

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: «Вдосконалення систем охолодження акумуляторних батарей
електромобіля з використанням методів обчислювальної гідродинаміки»

Виконав: студент групи ААГ-22м



Юрій КРИВИЦЬКИЙ

Керівник:



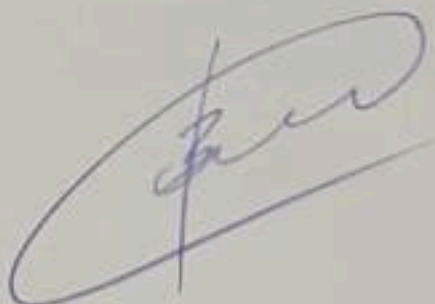
Дмитро БЕГЕРСЬКИЙ

Завідувач кафедри:



Олександр МЕЛЬНИК

Рецензент:



Володимир Шумляковський

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» гесвітня 2025р.

ЗАВДАННЯ

до кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «магістр»
Кривіцького Юрія Костянтиновича

1.Тема роботи: «Вдосконалення систем охолодження акумуляторних батарей електромобіля з використанням методів обчислювальної гідродинаміки» затверджена наказом вищого навчального закладу від 06 жовтня 2025 р. № 569-с

Керівник роботи: к.т.н., Дмитро БЕГЕРСЬКИЙ

2. Строк подання студентом завершеної роботи 01.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: літературні джерела, інтернет джерела, результати досліджень, результати CFD моделювання.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Визначення задач дослідження. 2. Проектування системи охолодження акумуляторної батареї. 3. Дослідження термічних характеристик мінімодулів. Загальні висновки та рекомендації.

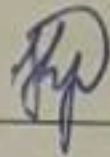
5. Пояснювально - роздавальний матеріал (презентація) – 20 слайдів.

Дата видачі завдання «06» гесвітня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

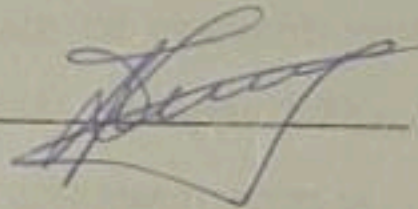
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Розділ 1. Визначення задач дослідження	17.09.2025	виконано
2.	Розділ 2. Проектування системи охолодження акумуляторної батареї	22.10.2025	виконано
3.	Розділ 3. Дослідження термічних характеристик мінімодулів	05.11.2025	виконано
4.	Оформлення пояснювальної записки	26.11.2025	виконано
5.	Рецензування	01.12.2025	виконано
6.	Попередній захист	04.12.2025	виконано
7.	Захист	08.12-31.12.2025	виконано

Студент



Юрій КРИВИЦЬКИЙ

Керівник роботи



Дмитро БЕГЕРСЬКИЙ

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	7
1.1. Що таке електромобіль	7
1.2. Проблеми застосування АКБ електромобілів	11
1.3. Охолоджуючі системи АКБ електромобілів	13
РОЗДІЛ 2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ	23
2.1. Постановка проблеми	23
2.1.1. Аналіз гідродинаміки компонентів охолодження	23
2.1.2. Геометрія та параметри	23
2.1.3. Налаштування симуляції	25
2.1.4. Генерація сітки	27
2.1.5. Дослідження незалежності сітки	29
2.1.6. Результати моделювання в стаціонарному стані	32
2.1.7. Результати моделювання перехідних процесів	42
2.1.8. Перевірка	44
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІНІМОДУЛІВ	45
3.1. Постановка проблеми	45
3.2. Перевірка падіння тиску вздовж охолоджувачів	50
3.2.1. Розподіл потоку	56
3.2.2. Спрощений термічний аналіз акумуляторної батареї	60
ВИСНОВКИ	73
Список літератури	74

ВСТУП

Кваліфікаційна робота магістра зосереджена на використанні обчислювального моделювання термогідравліки та моделей зосереджених параметрів для проектування, оптимізації та перевірки систем охолодження для високопродуктивних акумуляторних блоків електромобілів.

