]. Тут значення ρ , EW та e_m є фіксованими, оскільки є представлення простого методу для виведення D_λ для експериментальних умов та впровадження його в моделі. Значення, взяті для розрахунку, для ρ становлять 1250 кг/м^3 , для EW — 1100 г/моль , а для e_m — 29 мкм . Можна зазначити, що щільність потоку води ($\text{моль/м}^2/\text{с}$) через мембрану розраховується шляхом ділення виміряного потоку води на водний баланс на активну площу дифузії комірки. Щоб переконатися, що задіяна вся поверхня мембрани, були проведені вимірювання з пористим транспортним шаром між пластиною поля потоку та мембраною, і результати в цілому дають ті самі значення. Отже, можна зробити висновок, що в транспортуванні води задіяна вся поверхня мембрани.

$$N_m = n_m \times \frac{10^4}{s} \text{ mol/m}^2/\text{s}. \quad (2.6.2)$$

Для всіх розрахунків використовується 1-D гіпотеза для потоку води, що проходить до всієї площі для розподілу. У більшості випадків ця гіпотеза не є вірною. Загальна довжина серпантину, що бере участь у перерозподілі перед виходом з комірки, становить 1250 мм . Це матиме вплив на ефективну поверхню мембрани, що бере участь у переносі води, яка буде меншою, якщо перед виходом з комірки існує рівновага. Це означає, що 1D гіпотеза дещо занижує значення коефіцієнта дифузії (оскільки використовується загальна поверхня 25 см^2 (рівняння 2.6.2)). Особливо для випадків з відносною вологістю 20% 1D гіпотеза стає менш доречною і може бути розширена до 2D гіпотези. Були проведені первинні розрахунки, і в першому наближенні припускається, що ефект 2D враховується в наших розрахунках похибки, а результати при відносній вологості 20% схильні до більшої розбіжності через дуже низький вміст води.



а) Мембрана з GDL



б) Мембрана без GDL

Рисунок 2.17: Катіонні мембрани [73]

Похибка, спричинена $n_{in\ leak}^a$, $n_{out\ condense}^a$, враховується в кінцевому коефіцієнті дифузії, як показано в таблиці 2.7.1, для спрощення розрахунків.

2.7 Вплив різниці відносної вологості

Таблиця 2.7.1

Коефіцієнт дифузії при зміні відносної вологості [73]

Відносна вологість анодної та катодної секцій	Температура комірки – 70°C - Коефіцієнт дифузії (D_λ) cm^2/c	(N_m) $\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$
A20% - C40%	$1.58 \pm 0.40 \times 10^{-7}$	0.0006
A20% - C80%	$2.35 \pm 0.40 \times 10^{-7}$	0.0051
A20% - C100%	$1.60 \pm 0.33 \times 10^{-7}$	0.0081
A40% - C60%	$4.31 \pm 0.71 \times 10^{-7}$	0.0025
A40% - C80%	$1.79 \pm 0.26 \times 10^{-7}$	0.0031
A40% - C100%	$1.26 \pm 0.22 \times 10^{-7}$	0.0059
A60% - C80%	$3.78 \pm 0.64 \times 10^{-7}$	0.0044

У таблиці 2.7.1 для більшості випадків спостерігається збільшення коефіцієнта дифузії із збільшенням відносної вологості, що відповідає результатам досліджень інших вчених [63, 64, 65, 66, 67, 68]. У деяких випадках спостерігається зменшення, що може бути пов'язано з похибкою вимірювання. У всіх випадках отримані значення мають однаковий порядок $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{c}$, тому таблиця 2.7.1 дає загальне уявлення про значення коефіцієнта дифузії за методом водного балансу. На рисунку 2.7.1 показано зміну щільності потоку води за середньої відносної вологості при температурі 70°C. Можна помітити, що щільність потоку води збільшується із

збільшенням середньої відносної вологості, а при фіксованому значенні середньої відносної вологості щільність потоку води є вищою, коли різниця відносної вологості є вищою (через вищий градієнт маси).

На рисунку (2.8.1) показано графік коефіцієнта дифузії води, розрахованого за середнім вмістом води, і результати відповідають коефіцієнту дифузії води в стаціонарному стані в мембрані Nafion [69]. Значення знаходяться в діапазоні коефіцієнта дифузії в стаціонарному стані від 1×10^{-7} см²/с до 4×10^{-7} см²/с. Еволюція D_m з λ , здається, відповідає результатам [70], отриманим за допомогою спектроскопії з часовим розрізом, інфрачервоного перетворення Фур'є та загального відбиття [70].

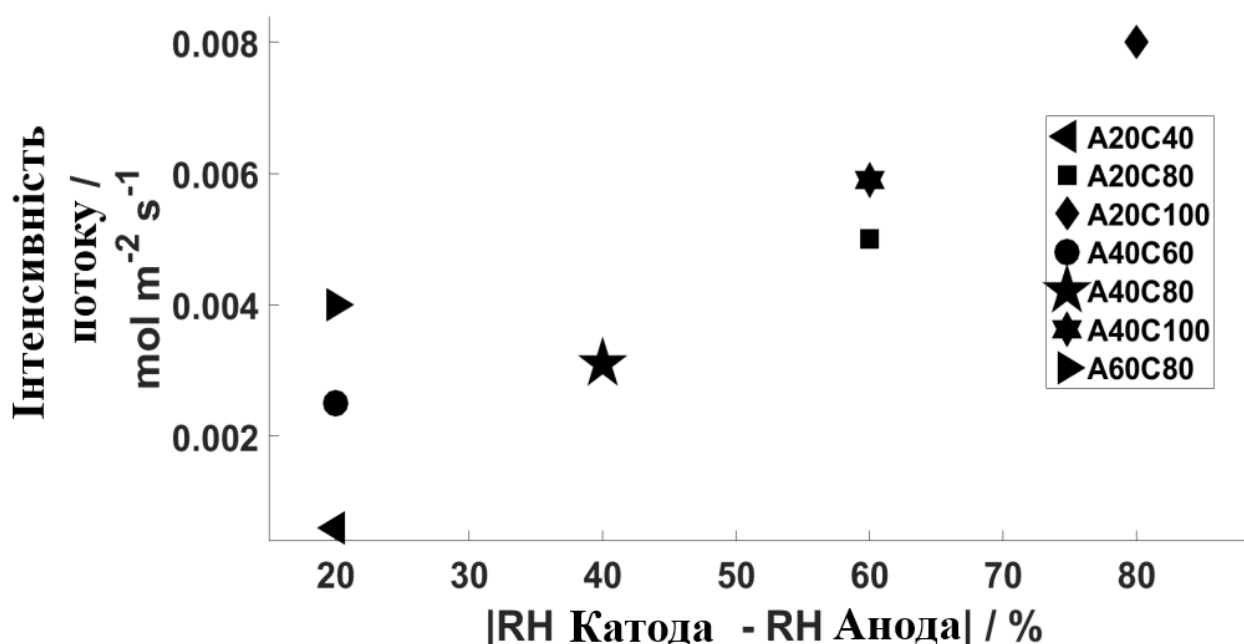


Рисунок 2.7.1: Графік щільності потоку води через мембрану в залежності від середньої відносної вологості при 70 °C.[73]

2.8 Вплив температури на мембрани Nafion 211

Для вивчення впливу температури проводяться експерименти при 60 °C і 70 °C, оскільки при цих температурах відбувається швидша конденсація води з помірним кроком зволоженого газу під час конденсації. З міркувань безпеки не проводилися роботи при температурі вище 80 °C, так само як і при температурі нижче 60 °C, оскільки конденсація води була б ускладнена і утворювалися б великі кроки.

У таблиці 2.8.1 наведено результати зміни коефіцієнта дифузії при температурі паливного елемента 60 °C і 70 °C. На основі отриманих результатів спостерігається збільшення коефіцієнта дифузії із підвищенням температури [71] виявили подібне збільшення дифузії води із підвищенням температури.

Порівняння коефіцієнта дифузії на основі температури комірки.[73]

Відносна вологість анодної та катодної секцій	Температура комірки – 60°C Коефіцієнт дифузії (D_λ) cm^2/c	Температура комірки – 70°C Коефіцієнт дифузії (D_λ) cm^2/c
A20% - C40%	$1.42 \pm 0.21 \times 10^{-7}$	$1.58 \pm 0.40 \times 10^{-7}$
A20% - C60%	$1.26 \pm 1.34 \times 10^{-8}$	$3.28 \pm 0.52 \times 10^{-7}$
A20% - C80%	$2.92 \pm 0.43 \times 10^{-7}$	$2.35 \pm 0.40 \times 10^{-7}$
A20% - C100%	$1.37 \pm 0.20 \times 10^{-7}$	$1.60 \pm 0.33 \times 10^{-7}$
A40% - C60%	$9.45 \pm 1.41 \times 10^{-7}$	$4.31 \pm 0.71 \times 10^{-7}$
A40% - C80%	$2.56 \pm 0.38 \times 10^{-7}$	$1.79 \pm 0.26 \times 10^{-7}$
A40% - C100%	$1.17 \pm 0.17 \times 10^{-7}$	$1.26 \pm 0.22 \times 10^{-7}$
A60% - C80%	$1.16 \pm 0.17 \times 10^{-7}$	$3.78 \pm 0.64 \times 10^{-7}$
A80% - C100%	$4.41 \pm 0.73 \times 10^{-8}$	$8.62 \pm 1.24 \times 10^{-8}$

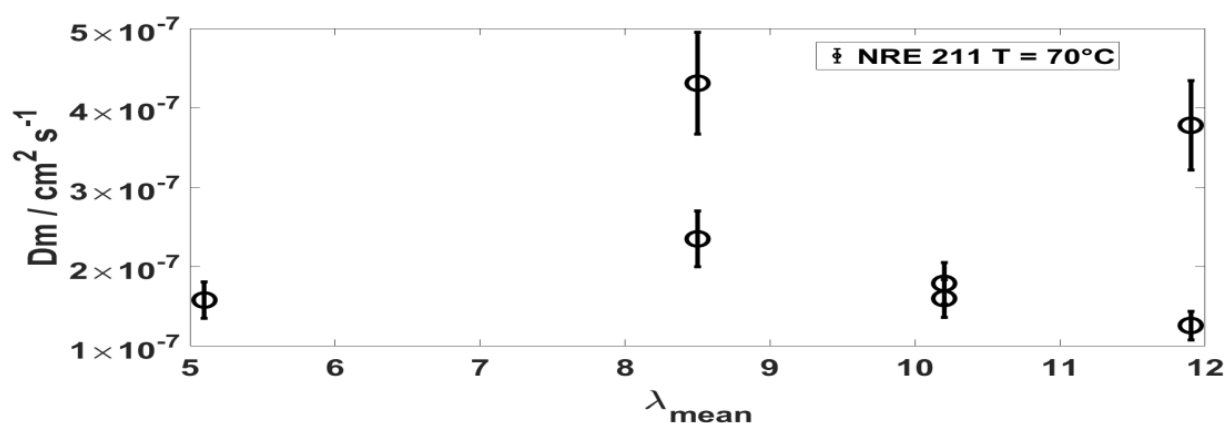


Рисунок 2.8.1: Графік коефіцієнта дифузії мембрани залежно від вмісту води та похибки [73]

Висновки до розділу 2

1. Проаналізовано зміну коефіцієнта дифузії для елементів паливних комірок залежно від відносної різниці вологості та температури.
2. Спостерігалось збільшення коефіцієнта дифузії із підвищенням температури.

Розділ 3.

Конструкція поля потоку

3.1 Конструкція поля потоку біполярних пластин

Конструкція поля потоку відіграє дуже важливу роль у розумінні транспортування реактивних речовин у паливний елемент. Неправильно спроектоване поле потоку не тільки впливає на транспортування (перенос маси) але й може призвести до неправильного управління водою в елементі. Добре сформульований розподіл площі та каналів може сприяти ефективному та раціональному розподілу струму та однорідному розподілу навантаження на мембранно-електродному блоці (МЕА). [74] надали детальний огляд, враховуючи розподіл різних конструкцій поля потоку та продуктивність паливних елементів з протонно-обмінною мембраною (PEMFC).

3.1.1 Паралельне та серпантинне поле потоку

Паралельне поле потоку (рис. 3.1.1(а)) та серпантинна геометрія (рис. 3.1.1(б)) є двома найбільш використовуваними для роботи паливних елементів, головним чином через простоту конструкції та легкість проектування. З цих двох найпростішою є геометрія з паралельним полем потоку. Завдяки наявності декількох каналів для розподілу реагентів вона забезпечує рівномірний розподіл і видалення води. Однак така конструкція має певні недоліки: якщо тиск не підтримується однаково у всіх каналах, це може призвести до нерівномірного розподілу реагентів і, отже, до нерівномірного потоку газу по каналах. Щоб подолати цей недолік, у серпантинній конструкції, яка також користується комерційною популярністю, реагенти направляються по конкретних каналах з використанням всієї площі каналів, що забезпечує рівномірний розподіл. Через більшу довжину каналів серпантинна геометрія страждає від більших втрат напору.

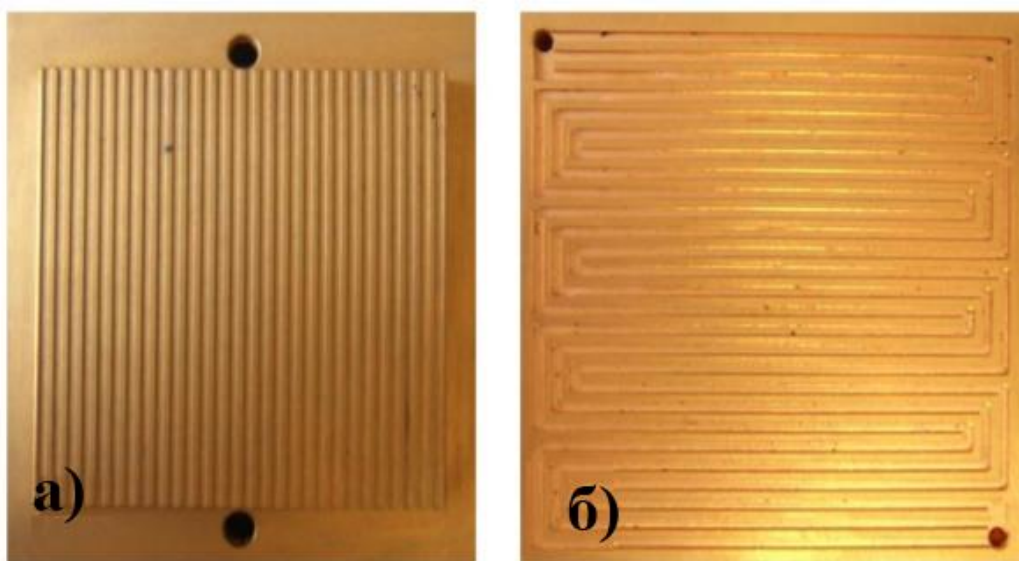


Рисунок 3.1.1.1: (а) Паралельна та (б) серпантинна геометрія поля потоку, запозичена з [58][73]

3.1.2 Інтердигітальний дизайн

Ці конструкції були проаналізовані, але не до кінця досліджені. Вони використовують концепцію потоку під ребрами. Традиційний серпантинний дизайн може транспортувати гази за допомогою дифузії, але інтердигітальний дизайн (рис. 3.1.3.1) може транспортувати за допомогою двох процесів: дифузії та примусової конвекції. Цей метод може збільшити масову передачу реагентних газів.

[75] працював над конструкцією розподілу газу для поліпшення масопереносу реагентів з каналів потоку до внутрішніх шарів каталізатора. Вони представили дослідження, в якому порівнювали конструкцію з паралельними прямими каналами з інтердигітальною, яка показала кращі характеристики в кривій поляризації (область масопереносу) порівняно з паралельною конструкцією. [76] провели дослідження продуктивності з інтердигітованими полями потоку і зрозуміли вплив температури комірки, зволоження газу, робочого тиску комірки і швидкості потоку реагентного газу на ці конструкції. На основі експериментальних умов ці конструкції працюють з хорошим зволоженням і підвищенням робочого тиску. Однією з переваг міжпальцевої конструкції є те, що вона запобігає затопленню. Оскільки вона використовує концепцію примусової конвекції, це призводить до примусового видалення води. Однак інтердигітовані конструкції можуть мати деякі недоліки, оскільки примусова конвекція може призвести до нерівномірного розподілу реагентів при дифузії газу. Інтердигітальні конструкції також можуть призвести до підвищення тиску в залежності від товщини газодифузійного шару. Чим більша товщина газодифузійного шару, тим більший тиск необхідний для проходження газів через GDL. При проектуванні інтердигітальних пластин важливу роль відіграють товщина і пористість газодифузійного шару [77].

3.1.3 Біоінспіровані поля потоку

Природа надихнула багато галузей на впровадження та розвиток інновацій, і паливні елементи є однією з таких галузей. Не є новиною, що жилки в листі (рис. 3.1.3.2(б)) здатні рівномірно переносити та розподіляти воду. Подібний випадок можна спостерігати у легенях (рис. 3.1.3.2(а)), основною функцією яких є ефективний розподіл повітря та видалення CO_2 . Натхненні природою для розробки нових конструкцій полів потоку, [78] (рис. 3.1.3.2) працювали над біоінспірованими конструкціями каналів, натхненими природою, гібридизацією серпантину та інтердигітованих каналів. Було спостерігано збільшення щільності потужності при $T = 75^{\circ}C$ та відносній вологості (RH) від (100% до 30%). [79] продовжили роботу в області паливних елементів, натхнених легенями, розробивши модель паливного елемента з кінцевими елементами, що імітує поле

потіку легенів. Згідно з результатами, поля потоку, натхненні легенями, ефективно виконують завдання зменшення швидкості та гомогенізації концентрації реагентів перед входом у каталітичний шар. Ключовим фактором ефективності є хороший потік без мертвих зон у каналах, ефективний розподіл реагентів та менші перепади тиску.

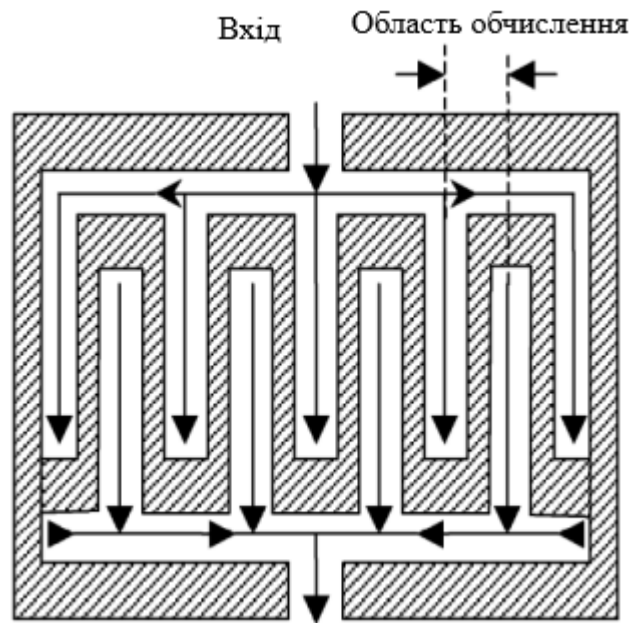
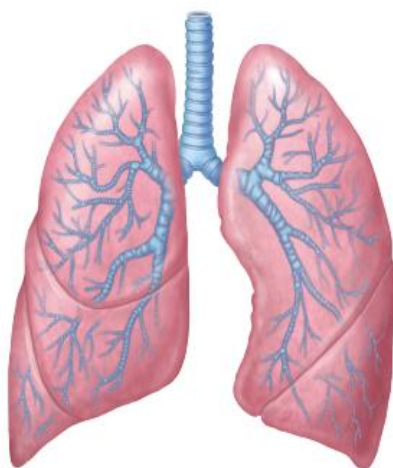
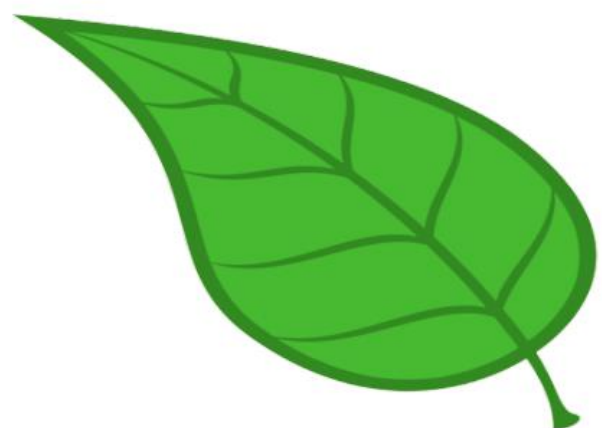


Рисунок 3.1.3.1: Конструкція поля потоку з перехресними каналами, запозичена з [73]



а) Легені



б) Листок

Рисунок 3.1.3.2: Біоінспіровані конструкції [73]

3.1.4 Інші конструкції в літературі

Окрім традиційних конструкцій, біоінспірованих, інтердигітованих, були розроблені й інші, серед яких кругові та спіральні геометрії. [80] досліджували конструкцію поля потоку з урахуванням спіральної геометрії (рис. 3.1.4.2) з меншою площею, враховуючи стандартну площу серпантинових пластин (25 см^2). Модуль Ansys (Fluent PEMFC) був використаний для дослідження ефективності спіральної конструкції. Метою дослідження [82] було визначення доцільності використання круглої форми PEMFC зі спіральною конструкцією поля потоку. Розроблена 3D-модель спрямована на розуміння електрохімічних явищ переносу, таких як розподіл газів, температури та тиску. Згідно з отриманими результатами, втрати напору тиску менші порівняно з серпантинною геометрією та більші порівняно з геометрією паралельних пластин. [81] надав чисельне рішення з використанням спіральної геометрії каналу потоку. За допомогою коду обчислювальної гідродинаміки, схеми скінченних об'ємів, було змодельовані різні конфігурації потоку від 4 до 12 каналів з кратним числом 4, причому конструкція з 12 каналами показала максимальну ефективність і вищий перепад тиску. Збільшення швидкості водню на вході може підвищити вихідну продуктивність комірки. Порівняння щільності струму на вході паливної комірки в одній і тій же позиції показує, що вона найвища для радіальної геометрії в порівнянні зі спіральною і серпантинною. [82] (рис. 3.1.4.2) досліджували вплив геометрії спірального каналу потоку у формі 1, 2, 3, 4, 6 і 8 концентричних спіралей. Результати були змодельовані за допомогою тривимірної неізотермічної моделі, яка прогнозувала вміст води та ентропію, що утворюються у всіх зонах всередині комірки. Канал з 4 спіралями демонструє максимальну ефективність з меншим падінням ентропії. Розробка чисельних моделей є трудомістким процесом, а робота з реальними пластинами паливних комірок є дорогою, що додатково залежить від типу використовуваного металу та методу виготовлення, тому існує потреба у пошуку інших альтернатив для геометрії потоку, які можна оптимізувати. [83] розробили метод з використанням топологічної оптимізації для проектування поля потоку PEMFC, що призвело до нетривіальних оптимізованих геометрій. Цільовою функцією є оптимізація як однорідності розподілу щільності струму, так і вихідної потужності, що дозволяє знизити витрати та підвищити довговічність. Метою цієї роботи або цільовою функцією було максимізувати як розподіл щільності струму, так і однорідність.

Дослідження не обмежуються лише прямокутною геометрією паливних елементів, а поширюються також на круглу геометрію. [84] розробили циліндричні паливні елементи, тим самим усунувши використання біполярних пластин. Ця циліндрична конструкція має певні переваги,

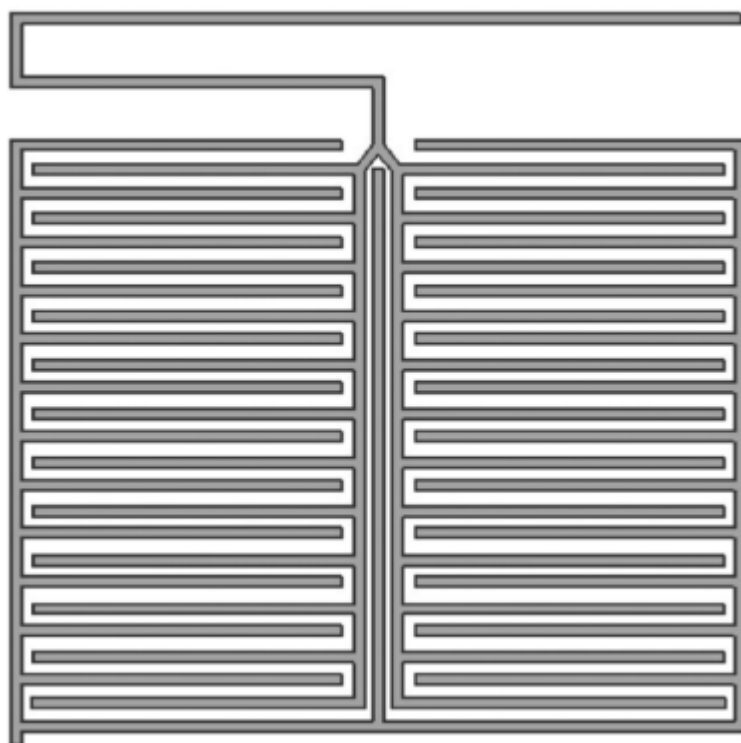


Рисунок 3.1.4.1: Конструкція поля потоку, що надихається легеннями, запозичена з [78]

такі як усунення витрат на обробку біполярних пластин, загальне зменшення власної ваги. Вони забезпечують більш просте та ефективне управління водою в порівнянні з традиційними паливними елементами на практиці. Однак конструкція циліндричного паливного елемента може бути простою, але його виготовлення є складним. Деякі важливі результати, що стосуються продуктивності циліндричного паливного елемента, — це зменшення контактного опору з 75 МіліОм до 50 МіліОм. Збільшення напруги розімкнутого ланцюга (OCV) з 0,85 В до 0,95 В. Збільшення OCV може бути ознакою низьких втрат активації. Крім того, спостерігалось біля 40% збільшення пікової потужності завдяки оптимізації швидкості потоку водню та ширини катодного ребра. Завжди існує потреба в оптимізації конструкції паливного елемента, тому нові конструкції та методи дійсно допомагають зрозуміти реалістичність та знайти нові рішення. Оптимізація швидкості потоку водню за допомогою правильно спроектованого каналу є одним із таких пріоритетів, оскільки це безпосередньо призведе до зниження витрат.

Окрім дизайну, було проведено багато роботи з метою оптимізації геометричних параметрів серпантинного дизайну. Наприклад, були проведені дослідження з метою оптимізації конструкції поля потоку серпантину.

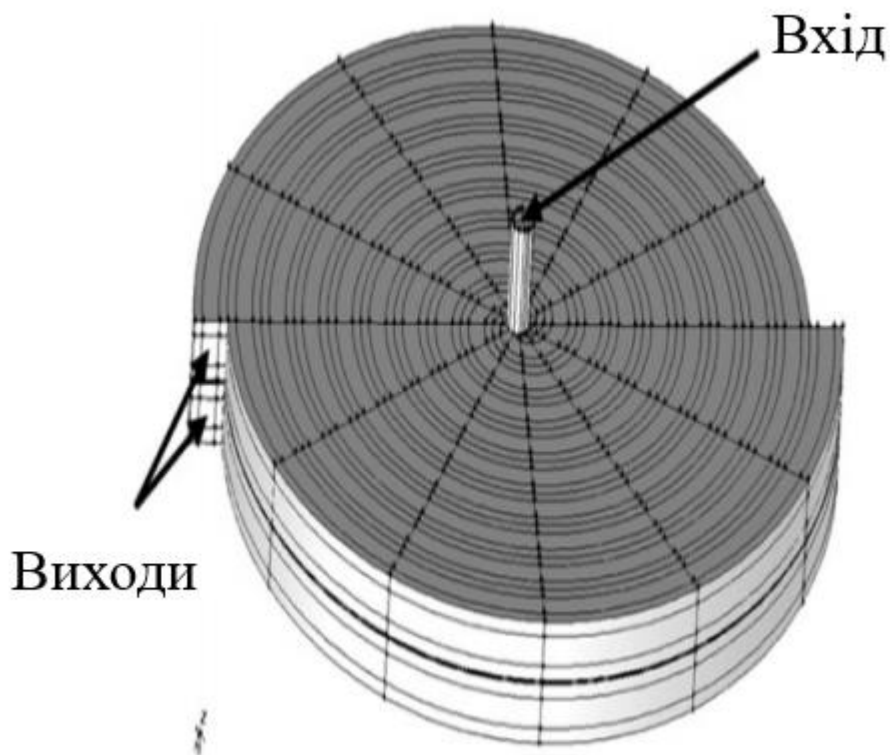


Рисунок 3.1.4.2: Конструкція поля потоку, що надихається легеннями, запозичена з [85][73]

Одним з найважливіших є зменшення втрат напору. Одним з можливих рішень є використання декількох каналів (рис. 3.8). Використання декількох каналів не означає використання паралельної геометрії поля потоку, а використання декількох каналів з уже існуючою серпантинною конструкцією. [86] показали, що паливні елементи з коротшою довжиною шляху забезпечують більш рівномірний розподіл струму. У статті досліджується, як серпантинні поля потоку площею 200 см² з різною кількістю газових шляхів, а отже, і різною довжиною газових шляхів, впливають на продуктивність і розподіл. Ця варіація газового шляху і довжини також призвела до більш ефективного видалення води в порівнянні з довгою одинарною геометрією.

Були проведено розрахунки в [73] по полю потоку

- а) 3-канальне багатоканальне серпантинне поле потоку
- б) 6-канальне багатоканальне серпантинне поле потоку
- в) 13-канальне багатоканальне серпантинне поле потоку
- г) 26-канальне багатоканальне серпантинне поле потоку

г) 26-канальне багатоканальне симетричне серпантинне поле потоку

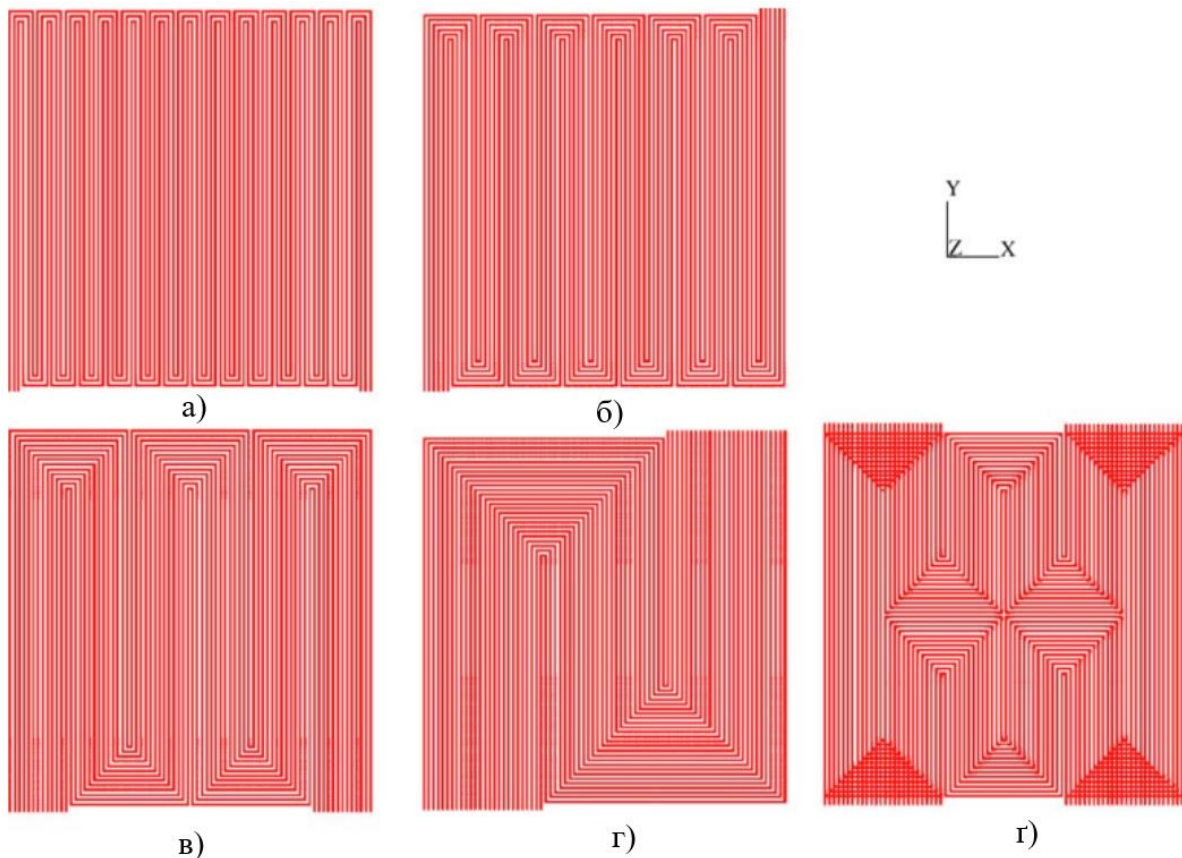


Рисунок 3.1.4.3: Багатосерпантинна конструкція з а) 3-канальним б) 6-канальним в) 13-канальним г) 26-канальним і г) 26-канальним складним полем потоку, взятим з [86][73]

Всі розрахунки були зроблені на основі комірки, що мала активну площу 200 см^2 . Було також зроблено висновок, що 13-канальний шлях потоку показав кращі результати в порівнянні з 26-канальним. Сучасні комерційні паливні елементи в основному використовують багатоканальні змієподібні пластини для підвищення продуктивності. [87] експериментально досліджували зигзагоподібні пористі вставки на поверхні ребер катодного потокового каналу для підвищення продуктивності. Вони експериментували з конструкціями ВРР, змінюючи пористість вуглецевих вставок в діапазоні (60 – 70)%, (70–80) % та (80–90) % відповідно. Ці пористі вставки з пористістю (80–90) % покращили щільність потужності та щільність струму на 11,5 % та 7 % відповідно порівняно зі звичайним серпантинним каналом. Концепція та ідея, що лежать в основі цього, полягають у покращенні видалення води за допомогою капілярної дії. Пористі вставки на ребрах допомагають видаляти застоюну воду, тим самим підвищуючи ефективність паливного елемента.