Метою роботи є розробка системи охолодження високопродуктивної акумуляторної батареї електромобіля, яка б дозволяла збільшити час безперервної роботи батареї при збереженні її температури не вище 30⁰С.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз конструкції електромобіля та основних типів систем охолодження акумуляторних батарей електромобілів.
2. Створити CFD модель системи охолодження акумуляторної батареї електромобіля та визначити такі її параметри, які б забезпечили:
 - температуру елементів не більше 30 °С після 15 годин заряджання;
 - максимальний перепад тиску в системі на рівні 500 мбар при 70 л/хв;
 - Зменшення витрати теплоносія до 2,5 при 50 і 70 л/хв.
3. Перевірити результати моделювання.

У першому розділі кваліфікаційної роботи описано, що собою являє електромобіль в цілому. Звертається увага на переваги та недоліки цього виду транспорту. Також звертається увага на те, чому електромобілі не набули великої популярності раніше. І закінчується розділ порівнянням основних систем охолодження акумуляторних блоків електромобілів, які використовуються в автомобільній промисловості.

У другому розділі описано процес балансування та перевірки гідравлічної системи для охолодження акумуляторної батареї високопродуктивного електромобіля. Акумуляторна батарея використовує суміш води та етиленгліколю, яка тече всередині гнучких елементів для охолодження елементів. Розділ відкривається визначенням мети моделювання; згодом описано моделювання CFD, що використовується для визначення падіння тиску вздовж охолоджувачів. Обговорення продовжується описом характеристик

спрощеної батареї, яка використовується для перевірки гідравлічних і теплових результатів, отриманих за допомогою CFD моделювання та моделей зосереджених параметрів. Потім оцінюється розподіл потоку вздовж охолоджувачів спрощеної батареї. Розділ продовжується описом симуляції термофлюїдної динаміки та теплової моделі зосереджених параметрів, що використовується для моделювання досягнутої максимальної температури комірки.

Перевірка результатів термічного моделювання здійснюється шляхом тестування спрощеного акумулятора. Розділ завершується визначенням падіння тиску на всій батареї та описом зосередженої гідравлічної моделі, яка використовується для балансування швидкості потоку охолоджуючої рідини.

У третьому розділі узагальнено результати, отримані в результаті аналізу висновків двох попередніх розділів. Порівнюючи цілі проекту з результатами експериментальних випробувань, можна підтвердити достовірність моделей із зосередженими параметрами та моделювання динаміки рідини для проектування, балансування та перевірки систем охолодження для акумуляторних батарей.

РОЗДІЛ 1 ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Що таке електромобіль

Електромобіль — автомобіль, що приводиться в рух одним або декількома електродвигунами з живленням від акумуляторів (BEV) або паливних елементів тощо, а не двигуном внутрішнього згоряння. Електромобіль слід відрізняти від автомобілів з двигуном внутрішнього згоряння і електричною передачею та від тролейбусів. Підвидами електромобіля вважаються електрокар (транспортний засіб для перевезення вантажів на закритих територіях) і електробус (автобус з акумуляторною тягою)

Термін електромобільність - охоплює повністю електричні транспортні засоби, а також гібридні електричні транспортні засоби та автомобілі, які використовуються технологією водневих паливних елементів.

Станом на 2018 рік більшість розвинутих країн поставили за мету перейти на електромобілі. На червень 2017 в усьому світі було продано понад 2 млн електромобілів. Nissan Leaf — найпродаваніший автомобіль із 300 000 проданих авто станом на січень 2018 року. Другий — Tesla Model S із 213 000 поданих авто на грудень 2017.

У 2020 році компанія Tesla Inc. другий рік підряд із великим відривом зайняла перше місце серед виробників електромобілів. Найпопулярнішою моделлю стала Tesla Model 3 (0,5 млн авто). Друге місце у Volkswagen із моделлю Volkswagen ID.3 і китайський BYD на третьому. Четверте місце у китайського авто Wuling Hongguang. Всього за рік було випущено 2,9 млн електромобілів, у 2021 році заплановано випустити 3,9 млн.

В Україні найпродаваніший електромобіль із 2017 року бу Nissan Leaf. Станом на 2021 рік на нього припадає близько 50 % електромобілів. Тобто близько 11 тис. із всього 23 тис. електромобілів в Україні на кінець 2020 року.

Зручності електромобіля

Електромобілі відрізняються низькою вартістю експлуатації. Ford Ranger споживає 0,25 кВт*год на один кілометр шляху, Toyota RAV4 — 0,19 кВт*год на

кілометр. Середній річний пробіг автомобіля в США становить 19.200 км (тобто 52 км на день). При вартості електроенергії в США від 5 до 20 центів за кВт*год, вартість річного пробігу Ford Ranger EV становить 240—1050\$, RAV-4 — 180—970 \$.

В Україні ціна електроенергії станом на січень 2016 року становила 0,456 грн за кВт/год (близько 0,02 \$ США), тому використання електромобілів суттєво економило бюджет. Для порівняння, в Росії вартість електроенергії істотно дорожча, але все одно в кілька разів менша за тарифи США, вона складає 2,7 руб. (0,12\$) за кВт/год за денним тарифом, і приблизно 1,50 руб за кВт/год в нічний час.

Таким чином, вартість експлуатації електромобіля в Україні буде істотно нижчою, ніж у США. Враховуючи, що ціни на бензин в Україні або Росії значно вищі ніж у США, то в теплу пору року витрати на енергоресурси для електромобілів будуть значно меншими. Акумуляторні батареї служать близько трьох років, або 85.000-100.000 км пробігу. ККД електродвигуна становить 90 % —95 %. У міському циклі автомобіль задіює близько 3 кінських сил двигуна. Міський автотранспорт може бути замінений на електромобілі.

Існує думка, що електромобілі відрізняються низьким рівнем шуму, що може створювати проблеми — пішоходи, переходячи дорогу, часто орієнтуються на шум автомобіля. У деяких країнах навіть пропонується штучно підвищити рівень шуму електромобілів. Зрозуміло, різкий шум працюючого потужного електродвигуна важко з чимось сплутати, шум електроприводів тролейбуса, електрокара, поїздів метро широко відомий.

Переваги електромобіля:

- Відсутність шкідливих викидів;
- Нижчі витрати на експлуатацію та технічне обслуговування автомобіля: не потрібна дорога коробка передач і мастила до неї, двигун вн.згоряння (в тому числі заміна масел, фільтрів, ремнів ГРМ) і його обслуговування, насосів високого тиску (якщо це диз.двигуни), паливних фільтрів, та ін.;

- Простота конструкції і управління, висока надійність та довговічність екіпажної частини (до 20—25 років) у порівнянні зі звичайним автомобілем;
- Тиха робота;
- Можливість підзарядки від побутової електричної мережі (від розетки), але такий спосіб в 5—10 разів довший (триває близько 6 годин), ніж від спеціального високовольтного зарядного пристрою;

Електромобіль — єдиний варіант застосування на легковому автотранспорті енергії, що виробляється АЕС і електростанціями інших типів;

- Масове застосування електромобілів змогло б допомогти у вирішенні проблеми «енергетичного піку» за рахунок підзарядки акумуляторів в нічний час.
- Тесла Моторс презентувала ефективний автомобіль: 4.2 сек до 100 км/год, пробіг без підзарядки 400 км на швидкості 110 км/год, потужність двигуна 300 кВт. Їх патенти відкриті для популяризації електрокарів.