Висновки до розділу 3

1. Геометрія полів потоку катодної сторони PEMFC суттєво впливає на втрати тиску, рівномірність подачі кисню та ефективність відведення тепла і води, що визначає енергоефективність роботи стеку.
2. Поля потоку анодної сторони переважно забезпечують стабільний і рівномірний розподіл водню та мають проектуватися з урахуванням мінімізації гідравлічних втрат і забезпечення надійності електрохімічних процесів.

РОЗДІЛ 4

Проектування поля потоку паливної комірки в програмному середовищі SolidWorks.

4.1 Проектування поля потоку

В даному розділі показано 9 пластин, котрі було створено в програмному середовищі SolidWorks, Generation 1, 2, 3, 4, 5 у формі плюса “+” та 4 шт. проміжних з перехідними отворами. Подібне поле потоку, але зі структурою “Н” (на рис. 4.1.1) було створено в Університеті "University College London" (UCL), Великобританія і описано в роботі «Електротермічне дослідження паливних комірок з полімерною електролітною мембраною і фрактальним полем потоку»[72]. Сама паливна комірка, схема складання та основні компоненти показано на рис. 4.1.2. До основних компонентів входить: МЕА, катодний і анодний струмоприймач, картографічна пластина (S++) (для зняття значень сили струму і температури), анодне і катодне поле потоку, катод і пластина та анод і пластина.

Подібна конструкція даних пластин з таким розгалуженням дає позитивні результати в порівнянні в простому підведенні повітря до мембрано-електродної збірки так як підвищується продуктивність (вища електрична потужність) та не відбувається застій води, бо витісняється разом з нагрітим повітрям в ході електрохімічних реакцій. Матеріалом для виготовлення пластин є шарувата друкована плата (PCB). Особливість даних конструкцій в тому, що потік повітря має вхід в один отвір, а потім проходячи через розгалуження в пластинах Generation 1, 2, 3, 4, 5 та 4 шт. проміжних виходить в катодний струмоприймач. Нижче показано 9 пластин в програмному середовищі SolidWorks та в зборі (рис. 4.1.12 та рис. 4.1.13) і з перерізами (рис. 4.1.14).

На рис. 4.1.3 показано пластинку першої генерації у формі плюса “+”. На даній пластинці з канала де проходить кисень, є вхід до центра пластини, де йде розгалуження на чотири сторони. Потім кисень проходить через проміжну пластину між першою і другою генерацією (рис. 4.1.4) і потрапляє в пластину другої генерації через чотири отвори. На пластині другої генерації (рис. 4.1.5) кисень потрапляє з чотирьох отворів і має знов розгалуження на чотири сторони. Потім кисень проходить через проміжну пластину між другою і третьою генерацією (рис. 4.1.6) і потрапляє в пластину третьої генерації через шістнадцять отворів. На пластині третьої генерації (рис. 4.1.7) кисень потрапляє з шістнадцяти отворів і має знов розгалуження на чотири сторони. Потім кисень проходить через проміжну пластину між третьою і четвертою генерацією (рис. 4.1.8) і потрапляє в пластину четвертої генерації через шістдесят чотири отворів. На пластині четвертої генерації (рис. 4.1.9) кисень потрапляє з шістдесяти чотирьох отворів і має знов розгалуження на чотири сторони. Потім кисень проходить через проміжну пластину між четвертою і п'ятою генерацією (рис. 4.1.10) і потрапляє в пластину п'ятої генерації через двісті п'ятдесят шість отворів. На пластині п'ятої генерації (рис. 4.1.11) кисень потрапляє з шістдесяти чотирьох отворів і має знов розгалуження на чотири сторони.

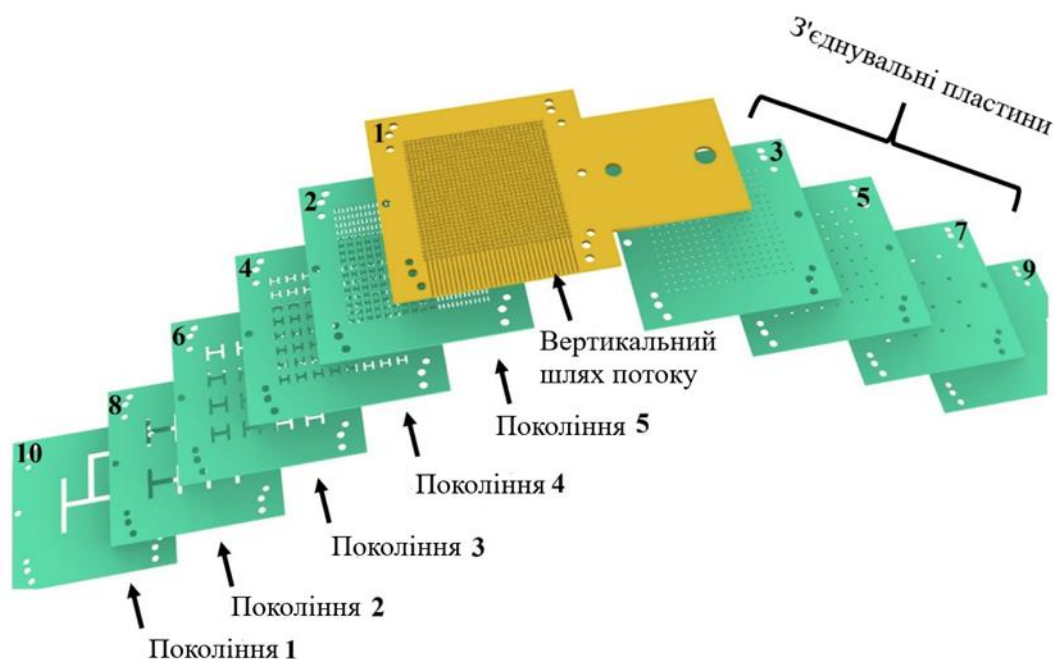


Рисунок 4.1.1: Схематичний план і порядок розташування 2D плоских друкованих плат (покоління і сполучні пластини), що використовуються для розробки 5-поколінної катодної фрактальної пластини з полем потоку. Пластина 1: покрита золотом; пластини 2 – 10: звичайні друковані плати[72]

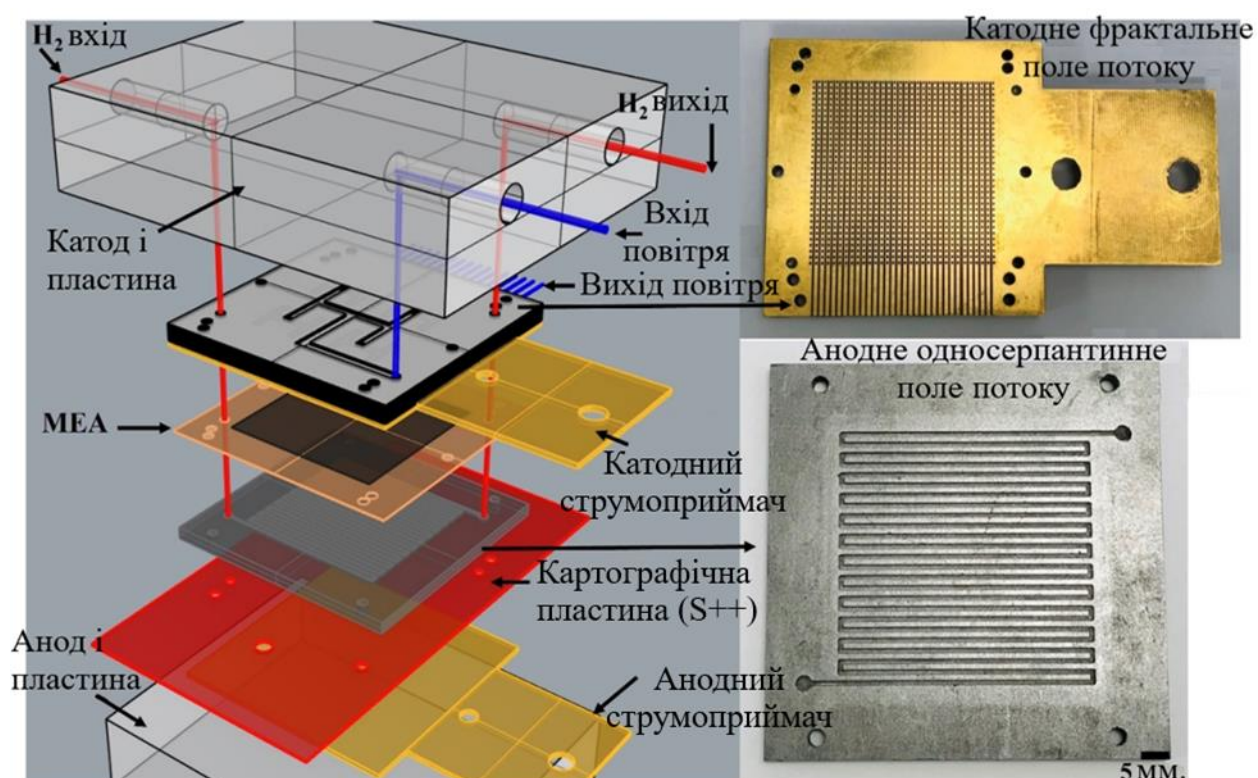


Рисунок 4.1.2: Схема складання та основні компоненти, використані в протестованих PEMFC [72]