Недоліки електромобіля

- Акумулятор за півтора століття еволюції так і не досяг характеристик, що дають змогу електромобілю на рівних конкурувати з автомобілем за запасом ходу і ціною, не зважаючи на значне вдосконалення конструкції. Наявні високоенергоємні акумулятори або занадто дорогі через застосування дорогоцінних або дорогих металів (срібло, літій), або працюють при дуже високих температурах (робоча температура натрій-сірчаного акумулятора $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Крім того, такі акумулятори відрізняються високим саморозрядом. Одним з перспективних напрямків стала розробка нікель-металгідридних акумуляторів з оптимальним співвідношенням енергоємності та собівартості, перспективними вважаються акумулятори на основі поліпропілену, проте, фактично через патентні обмеження на електромобілях, як і століття тому, застосовуються свинцево-кислотні АКБ. Втім, енергоємність таких АКБ збільшилася за ХХ століття в 4 рази (до 40—45 Вт·г/кг) і вони не вимагають обслуговування протягом усього терміну служби. Значно підвищити віддачу від акумуляторів дало змогу застосування електронних систем оперативного контролю за станом і зарядкою-

розрядкою АКБ.

- Акумулятори добре працюють під час руху електромобіля на постійних швидкостях і під час плавних розгонів. У разі різких стартів тягові АКБ втрачають багато енергії. Для збільшення пробігу електромобіля необхідні спеціальні стартові системи, наприклад, на конденсаторах, а також застосування систем рекуперації енергії (економія до 25 %).

- Проблемою є виробництво та утилізація акумуляторів, які часто містять отруйні компоненти (наприклад, свинець або літій).

- Близько 10 % енергії втрачається в коробці передач та інших елементах трансмісії. Для вирішення цієї проблеми компанія Mitsubishi Motor розробила колесо з вбудованим електродвигуном (мотор-колесо), що дало змогу відмовитись від експлуатації коробки передач. Система отримала назву Mitsubishi In-wheel motor Electric Vehicle (MIEV). Аналогічне мотор-колесо розробила Toyota. Прототип автомобіля Toyota Fine-T може повертати колеса перпендикулярно осі автомобіля, що дозволяє значно спростити паркування.

- Частина енергії акумуляторів витрачається на охолодження або обігрів салону автомобіля, а також живлення інших бортових енергоспоживачів. Проте, обігрів салону може виконуватись за допомогою бензинової пічки (для цього встановлюється бак місткістю 3 л, а під переднім сидінням монтується обігрівальний пристрій). Робляться зусилля, щоб вирішити цю проблему з використанням паливних елементів, іоністорів і фотоелементів.

- Для масового застосування електромобілів потрібне створення відповідної інфраструктури для підзарядки акумуляторів (зарядка на «автозарядних» станціях).

- У разі масового використання електромобілів під час їх зарядки від побутової мережі зростають перевантаження електричних мереж «останньої милі», що загрожує зниженням якості енергопостачання, ризиком локальних аварій.

- Триваліший час заряджання акумуляторів в порівнянні з заправкою паливом. Проте, оскільки в найбільшій кількості випадків середній пробіг

звичайного автомобіля у день становить близько 50 км, а найпростішого (навіть саморобного) електромобіля один заряд батареї достатній для пробігу мінімум 60 км, то тривала зарядка акумуляторних батарей (близько 6 годин) не створює незручностей. Незручності від тривалої зарядки існують у разі поїздок на великі відстані.

- На щорічній сесії Німецького акустичного товариства, яка проходила в Дармштадті, проблема генерованого електромобілем шуму, а точніше, майже повної його безшумності, викликала жваві дискусії, адже безшумність може стати фактором, який негативно впливатиме на безпеку дорожнього руху. В Японії прийнятий закон, який встановлює мінімальний рівень шуму для автомобілів з електроприводом. Прийняття аналогічних нормативно-правових документів планується також в Європі та у США.

1.2. Проблеми застосування АКБ електромобілів

У сучасному виробництві електромобілів, найчастіше використовують літій-іонні батареї. Середній період експлуатації таких акумуляторів становить близько 8 років.

Однак варто зазначити, що літій-іонні акумулятори є досить дорогими через дефіцитність сировини і постійно зростаючого попиту на нього для виготовлення різних пристроїв. З огляду на, що часто вартість акумулятора складає більше половини вартості самого електромобіля, значного здешевлення електромобілів в найближчому майбутньому очікувати не варто.