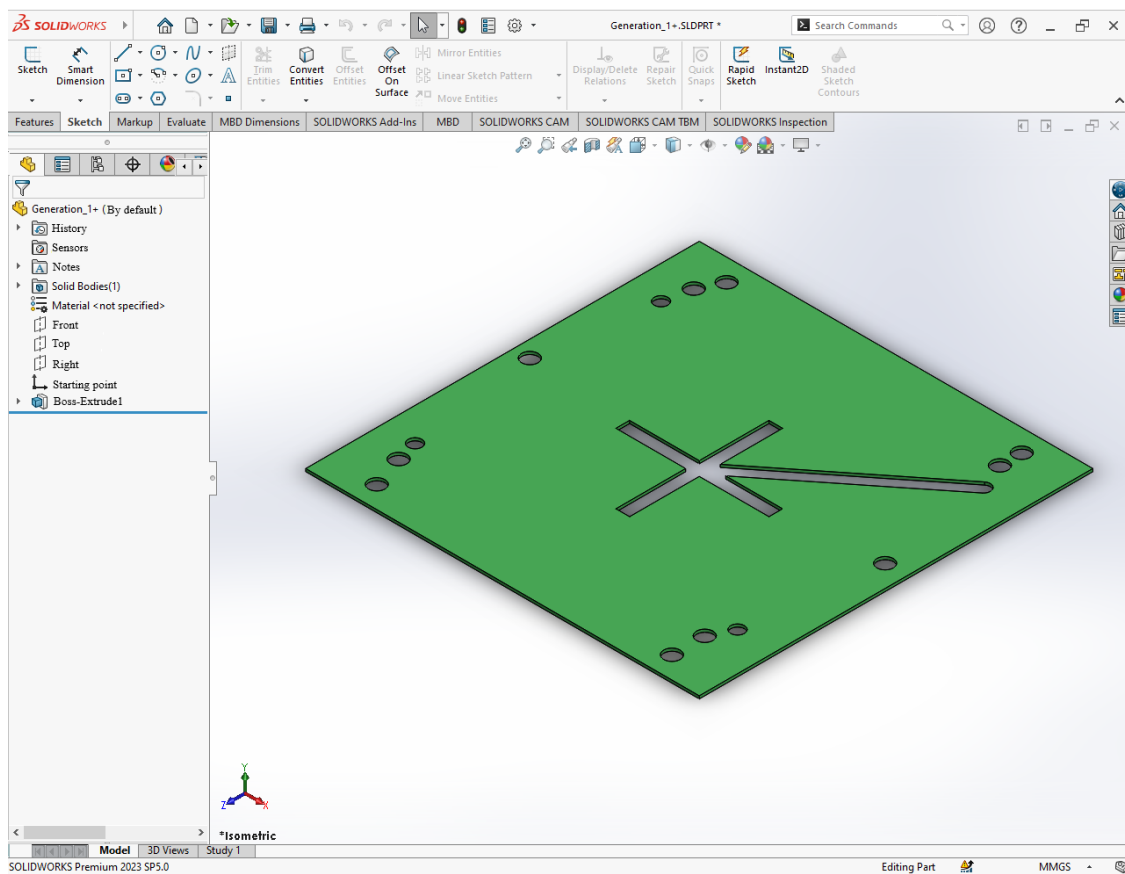


Рисунок 4.1.3 Пластина Generation 1

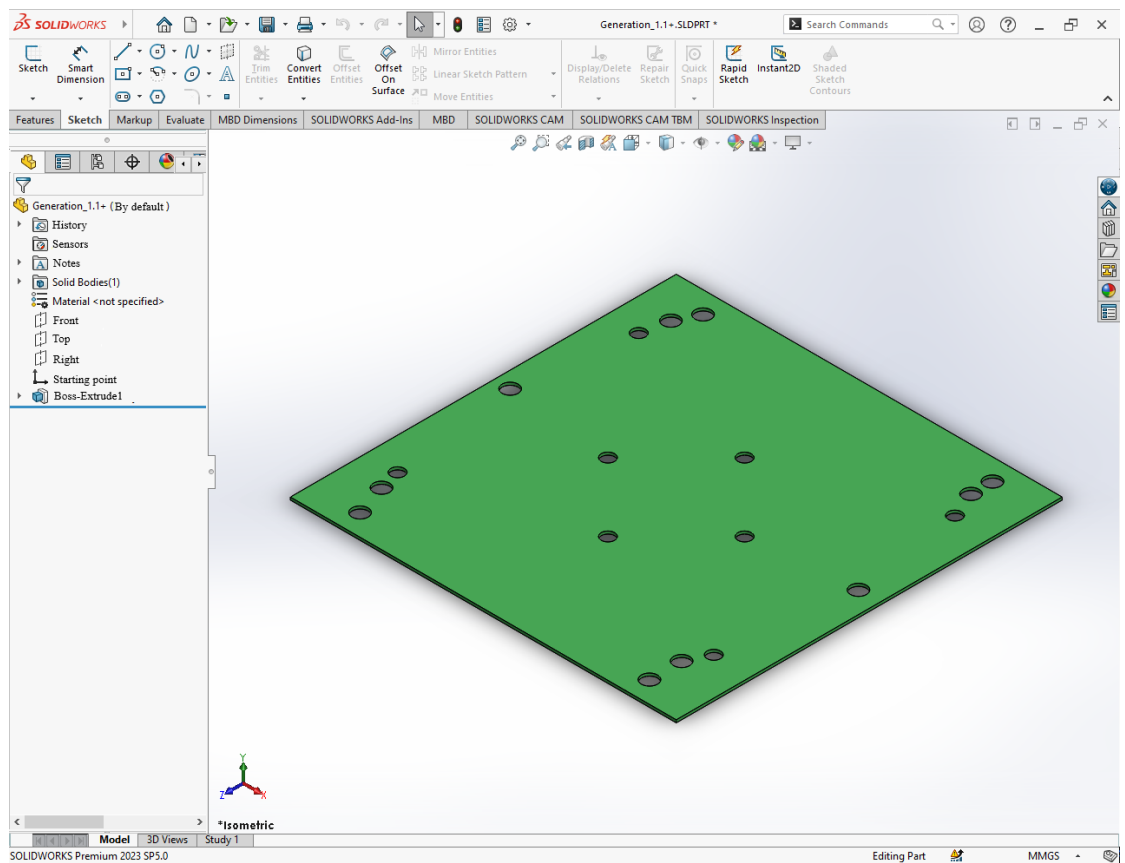


Рисунок 4.1.4 Проміжна пластина між пластинами Generation 1 і Generation 2

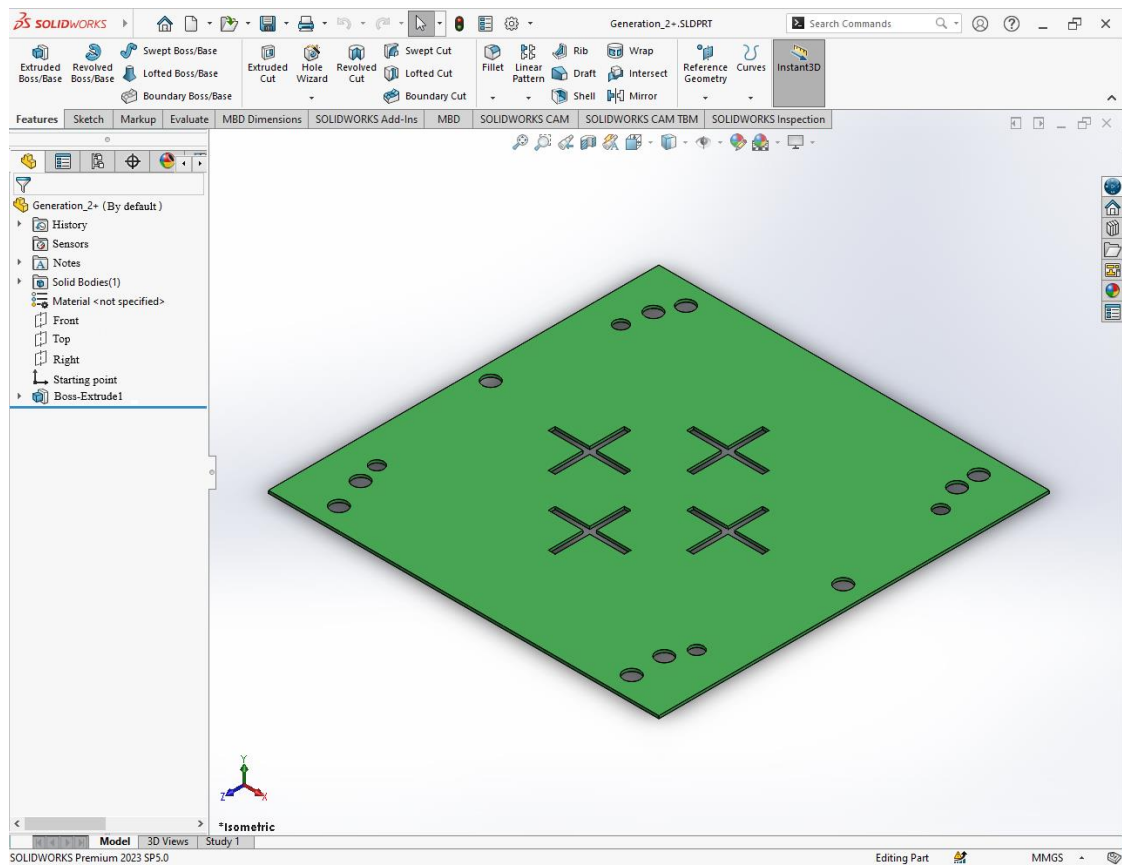


Рисунок 4.1.5 Пластина Generation 2

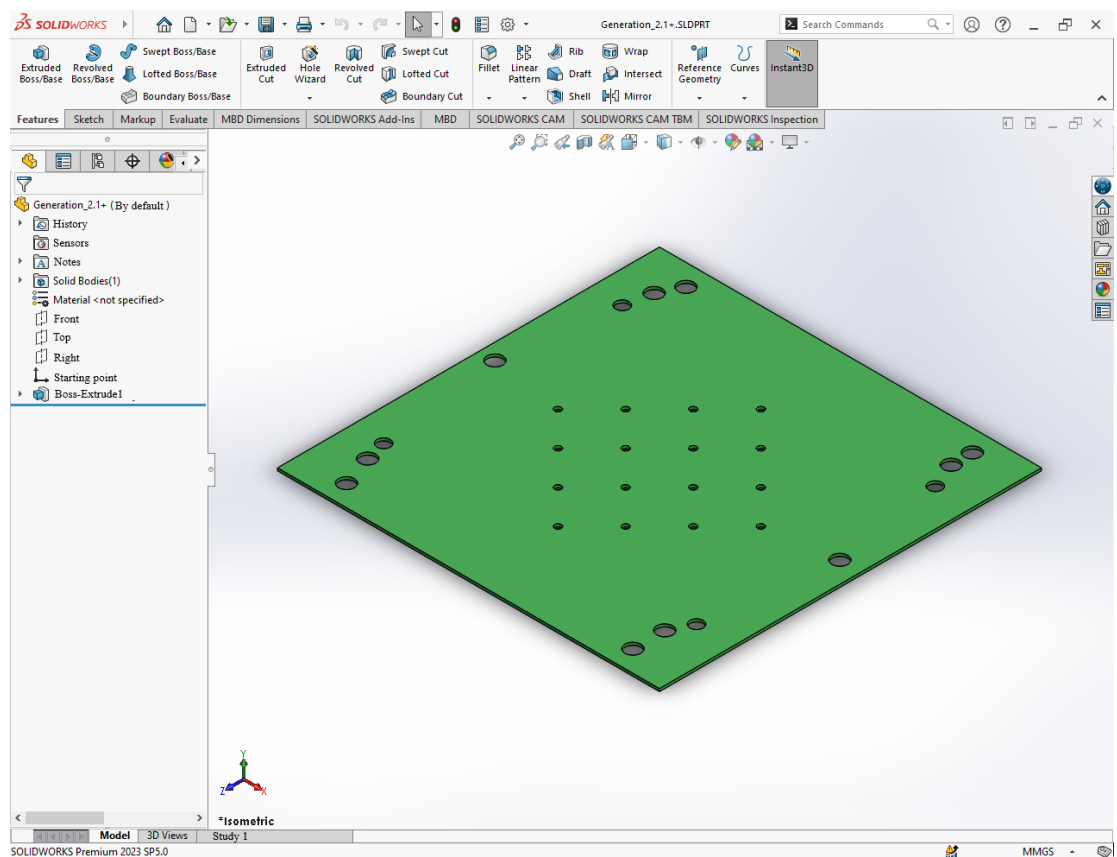


Рисунок 4.1.6 Проміжна пластина між пластинами Generation 2 і Generation 3

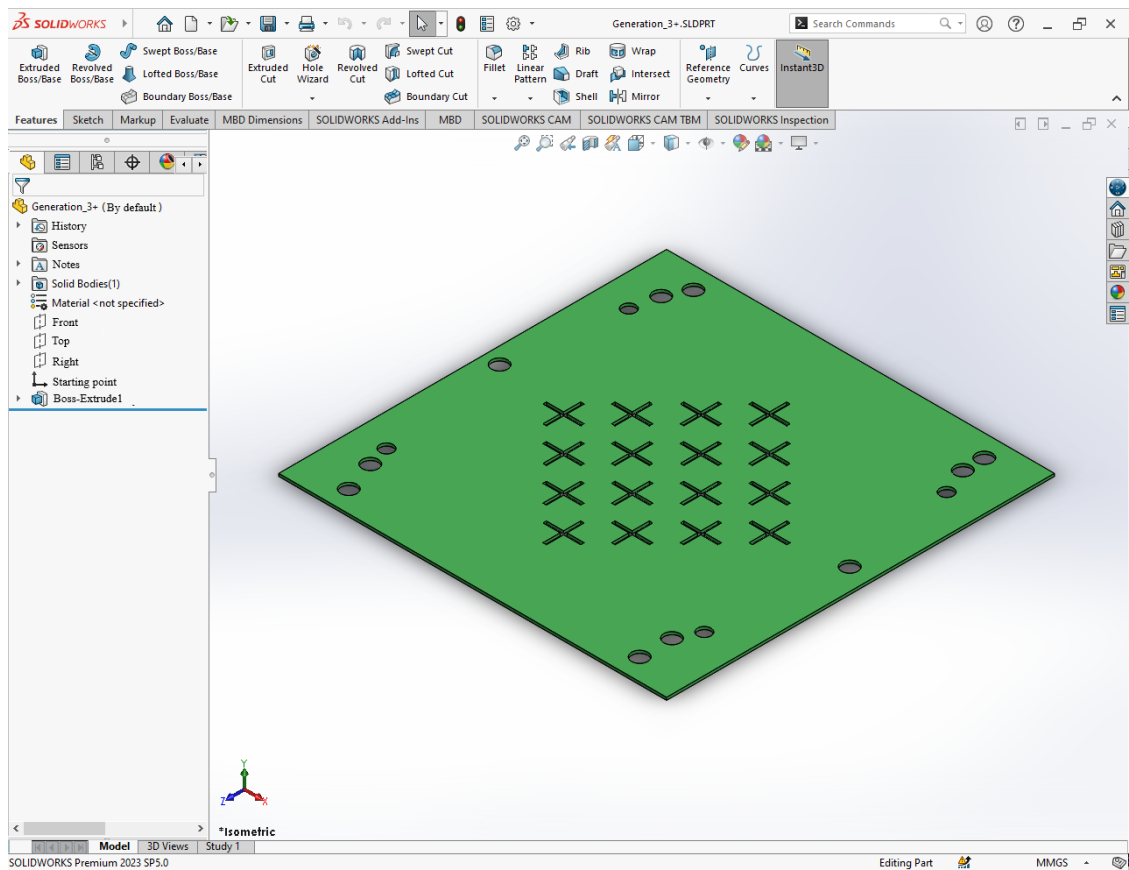


Рисунок 4.1.7 Пластина Generation 3

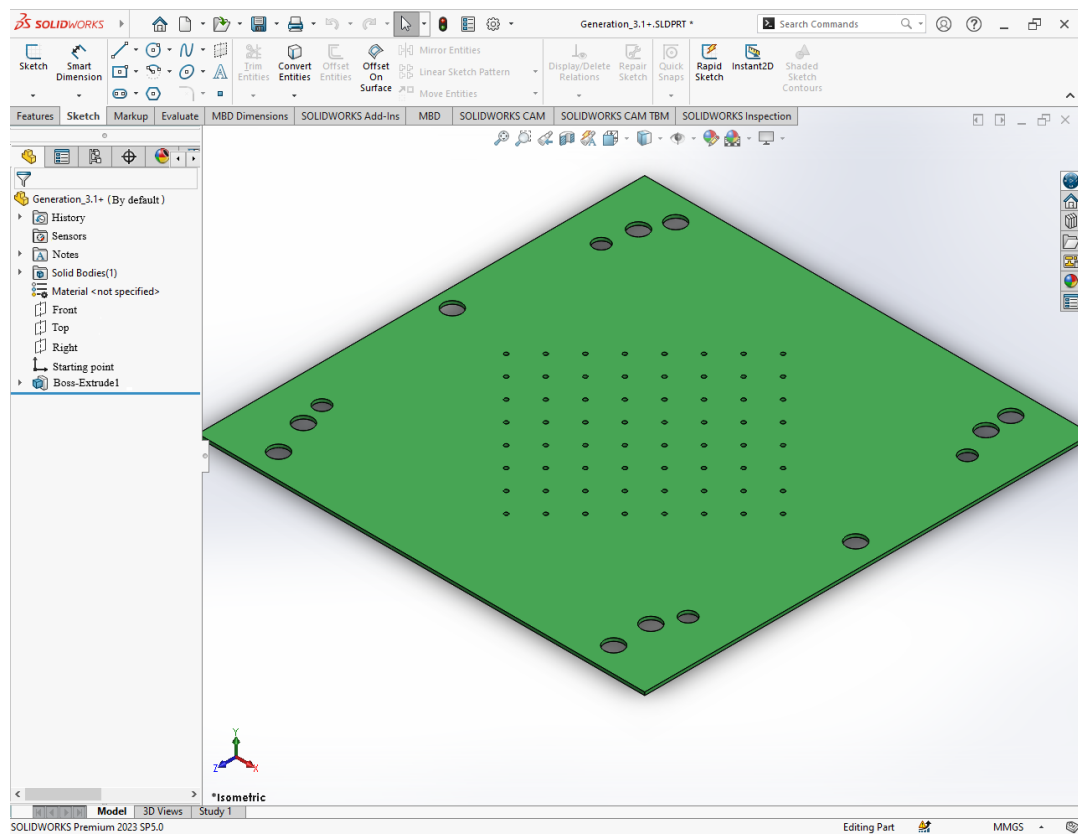


Рисунок 4.1.8 Проміжна пластина між пластинами Generation 3 і Generation 4

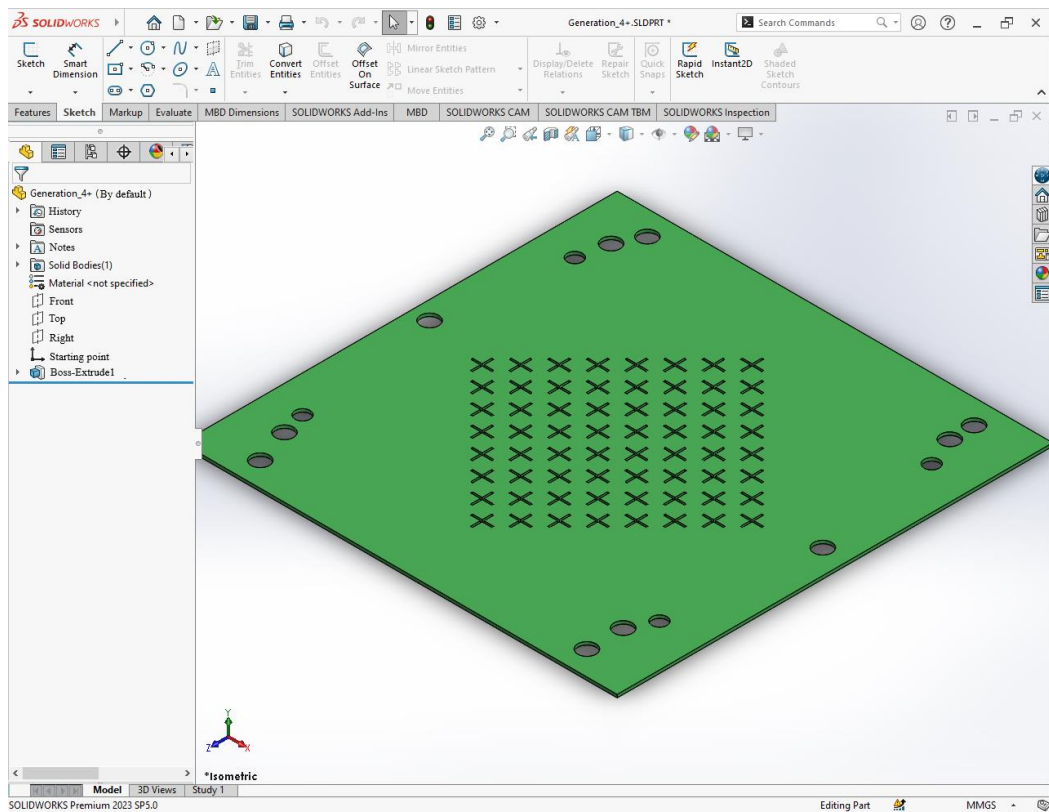


Рисунок 4.1.9 Пластина Generation 4

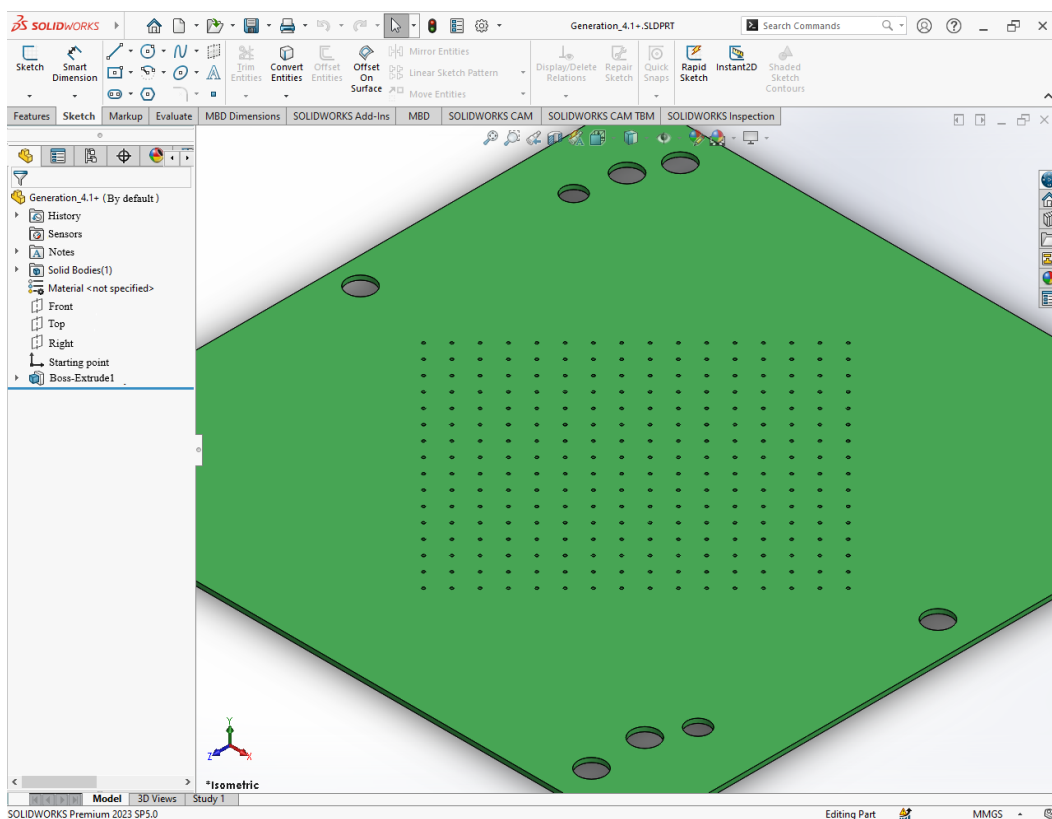


Рисунок 4.1.10 Проміжна пластина між пластинами Generation 4 і Generation 5

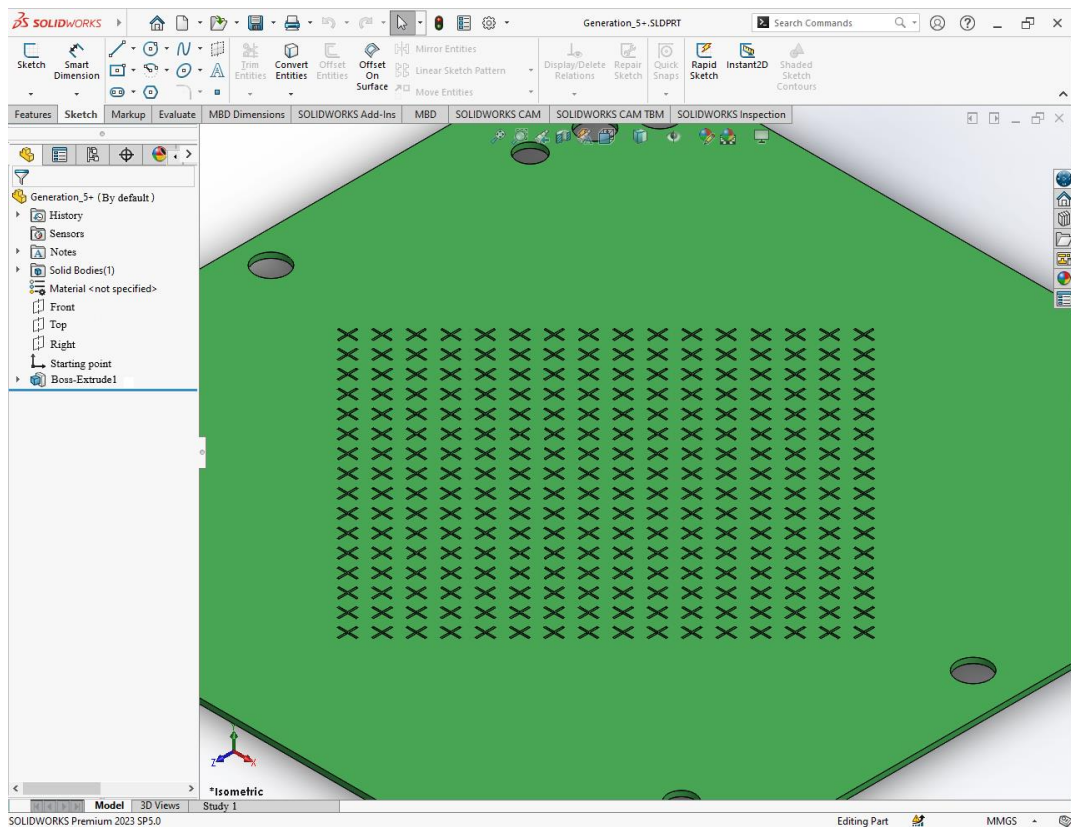


Рисунок 4.1.11 Пластина Generation 5

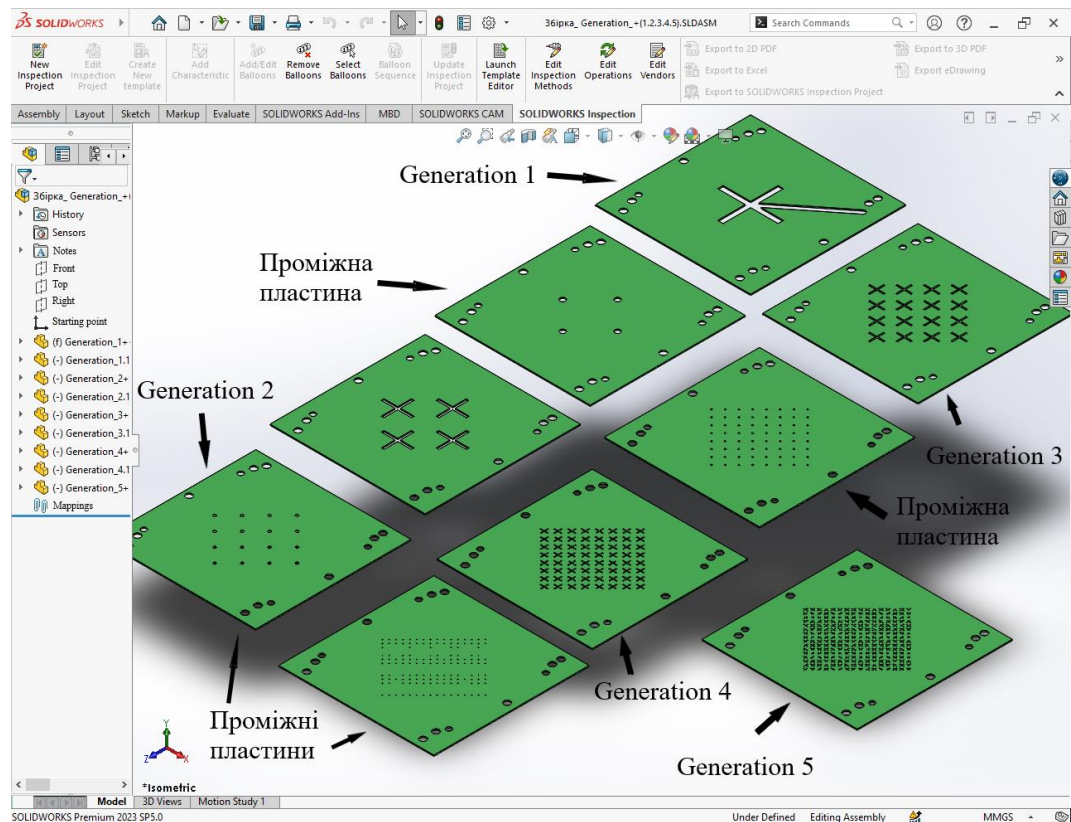


Рисунок 4.1.12 Збірка з Generation (1,2,3,4,5) та проміжкові пластин окремо

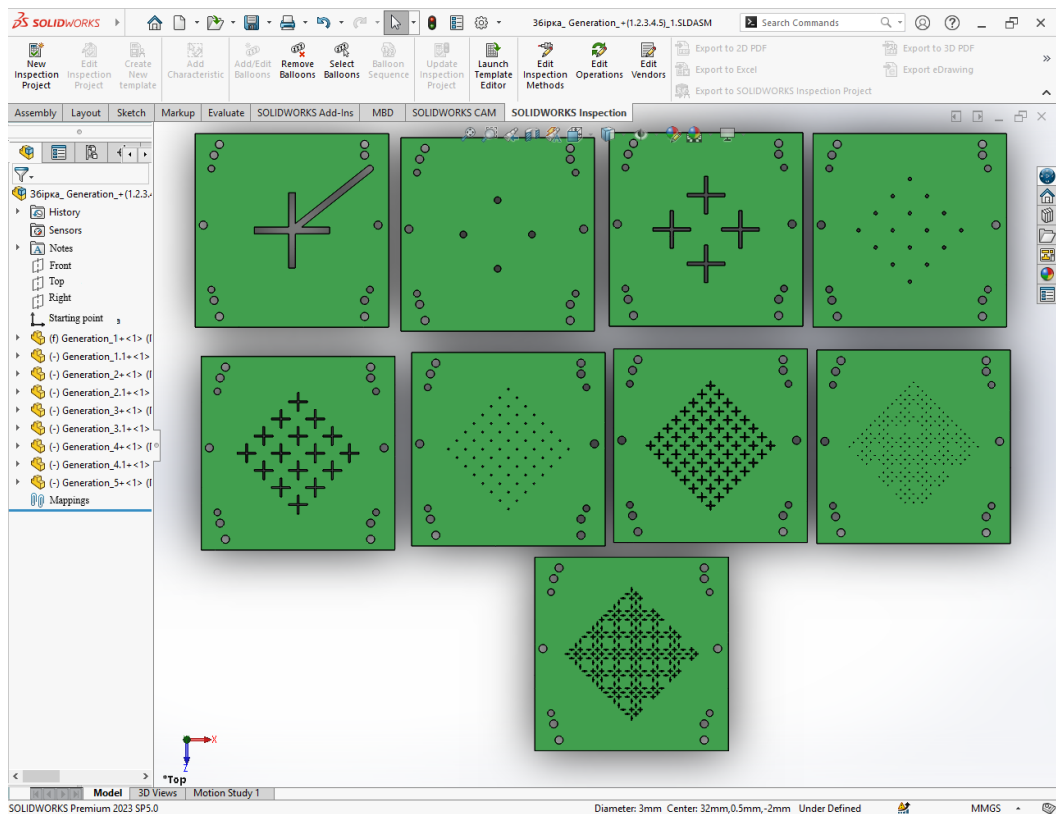


Рисунок 4.1.13 Збірка з Generation (1,2,3,4,5) та проміжкові пластин окремо (вигляд зверху)

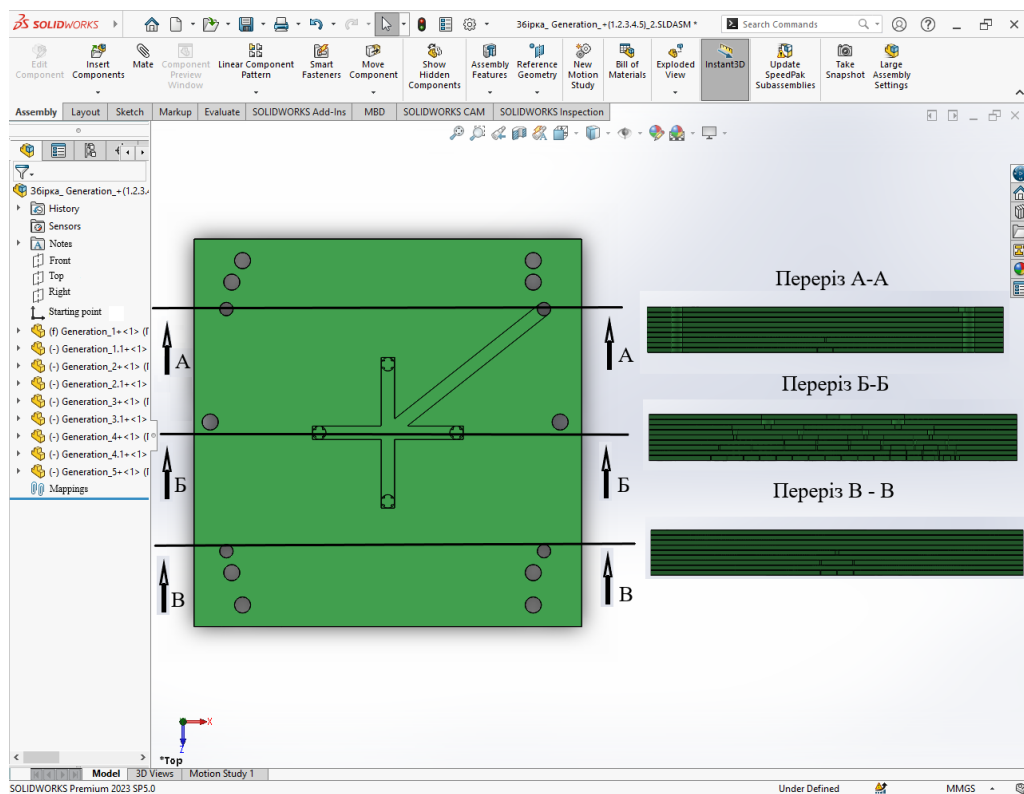


Рисунок 4.1.14 Збірка з Generation (1,2,3,4,5) та проміжкові пластин з перерізами (вигляд зверху)

4.2 Розрахунки та порівняння

В табл. 4.2.1 показано довжини потоку повітря всіх генерацій і проміжних пластин для форми (H) поля потоку катода паливної комірки [72] і для форми (+) поля потоку катода паливної комірки.

Таблиця 4.2.1