Іншою значною проблемою при використанні літій-іонних акумуляторів є їх швидке старіння і погіршення характеристик навіть при зберіганні. В цьому плані вони значно поступаються відомим довгожителів - тяговим свинцевим акумуляторів, які при правильному догляді здатні працювати і 20 років. Також наскільки б не були екологічно чисті електромобілі в експлуатації, це не вирішує проблеми ні утилізації акумуляторів, ні екологічних питань при їх виробництві. На сьогоднішній день жоден з виробників електромобілів не має повноцінної програми вторинної переробки елементів живлення.

Крім цього важливу роль грає коректна експлуатація АКБ, яка включає:

- правильну зарядку і розрядку батареї;
- розумну експлуатацію в зимовий період;
- грамотний розрахунок продуктивності;
- температурний режим використанні;
- використання ПЗ для визначення стану батарей, наприклад Leaf Spy

Pro, яка показує, які комірки акумуляторів Nissan Leaf биті, а які живі.

Визначальною характеристикою для літій-іонних батарей, є вік і число циклів зарядів батареї, тобто скільки разів дану батарею можна заряджати в період експлуатації. Середнє число повних "зарядок" сучасних акумуляторних батарей для електромобілів становить кілька тисяч циклів.

Алюміній-іонні батареї.

Запуск алюмінію при виробництві акумуляторів на сьогодні може дозволити підвищити безпеку експлуатації батареї та знизити її собівартість. На жаль наукових досліджень, які б видали остаточний результат поки що немає. Все лише на початковому рівні.

Літій-сірчані акумулятори.

В теорії літій-сірчані батареї мають значно більшу енергетичну щільність, ніж літій-іонні акумулятори. Та при використанні в електромобілях у них явно мале число циклів заряду / розряду, що є неприйнятним для виробників електромобілів. Ці недоліки поки не відлякують керівництво NASA, яке інвестує в створення твердотільних літій-сірчаних батарей.

Метал-повітряні акумулятори.

Разом з тим, свинцеві акумулятори чутливі як до глибоких розрядів, так і зберігання в частково розрядженому стані, вимагають регулярного обслуговування, але головним їх недоліком є низька питома енергія, що пов'язано з високою щільністю свинцю. Через це на сьогоднішній момент свинцево-кислотні акумулятори застосовуються там, де їх надійність переважає такі недоліки, як велику вагу і необхідність дотримання циклічності заряду-розряду - як джерело енергії в електровозах, електropідйомником та інших видах складської та добряче навантаженої техніки.

Один з перспективних типів акумуляторів - т.зв. графенові.

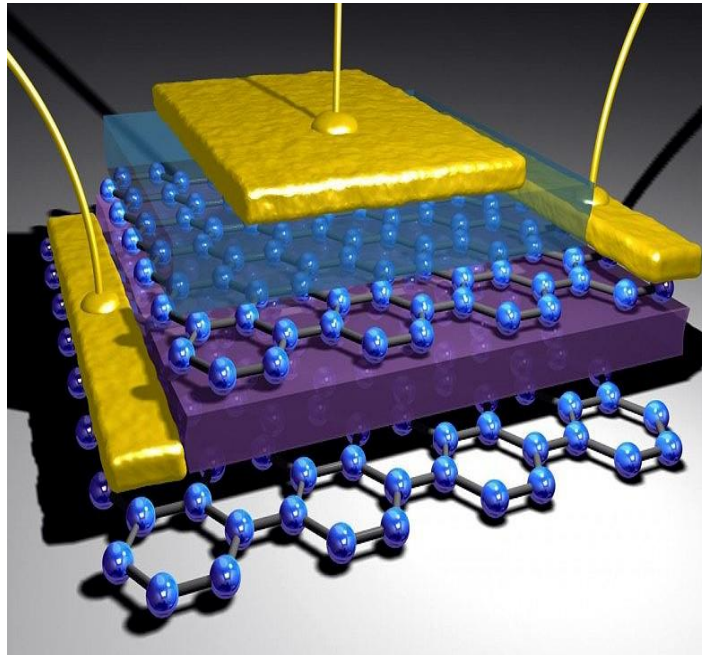


Рисунок 1.1. - Кристалічної ґратки графенового акумулятора (3 – D модель)

Але і мінусів чимало. По-перше, графен дуже складний у виробництві. Є кілька методів виробництва: хімічні (наприклад, оксиди графена з певного хімічного розчину) або фізичні (зрізання тонкої плівки графіту з наступною обробкою), але будь-який з них вкрай складний.

Але наукові дослідження не стоять на місці, багато наукових фахівців працюють у напрямках розробки акумуляторних батарей для електротранспорту, які зможуть вирішити нагальні проблеми, які зараз є у сучасних типах батарей.

1.3. Охолоджуючі системи АКБ електромобілів

Британці працюють над технологією іммерсійного охолодження батарей електромобілів, щоб продовжити їх термін служби та скоротити час заряджання. Дві великі проблеми для електромобілів: термін служби акумулятора та час заряджання зводяться до охолодження акумуляторної батареї. Тепер британський постачальник автозапчастин Ricardo працює із партнерами над створенням нового типу технології охолодження, яка, як сподівається компанія, дозволить заряджати

аккумулятори електромобілів швидше. Технологія, що називається імерсійним охолодженням, заснована на покритті батарей діелектричним охолоджуючим гелем, що називається MIVOLT, який використовується як електрична ізоляція в інших областях. У разі успіху ця технологія може продовжити термін служби батареї в електромобілях і прийняти більш високі значення струму при зарядженні, не перегріваючи їх, і потенційно скоротити час заряджання АКБ.



Рисунок 1.2. – Прототип аккумуляторної батареї Audi e-tron quattro

В Audi e-tron quattro використовується спеціальна система охолодження, яка допомагає підтримувати роботу батареї з оптимальною температурою та забезпечувати стабільну роботу

Проект імерсійного охолодження i-CoBat спрямований на скорочення розмірів та вартості систем охолодження, щоб дозволити автовиробникам створювати щільніші аккумуляторні батареї без збільшення накопичення тепла. Сучасні системи рідинного охолодження покладаються на охолоджувальні пластини з насосами для циркуляції етиленгліколю або іншої рідини, що охолоджує. Якщо це виявиться ефективним, технологія імерсійного охолодження могла б замінити поточні громіздкі та важкі системи охолодження, а також конкурувати з більш простими системами з повітряним охолодженням, такими як

у Nissan Leaf, які більш схильні до деградації батареї через перегрівання, ніж інші електромобілі.



Рисунок 1.3. – Батарея Nissan Leaf другого покоління без використання рідинного охолодження

Наприклад, Nissan обмежив кількість швидких зарядок, щоб запобігти пошкодженню акумуляторів, що ускладнювало подорож на електромобілі, яка потребувала б більше одного або двох швидких зарядів постійного струму. Хоча з того часу Nissan випустив оновлення програмного забезпечення електромобілів, щоб дозволити власникам послідовно використовувати швидкі зарядні пристрої постійного струму. Завдяки більш простим та дешевим системам охолодження електромобілі можуть використовувати батареї більшого розміру, які заряджаються швидше та слугитимуть довше. Охолоджуюча рідина MIVOLT також є біорозкладною, на відміну від етиленгліколю, який також використовується як охолодна рідина в більшості ДВЗ. Ricardo працює над проектом з британською компанією з виробництва матеріалів M&I Materials та WMG, виробничою діяльністю Університету Уоріка у Великій Британії в рамках програми Faraday Challenge британського уряду. Проект не перший, який працює над імерсивними системами охолодження, аналогічний проект було запущено на Тайвані у 2017 році. Потужність, продуктивність, практичність, швидкий час

зарядки і ціна є ключовими факторами, що спонукають споживачів вибрати електромобіль, а не автомобіль на викопному паливі, коли вони наступного разу змінюють автомобіль», - сказав Невілл Джексон, директор з технологій та інновацій Ricardo. «Завдяки сучасним технологіям управління тепловими режимами є вирішальними та сприяють прийняттю споживачами електромобілів».