Довжини потоку повітря (Додаток А)

Назва пластини	Довжина у формі (H)	Довжина у формі (+)	Різниця
Generation 1	$29 + 23 + 12,75 + 11,75 = 76,50$ мм	$37,01 + 14 = 51,01$ мм	25,49 мм
Проміжна між 1 і 2	1 мм	1 мм	0
Generation 2	$6,35 + 5,88 = 12,23$ мм	6,38 мм	5,85 мм
Проміжна між 2 і 3	1 мм	1 мм	0
Generation 3	$3,19 + 2,94 = 6,13$ мм	3,18 мм	2,95 мм
Проміжна між 3 і 4	1 мм	1 мм	0
Generation 4	$1,59 + 1,47 = 3,06$ мм	1,59 мм	1,47 мм
Проміжна між 4 і 5	1 мм	1 мм	0
Generation 5	$0,80 + 0,73 = 1,53$ мм	0,8 мм	0,73 мм
Загальна	$76,50 + 1 + 12,23 + 1 + 6,13 + 1 + 3,06 + 1 + 1,53 = 103,34$ мм	$51,01 + 1 + 6,38 + 1 + 3,18 + 1 + 1,59 + 1 + 0,8 = 66,96$ мм	36,38 мм

Аналіз прохідності повітря

Для катодних каналів PEMFC при малих швидкостях повітря, режим течії ламінарний, тому можна застосовувати закон Дарсі – Вейсбаха (для каналів) для визначення втрат тиску для форми (H) і форми (+):

$$\Delta_{pH} = \lambda \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = 2,5 \cdot \frac{0,103}{0,0001} \cdot \frac{1,1 \cdot 0,5^2}{2} = 354,06 \text{ Па} \quad (4.2.1)$$

$$\Delta_{p+} = \lambda \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho v^2}{2} = 2,5 \cdot \frac{0,067}{0,0001} \cdot \frac{1,1 \cdot 0,5^2}{2} = 230,01 \text{ Па} \quad (4.2.2)$$

де: $\lambda = 2,5$ - коефіцієнт тертя;

L - довжина каналу, форма (H) = 0,103 м, форма (+) = 0,067 м;

$D_h = 0,0001$ м - гідравлічний діаметр каналу;

$\rho = 1,1 \text{ кг/м}^3$ - густина повітря;

$v = 0,5$ м/с - середня швидкість потоку.