Акумуляторна система охолодження

У цьому розділі описано основні типи елементів і системи охолодження для акумуляторних блоків, які використовуються в автомобільній промисловості.

Огляд комірок

На ринку найчастіше використовується три типи комірок:

- Циліндричні комірки
- Призматичні комірки
- Сумкові комірки

Найчастіше використовується циліндричні комірки, оскільки вони недорогі у виробництві, широко поширені, стабільні, безпечні та можуть використовуватися в багатьох галузях промисловості. Циліндричні комірки мають низьку ціну на ват/год і вищу напругу в елементах, ніж інші технології (3,7 В) .

Позитивний електрод може бути виготовлений з різних розчинів:

- Оксид літію кобальту (LiCoO_2)
- Оксид літію марганцю (LiMnO_4)
- Літій-залізофосфат (LiFePO_4)
- Негативний електрод виготовлений з графіту (вуглецю).

Електроліт - це рідина, що складається з солей літію, розчинених в етиленкарбонаті.

Літій-іонні призматичні елементи тонші й легші за циліндричні. Ці комірки мають прямокутний алюмінієвий або сталевий корпус, що підвищує їх стійкість. Конструкція призматичних осередків не стандартизована, з цієї причини вони мають вищу ціну за ват/год, ніж циліндричні комірки. Нестандартна форма забезпечує більшу гнучкість конструкції та можливість розшарування комірок

одна на одну для зменшення займаного об'єму. Термоуправління призматичних комірок гірше, ніж циліндричних.

У порівнянні з призматичними комірками пакети не мають алюмінієвого чи сталевих корпусу, а закриті м'якою полімерною пластиковою плівкою або оболонкою. З цієї причини вони дуже легкі.

Літій-полімерні батареї (LiPo) використовують полімерний електроліт, а не рідкий. М'які комірки безпечніші за призматичні через відсутність жорсткого корпусу, який у разі несправності елемента може вибухнути.

Таблиця 1 – Порівняння характеристик комірок

	Циліндричні	Призматичний	М'які
Вартість ват/год	Низька	Середня	Висока
Стійкість до деформації	Висока	Висока	Низька
Легкість зварювання	Висока	Низька	Низька
Стійкість до вологості та високих температур	Висока	Середня	Низька
Термічна керованість	Висока	Низька	Середня
Здатність до штабелювання	Низька	Висока	Середня
Собівартість продукції	Низька	Середня	Висока
Тривалість життя	Висока	Низька	Середня

Порівняно з літій-іонними елементами, м'які елементи мають вищу вартість, нижчий термін служби та меншу накопичену потужність.

У таблиці 1 наведено основні характеристики трьох найбільш використовуваних типів комірок.

Огляд систем охолодження акумуляторної батареї

Належне керування температурою акумулятора надзвичайно важливо для:

- Моніторинг стану комірок, виявлення помилок і повідомлення про них.
- Підтримання температури комірок під час використання в

оптимальному діапазоні.

- Підтримання однорідної температури елементів в акумуляторній батареї.
- Стримання будь-якого теплового розширення.

Оптимальний діапазон робочих температур для акумуляторної батареї залежить від характеристик використовуваних елементів. Більшість виробників вказують робочу температуру від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ під час фази заряджання та від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ під час розрядки.

Однак згідно з дослідженням, оптимальний діапазон температур для використання літій-іонних елементів становить від $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Рисунок 1.4 показує тенденцію електричної енергії, що постачається та споживається акумуляторною батареєю, як функція температури елементів.