Це означає що форма (Н) поля потоку катода паливної комірки [72] має приблизно на 35 % більші втрати тиску, ніж форма (+) поля потоку катода паливної комірки.

Прохідність каналу (гідравлічна оцінка)

Прохідність можна описати через гідравлічну провідність:

$$K_H = \frac{1}{\Delta\rho_H} = \frac{1}{354,06} = 0,0028: \quad (4.2.3)$$

$$K_+ = \frac{1}{\Delta\rho_+} = \frac{1}{230,01} = 0,0043: \quad (4.2.4)$$

Тоді:

$$\frac{K_+}{K_H} = \frac{0,0043}{0,0028} = 1,54. \quad (4.2.5)$$

Виходить що, форма (+) поля потоку катода паливної комірки має приблизно в 1,5 рази кращу прохідність для повітря ніж форма (Н) поля потоку катода паливної комірки [72].

Геометричне порівняння форм каналів

Таблиця 4.2.2

Порівняння форм каналів

	Форма (Н)[72]	Форма (+)
Характеристики:	Подовжений маршрут потоку	Симетричний центральний розподіл
	Кілька розгалужень та поворотів	Менша кількість поворотів
	Фрактальна ієрархія розподілу повітря	Коротший шлях повітря
	Загальна довжина одного потоку: $L_H = 103,34$ мм	Загальна довжина одного потоку $L_+ = 66,96$ мм
Переваги:	Краща рівномірність розподілу кисню	Значно менші втрати тиску

	Більш однорідне зволоження мембрани	Краща прохідність
	Покращене тепловідведення	Зменшене енергоспоживання системи подачі повітря
Недоліки:	Збільшений гідравлічний опір	Потенційна нерівномірність розподілу кисню
	Вищі втрати тиску	Можливі «мертві зони» при високих струмових навантаженнях
	Вища потреба в енергії компресора	

Висновки до розділу 4

1. Форма (Н) поля потоку катода паливної комірки взята з [72] забезпечує кращу рівномірність розподілу повітря та тепла, але супроводжується підвищеними втратами тиску.
2. Запропонована форма (+) поля потоку катода паливної комірки характеризується меншою довжиною потоку (на 36 %), зниженими гідравлічними втратами та підвищеною прохідністю.
3. Зменшення довжини каналу з форми (Н) 103,34 мм на форму (+) 66,96 мм призводить до зниження втрат тиску приблизно на 35–40 %.
4. Форма (+) поля потоку катода паливної комірки є більш енергоефективною з точки зору системи подачі повітря, тоді як форма (Н) поля потоку катода паливної комірки [72] більш придатна для високих щільностей струму.

Висновки до роботи

В даній роботі було проаналізовано сучасний стан розвитку паливних комірок для автомобілів на водні та встановлено, що конструкція стеку, зокрема геометрія проточних каналів біполярних пластин, суттєво впливає на енергетичну ефективність, рівномірність розподілу реагентів і гідравлічні втрати в системі.

Виконано аналітичний огляд існуючих типів проточних полів паливних комірок, зокрема традиційних, фрактальних та симетричних схем, що дозволило визначити їхні переваги та недоліки з точки зору гідродинаміки та експлуатаційних характеристик у транспортних застосуваннях.

Запропоновано форму (+) проточного поля катодних біполярних пластин стеку паливної комірки, яка характеризується зменшеною довжиною шляху повітря та меншою кількістю місцевих гідравлічних опорів порівняно з формою (H).

Встановлено, що зменшення втрат тиску в катодному каналі сприяє зниженню енергоспоживання допоміжних систем подачі повітря, що є особливо важливим для автомобільних водневих енергетичних установок.

Список використаних джерел

1. ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА», МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ для підготовки, виконання та захисту магістерських кваліфікаційних робіт, Житомир 2024. URL: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/434626/mod_resource/content/0/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%BD%D1%96%20%D1%80%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%97%20%D0%B4%D0%BE%20%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D1%96%D1%81%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%BE%D1%97%20%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D1%96%D1%84%D1%96%D0%BA%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%BE%D1%97%20%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B8.pdf.
2. IEA – International Energy Agency. Hydrogen URL: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>.
3. BMW. Hydrogen: a key element of the energy transition URL: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Dossier/hydrogen.html>.
4. Montel Energy. What Are Green Hydrogen Technologies? URL: <https://montel.energy/resources/blog/what-are-green-hydrogen-technologies>.
5. IntechOpen. Hydrogen Technologies: Recent Advances, New Perspectives... URL: <https://www.intechopen.com/chapters/1183330>.
6. Department of Energy. Hydrogen URL: <https://www.energy.gov/topics/hydrogen#:~:text=Hydrogen%20is%20an%20important%20part%20of%20a,to%20heavy%20transportation%2C%20to%20long%2Dduration%20energy%20storage>.
7. Bosch Hydrogen Energy. Hydrogen URL: <https://www.bosch-hydrogen-energy.com/energy-system-of-the-future/future-of-hydrogen/>.
8. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Водень: як світ розвиває енергетику майбутнього і як не відставати Україні. URL: <https://saee.gov.ua/news/voden-iak-svit-rozvivaje-energetiku-maibutnyogo-i-iak-ne-vidstavati-ukrayini#:~:text=%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%8C:%20%D1%8F%D0%BA%20%D1%81%D0%B2%D1%96%D1%82%20%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%94%20%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D1%83%20%D0%BC%D0%B0%D0%B9%D0%B1%D1%83%D1%82%D0%BD%D1%8C%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D1%96,%D0%94%D0%B5%D1%80%D0%B6%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B5%20%D0%B0%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%20%D0%B7%20%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D0%B5%D1%84%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96%20%D1%82%D0%B0%20%D0%B5%>

[D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D0%B7%D0%B1%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8](#) .

9. Український журнал прикладної економіки та техніки. Стратегічне планування розвитку водневої економіки в умовах енергетичного переходу України. URL: https://ujae.org.ua/wp-content/uploads/2025/02/ujae_2025_r01_a06.pdf#:~:text=%D0%9A%D1%80%D1%96%D0%BC%20%D1%82%D0%BE%D0%B3%D0%BE%2C%20%D0%B2%D0%B8%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BE%20%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%82%D0%BA%D1%83%20%D0%BF%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%BD%D0%B5%D1%80%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D1%85%20%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D1%81%D0%B8%D0%BD,%D0%BF%D1%96%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D1%89%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%BA%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96%20%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B6%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%87%D1%96%D0%B2%20%D1%83%20%D0%B2%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%96%20%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B5%D0%B2%D0%B8%D1%85%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D0%B9.
10. SGS. Воднева енергетика Україна 2025: меморандум з ЄС хаб до 2050. URL: <https://sgs.in.ua/vodneva-enerhetyka-ukrayina-2025/#:~:text=%D0%9C%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D1%83%D0%BC%20%D0%B7%20%D0%84%D0%B2%D1%80%D0%BE%D0%BF%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B8%D0%BC%20%D0%A1%D0%BE%D1%8E%D0%B7%D0%BE%D0%BC%2C%20%D0%BF%D1%96%D0%B4%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%BD%D0%B0%20%D0%BF%D0%BE%D1%87%D0%B0%D1%82%D0%BA%D1%83,%D0%B2%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%B0%20%D1%82%D0%B0%20%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%B7%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8E%20%D0%B4%D0%BE%202050%2D%D0%B3%D0%BE>.
11. Consumer Reports. Pros and Cons of Alternative Fuels. URL: <https://www.consumerreports.org/cro/2011/05/pros-and-cons-a-reality-check-on-alternative-fuels/index.htm> .
12. FM Logistic Ibérica. Why use hydrogen vehicles as an alternative? URL: <https://www.fmlogistic.es/en/blog/why-use-hydrogen-vehicles-as-an-alternative-to-traditional-diesel-or-petrol-vehicles/> .

13. Volvo Group. Hydrogen fuel cells and combustion engines. URL: <https://www.volvogroup.com/en/sustainable-transportation/sustainable-solutions/hydrogen-fuel-cells.html> .
14. PowerUP Energy Technologies. Why Hydrogen Cars Will Beat Gas Cars and EVs? URL: <https://powerup-tech.com/why-hydrogen-cars-will-beat-gas-cars-and-evs/> .
15. ScienceDirect.com. Hydrogen-powered vehicles in urban transport systems. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146520301368> .
16. Innovation News Network. How hydrogen-powered light commercial vehicles will ... URL: <https://www.innovationnewsnetwork.com/how-hydrogen-powered-light-commercial-vehicles-will-revolutionise-the-transport-industry/31363/> .
17. The Institution of Gas Engineers and Managers. Hydrogen cars: A look at the pros and cons. URL: <https://www.igem.org.uk/resource/hydrogen-cars.html> .
18. Lhyfe Heroes. Advantages and Disadvantages of hydrogen cars. URL: <https://www.lhyfe-heroes.com/about-hydrogen/discover-the-top-benefits-of-driving-a-hydrogen-car-a-comprehensive-analysis-of-hydrogen-cars-advantages-and-disadvantages> .
19. InsideEVs. Why Hydrogen Cars Aren't Even Close To As Clean As EVs. URL: <https://insideevs.com/news/765638/hydrogen-cars-evs-emissions-study/#:~:text=Things%20aren't%20any%20better%20in%20the%20U.S.,U.S.%20is%20made%20via%20natural%20gas%20reforming.>
20. Drive Clean. Hydrogen Fuel Cell Electric Cars. URL: <https://driveclean.ca.gov/hydrogen-fuel-cell> .
21. Department of Energy. Hydrogen Storage | Department of Energy. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> .
22. Energy Tracker Asia. Types of Hydrogen: Grey, Blue and Green. URL: <https://energytracker.asia/types-of-hydrogen/> .
23. CIC energiGUNE. Hydrogen production methods and its colours. URL: <https://cicenergigune.com/en/blog/hydrogen-production-methods-colours> .
24. Chem.4.us. Blue, green, gray: the colors of hydrogen. URL: <https://www.chem4us.be/blue-green-gray-the-colors-of-hydrogen/> .
25. Wikipedia. Hydrogen production. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_production .
26. Stargate Hydrogen. Hydrogen Fuel Cells: Powering the Future of Clean Energy. URL: <https://stargatehydrogen.com/blog/hydrogen-fuel-cells/#:~:text=One%20of%20the%20key%20challenges%20in%20the,materials%20like%20metal%20hydrides%20or%20chemical%20carriers.>
27. Department of Energy. Hydrogen Benefits and Considerations. URL: <https://afdc.energy.gov/fuels/hydrogen-benefits/#:~:text=Fuel%20Storage,processes%20to%20be%20stored%20compactl y.>
28. World Journal of Advanced Research and Reviews. Hydrogen fuel cells for automobiles: Challenges and ... URL: <https://wjarr.com/sites/default/files/WJARR-2023-1042.pdf> .

29. Hydrogen Production Methods: Renewable and Non-renewable. URL: <https://www.fuelcellstore.com/blog-section/electrolyzer-information/hydrogen-production-methods> .
30. Intimedia. Hydrogen Storage Technologies: Advantages, Disadvantages ... URL: <https://intimedia.id/read/hydrogen-storage-technologies-advantages-disadvantages-and-future-potential> .
31. Nanografi Advanced Materials. The Hydrogen Revolution: Exploring Cutting Edge Storage in ... URL: <https://shop.nanografi.com/blog/the-hydrogen-revolution-exploring-cutting-edge-storage-in-nanotechnology-nanografi/> .
32. Fuel Cell Store. Membrane Electrode Assemblies (MEA). URL: <https://www.fuelcellstore.com/membrane-electrode-assembly> .
33. Wikipedia. Membrane electrode assembly. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane_electrode_assembly .
34. ResearchGate. Membrane Electrode Assembly (MEA) main components. URL: https://www.researchgate.net/figure/a-Membrane-Electrode-Assembly-MEA-main-components-b-PEMFC-stack-assembly-final-step_fig1_357707092 .
35. Department of Energy. Parts of a Fuel Cell. URL: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/parts-fuel-cell> .
36. ScienceDirect. Membrane Electrode Assembly. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/membrane-electrode-assembly> .
37. The Electrochemical Society. Membrane Electrode Assembly. URL: <https://www.electrochem.org/dl/interface/wtr/wtr03/IF12-03-Pages40-43.pdf> .
38. Advent Technologies. Why Advent's MEA is the perfect solution for HTPEM systems. URL: <https://advent.energy/mea/> .
39. FuelCellStore. Membrane Electrode Assembly. URL: <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-components/membrane-electrode-assembly> .
40. SciSpace. Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity ... URL: <https://scispace.com/papers/microbial-fuel-cell-as-new-technology-for-bioelectricity-47ii88tas2> .
41. ScienceDirect. CFD modelling of Darcian flow of water in porous media. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202724004294> .
42. Merle et al., 2011, "Microbial fuel cells: An overview of current technology,".
43. ResearchGate. An overview of electro-osmosis in fuel cell polymer. URL: https://www.researchgate.net/publication/223640133_An_overview_of_electro-osmosis_in_fuel_cell_polymer_electrolytes .
44. National Institutes of Health (NIH). New Insights into Perfluorinated Sulfonic-Acid Ionomers. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28112903/> .
45. Zaffou et al., 2006, "Experimental Study of Gas Transport through Gas Diffusion Layers".
46. Kim and Mench, 2009, "Investigation of Temperature-Driven Water Transport in Polymer Electrolyte Fuel Cell: Phase-Change-Induced Flow,".
48. OSTI. Polymer electrolyte fuel cell model (Journal Article). URL: <https://www.osti.gov/biblio/7268133>
48. Kidena, 2008, "Water transport phenomena in polymer electrolyte membranes".

49. Barbir and Yazici, 2008, "PEM Fuel Cells: Theory and Practice".
50. Ge et al., 2005, "A mathematical model for PEMFC in different flow modes".
51. Thampan et al., 2000, "Modeling of Conductive Transport in Proton-Exchange Membranes for Fuel Cells".
52. Weber and Newman (2004), "Modeling Transport in Polymer-Electrolyte Fuel Cells,".
53. Zawodzinski Jr et al., 1993, "Water Uptake by and Transport Through Nafion 117 Membranes".
54. Li et al., 2013, "A mathematical model of microbial fuel cell (MFC) with non-uniform distribution of substrate concentration".
55. Piringer, 2020, "Water management in highly dynamic PEM fuel cell system operations".
56. Alduchov i Eskridge, 1996, "Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure".
57. Junzeng et al., 2012, "Research on modeling PEM fuel cells".
58. Thomas et al., 2012, "Study of coupled heat and water transfer in proton exchange membrane fuel cells by the way of internal measurements".
59. SciELO Brasil - Dual-chamber microbial fuel cell with ... URL: <https://www.scielo.br/j/esa/a/jnvYLYZxN86jbWJhxKmsxZg/?format=html&lang=en> .
60. HAL. Investigation of liquid water heterogeneities in large area PEM ... URL: <https://cea.hal.science/cea-04248100/document> .
61. Zook and Leddy, 1996, "Density and Solubility of Nafion: Recast, Practical, and Commercial Films".
62. Jalani and Datta, 2005, "The effect of equivalent weight, temperature, and humidity on the water sorption isotherm of Nafion membranes".
63. Gallagher et al., 2009, "Analysis of Distributed Water Transport in a PEMFC with a Segmented Cell".
64. Gong et al. (2001), "A simple multi-dimensional model for polymer electrolyte membrane fuel cells".
65. Kidena (2008), "Water transport phenomena in polymer electrolyte membranes".
66. Ochi et al., 2009, "Water transport and its effect on PEFC performance".
67. Okada, 1999, "Water and ion transport models for PEM fuel cells".
68. Zelsmann et al., 1990, "Water permeability in a modified Nafion membrane".
69. Kusoglu i Weber, 2017, "New Insights into Perfluorinated Sulfonic-Acid Ionomers".
70. Hallinan Jr i Elabd, 2009, "Diffusion and Sorption in Polymer Electrolytes".
71. Majsztrik et al., 2007, "Water Permeation in Nafion and MgO/Nafion Composite Membranes".
72. Bethapudi, VS; Hack, J; Hinds, G; Shearing, PR; Brett, DJL; Coppens, M-O; (2021) Electro-thermal mapping of polymer electrolyte membrane fuel cells with a fractal flow-field URL: <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10137555/> .
73. Kush Chadha, Improvement of water management in PEM fuel cells using water balance and electrochemical noise analysis. URL: <https://theses.hal.science/tel-03271138/> .

74. ScienceDirect.com Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell ...
URL:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119301157#:~:text=A%20fuel%2Dcell%2Dpowered%20commercial%20aircraft%20might%20become%20a,adoption%20of%20these%20technologies%20in%20the%20sector.>
75. Nguyen, 1996, "A Gas Diffusion Electrode Model for General Application in a Liquid/Gas Electrolyte System".
76. "A composite-membrane model for ionic transport in PEMFCs" Wang i Liu, 2004,
77. Wilberforce et al., 2019, Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology .
78. Kloess et al., 2009, "Investigation of bio-inspired flow channel designs for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells,".
79. Cho et al., 2020, "Effect of a bottom-hinged, top-tensioned porous membrane baffle on liquid sloshing".
80. Ibrahimoglu et al., 2017, "Investigation of Spiral Flow-Field Design on the Performance of a PEM Fuel Cell,".
81. Cano-Andrade et al., 2010, "Pore-scale analysis of gas and liquid transport in a PEM fuel cell gas diffusion layer".
82. Juarez-Robles et al., 2011, "Multiple concentric spirals for the flow field of a proton exchange membrane fuel cell,".
83. Behrou et al., 2019, "Topology optimization as a powerful tool to design advanced PEMFCs flow fields,".
84. Suseendiran et al., 2017, "Effect of bio-inspired flow field designs on the performance of polymer electrolyte membrane fuel cell".
85. Juarez-Robles et al., 2011, "Multiple concentric spirals for the flow field of a proton exchange membrane fuel cell,".
86. Shimpalee et al., 2006, "Numerical prediction of local temperature and current density in a 200 cm² PEM fuel cell,".
87. Karthikeyan et al., 2015, "Effect of different flow field designs on the performance of a PEM fuel cell,".

Додатки

Додаток А

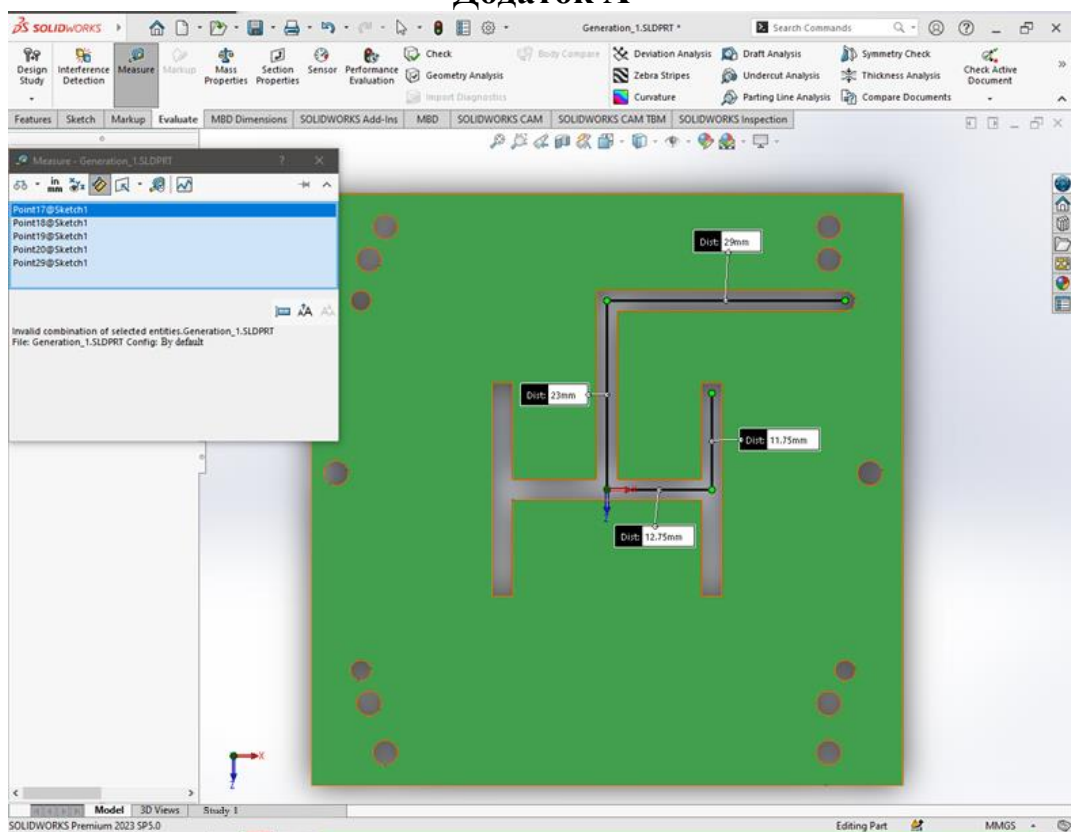


Рисунок А.1 Довжини потоку повітря пластини Generation 1 у формі “Н”

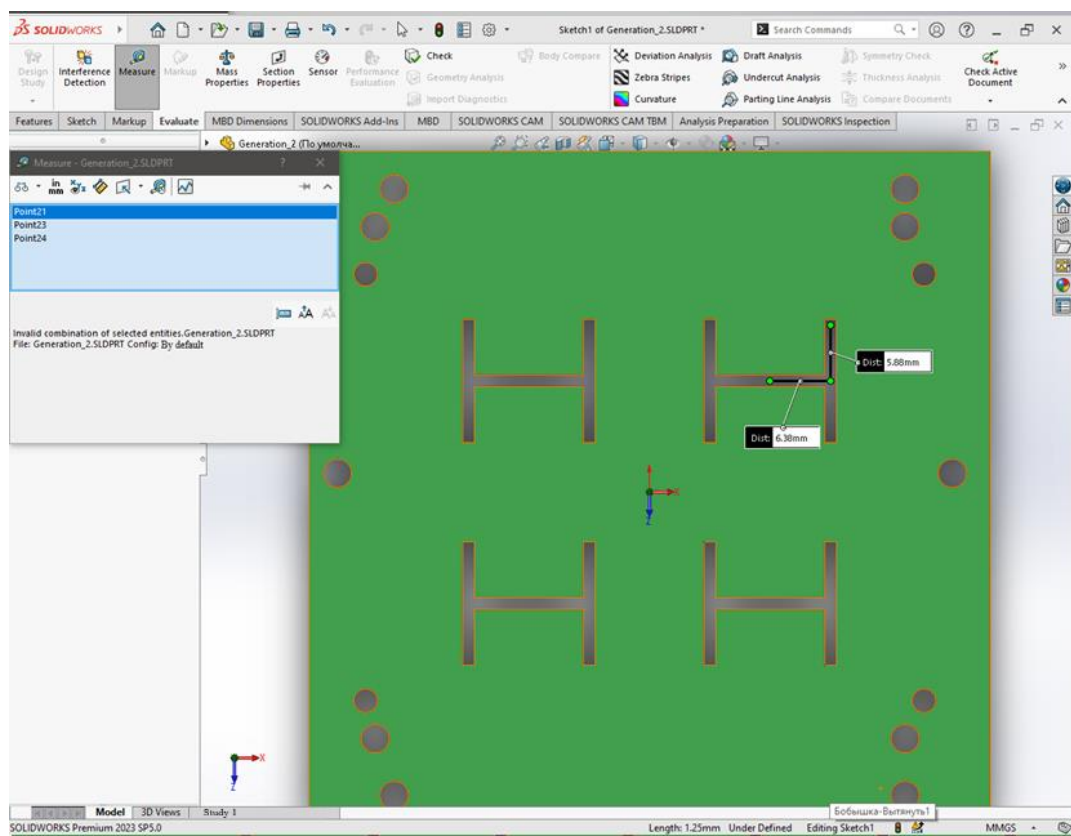


Рисунок А.2 Довжини потоку повітря пластини Generation 2 у формі “Н”

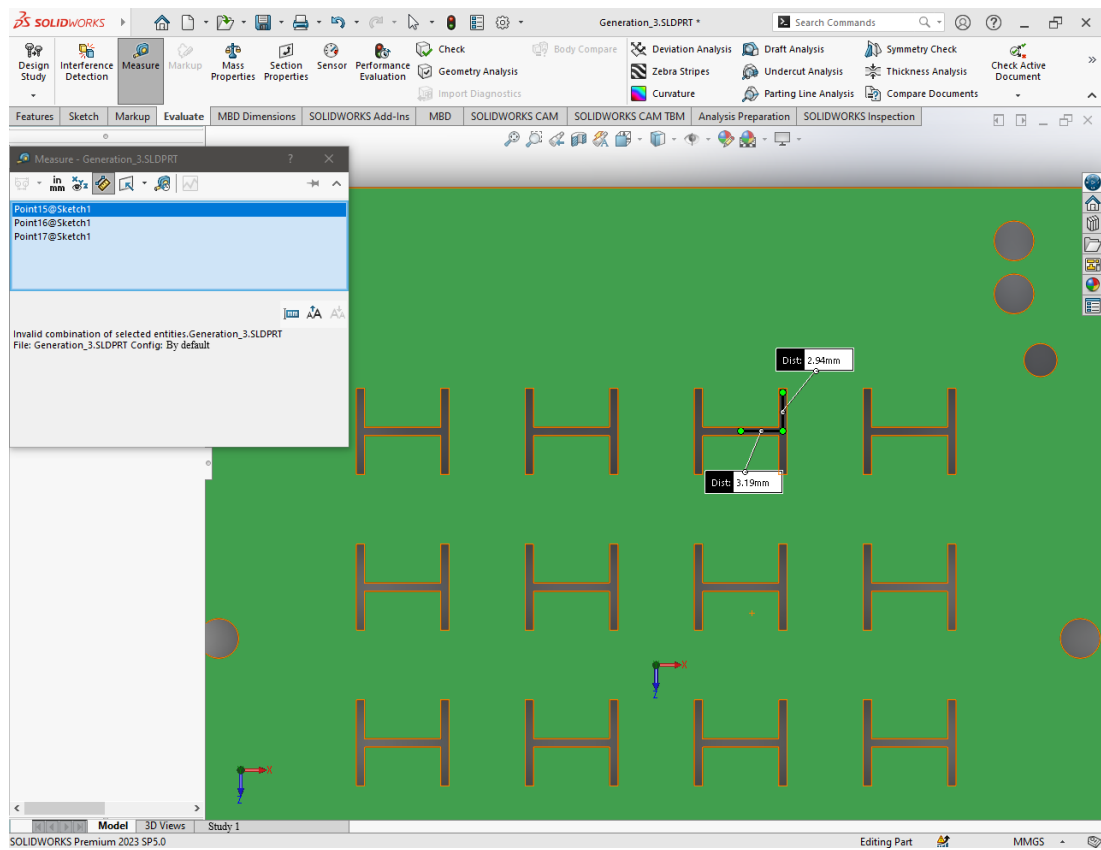


Рисунок А.3 Довжини потоку повітря пластини Generation 3 у формі “Н”

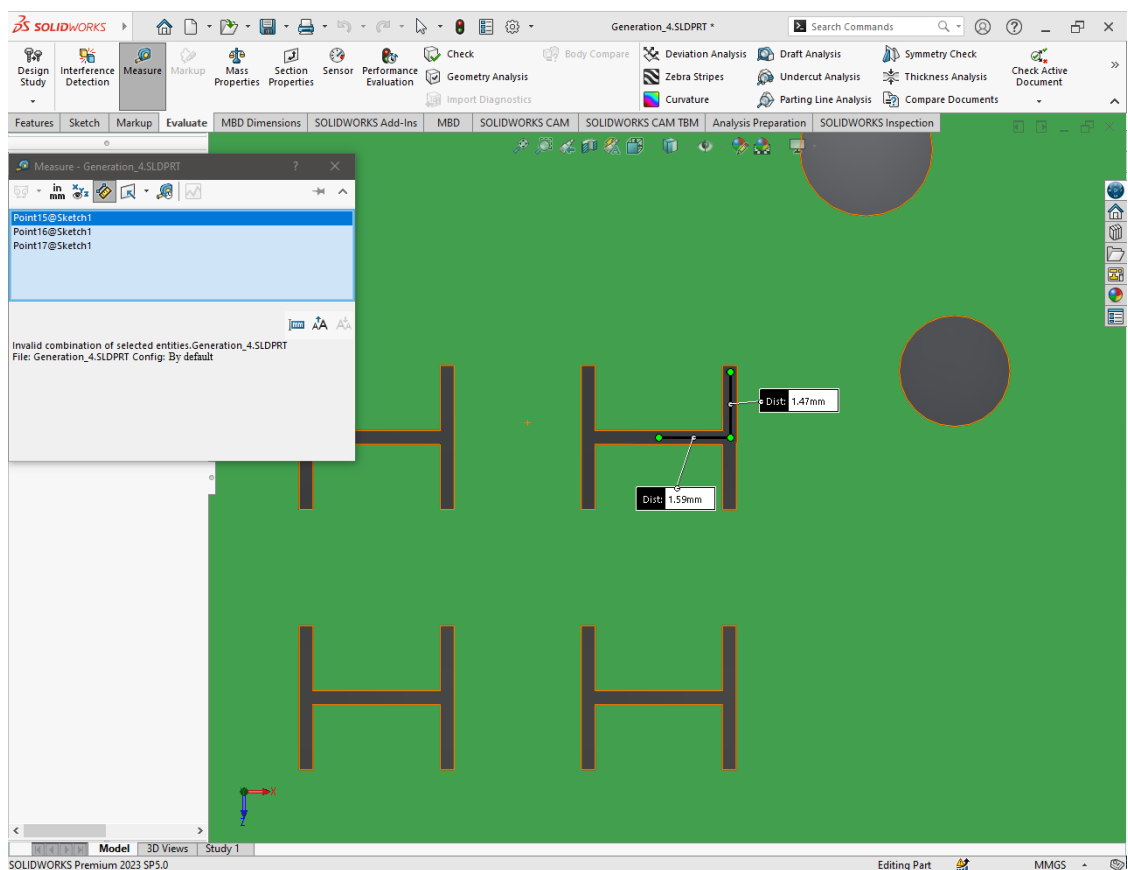


Рисунок А.4 Довжини потоку повітря пластини Generation 4 у формі “Н”

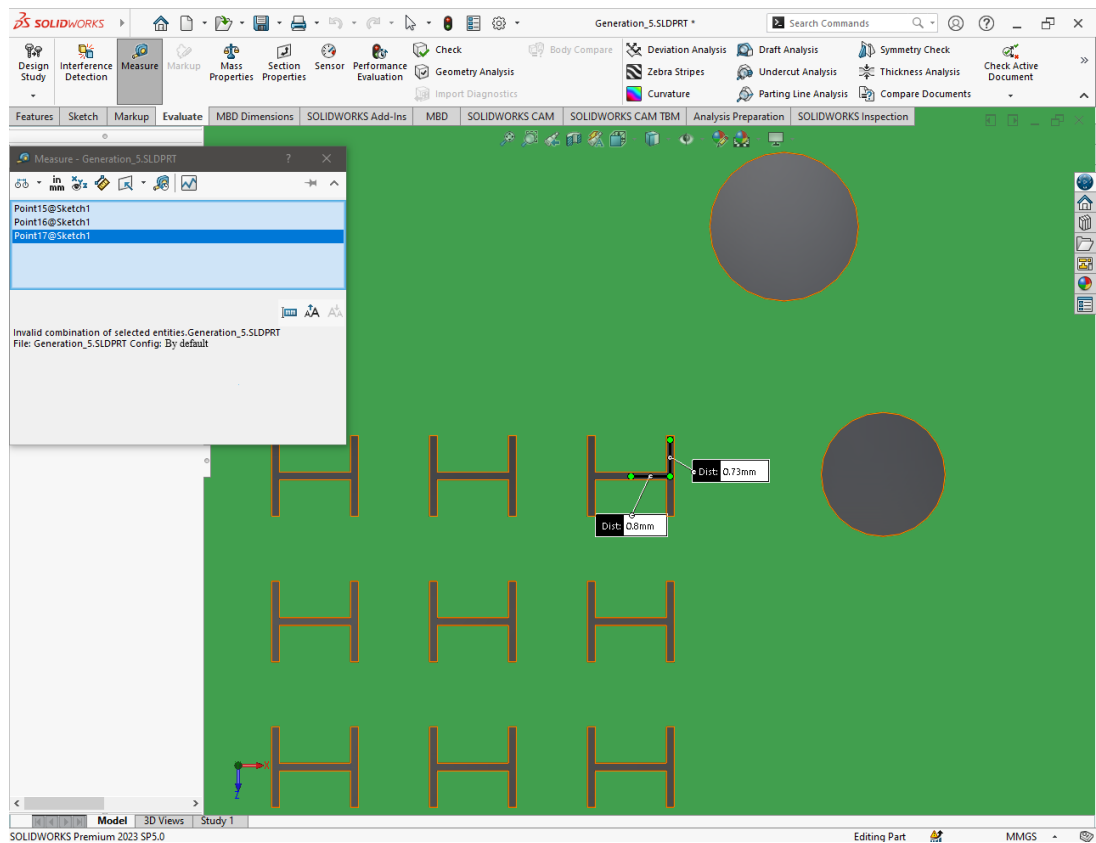


Рисунок А.5 Довжини потоку повітря пластини Generation 5 у формі “Н”

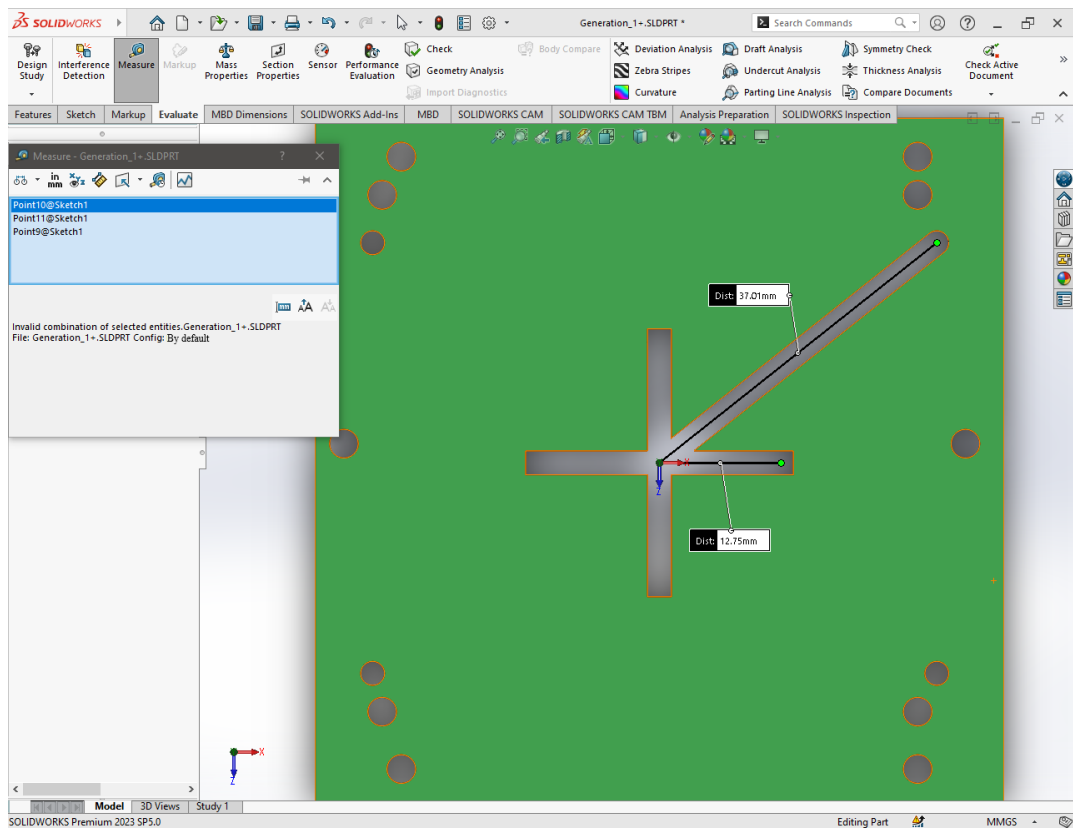


Рисунок А.6 Довжини потоку повітря пластини Generation 1 у формі “+”

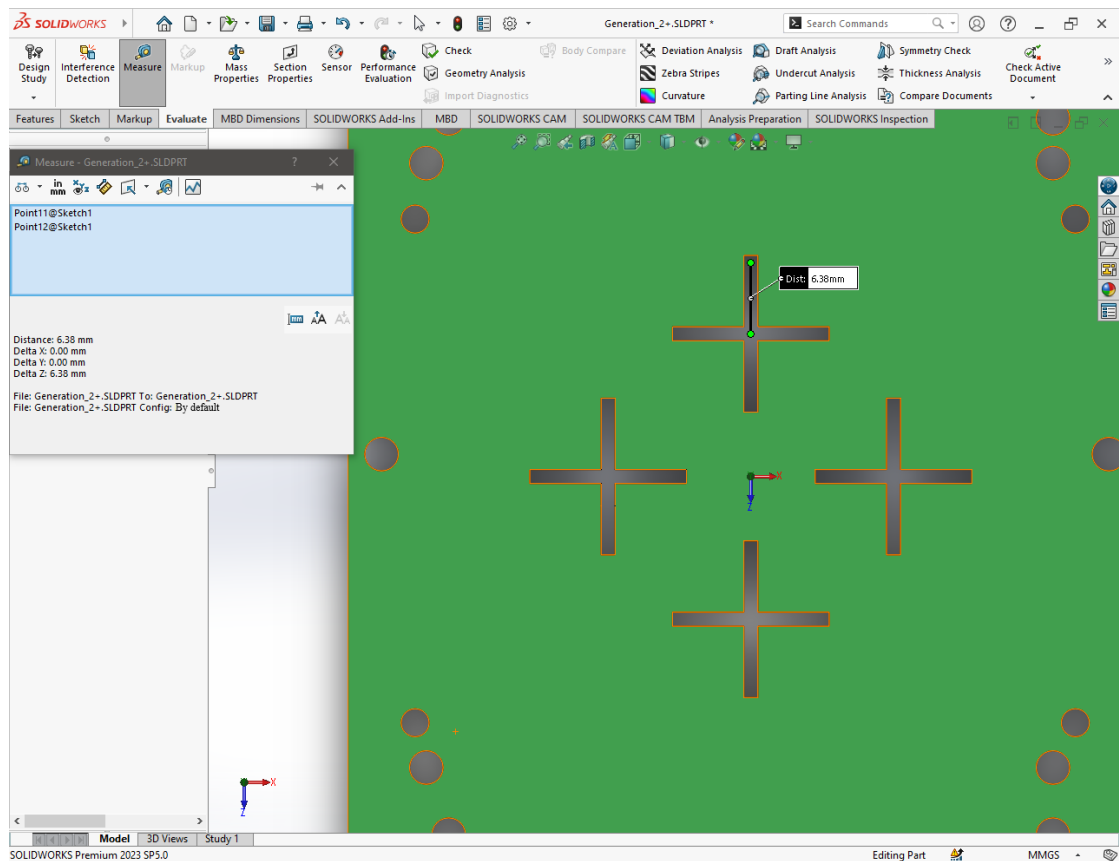


Рисунок А.7 Довжини потоку повітря пластини Generation 2 у формі “+”

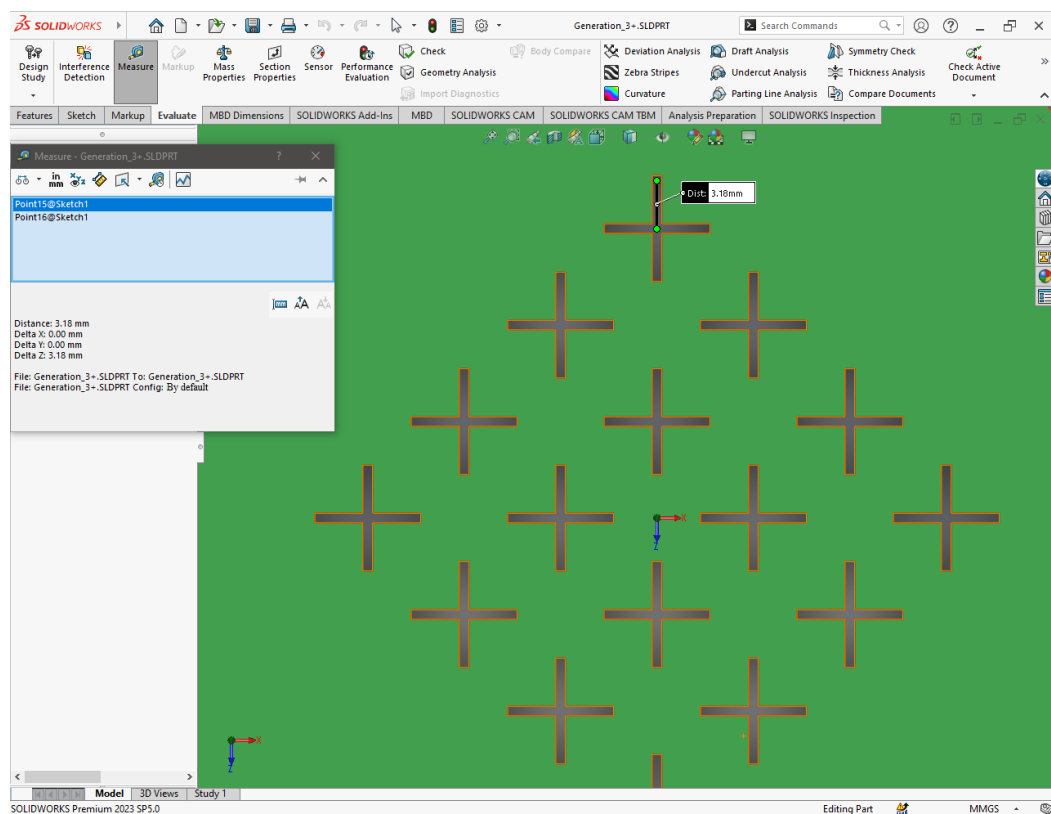


Рисунок А.8 Довжини потоку повітря пластини Generation 3 у формі “+”

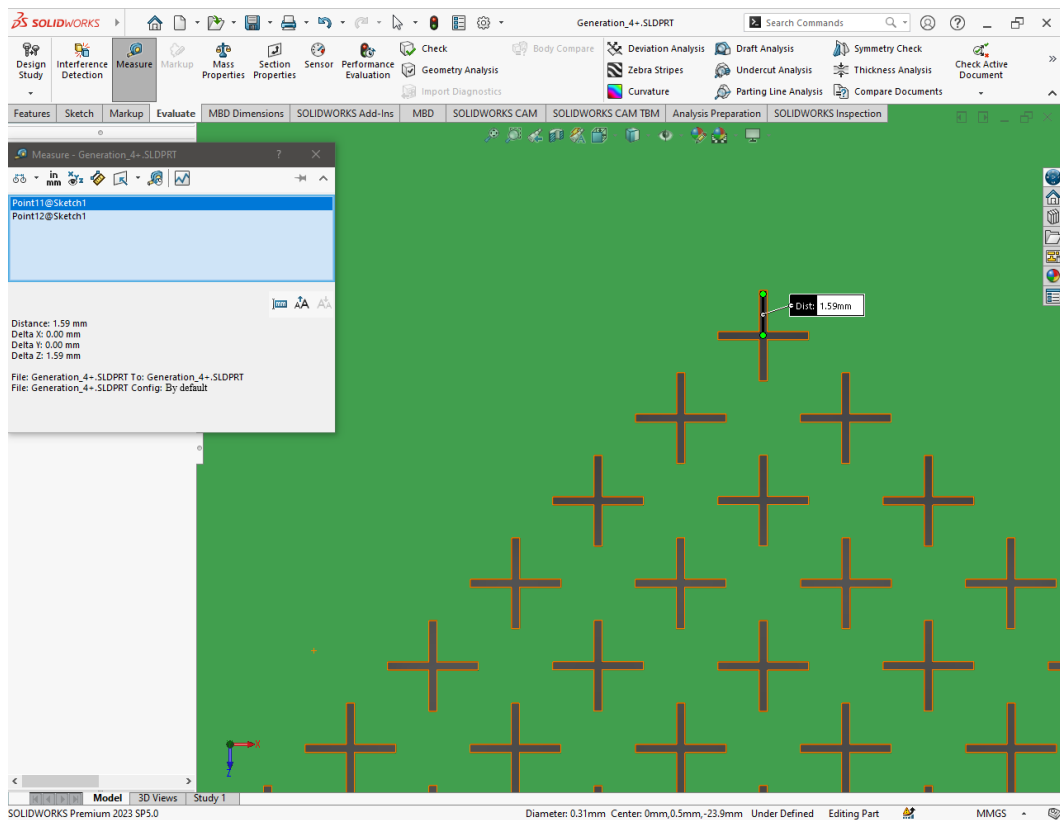


Рисунок А.9 Довжини потоку повітря пластини Generation 4 у формі “+”

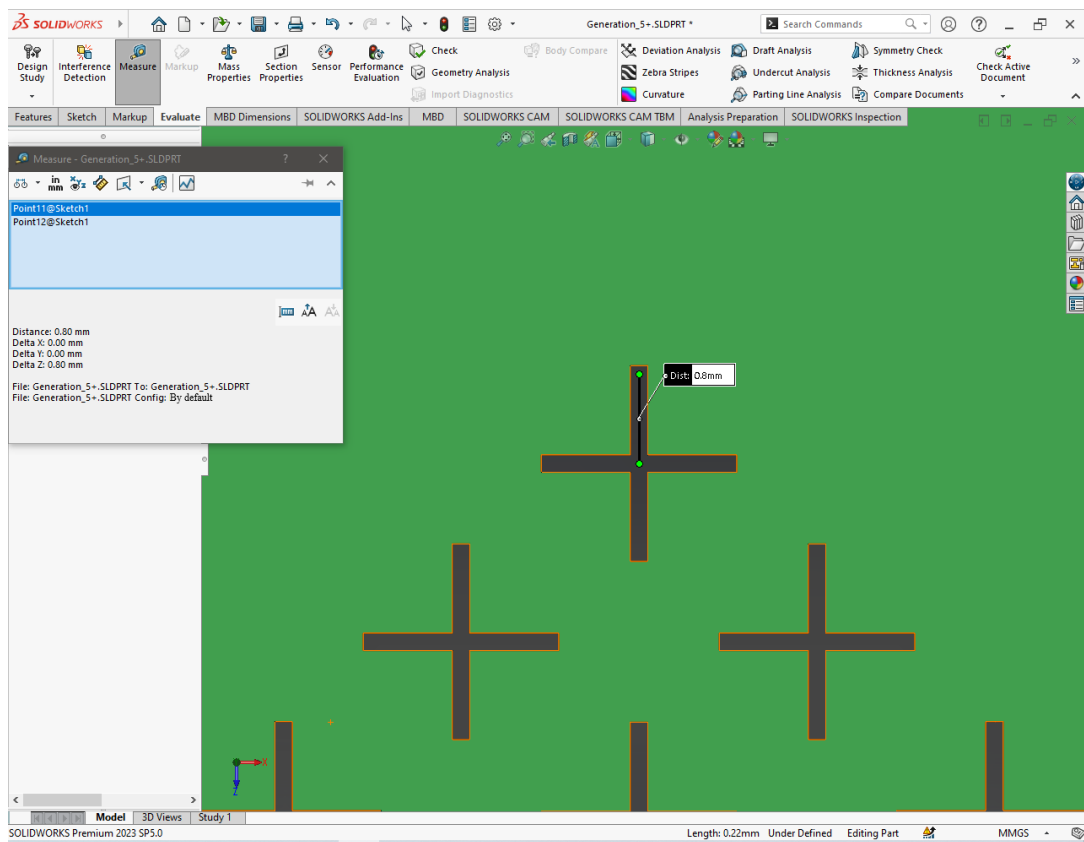


Рисунок А.10 Довжини потоку повітря пластини Generation 5 у формі “+”