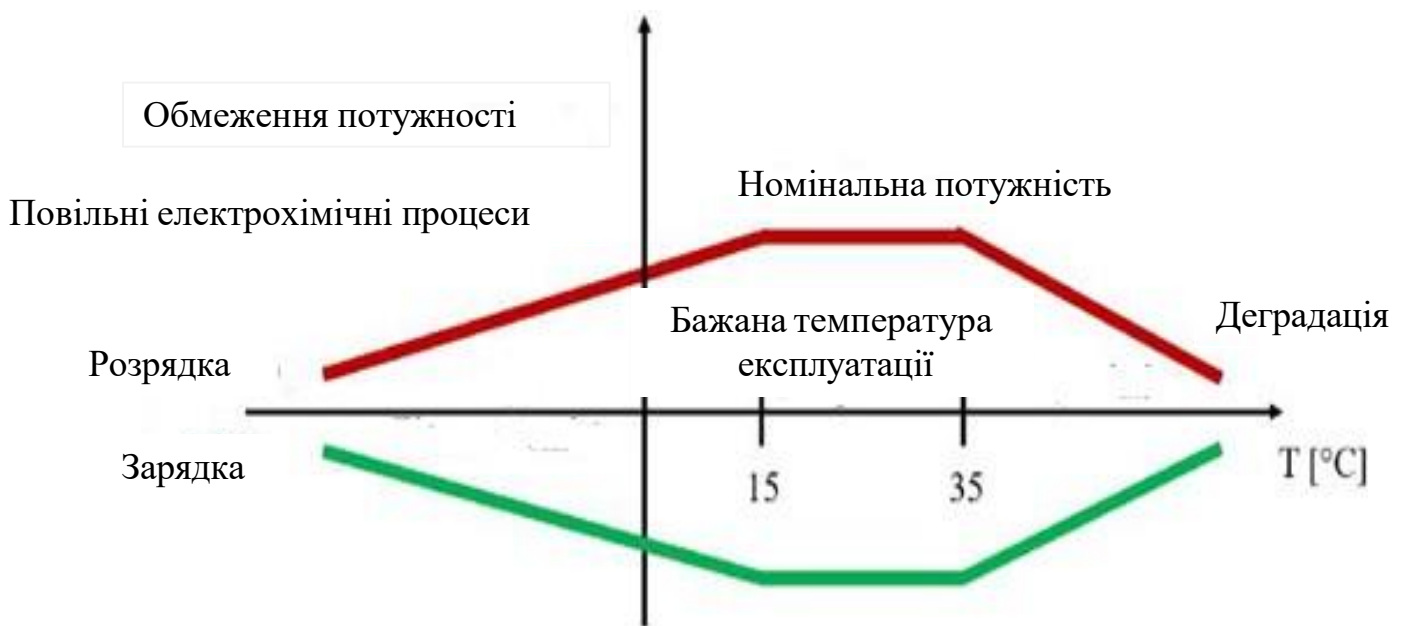


Рисунок 1.4. – Графік оптимальних температур для роботи літій-іонних елементів в АКБ електромобіля\

Як видно з рисунку 1.4, якщо температура комірок виходить за межі оптимального робочого діапазону, відбувається прогресивне зниження ліміту потужності, яку комірка може доставити та поглинути.

При низьких температурах швидкість хімічних реакцій, які відбуваються всередині комірки з виробленням енергії, зменшується. Це пов'язано зі стисненням матеріалів, які утворюють електроди, з подальшим зменшенням руху

іонів у інтеркаляційних просторах. З цієї причини електроди не приймають потоку струму, і елемент втрачає потужність і ємність.

При температурі вище 35 °С ємність елемента та обсяг доступної енергії починає зменшуватися. Якщо температура комірки перевищує 50 °С, тривалість життя комірки починає зменшуватися. При температурах вище 70 °С виникає загроза термічного витікання.

Середовище для регулювання температури батареї

Щоб підтримувати температуру елементів в оптимальному робочому діапазоні, необхідно обладнати акумуляторний блок системами охолодження та обігріву.

Основні середовища, що використовуються для регулювання температури комірок:

На повітрі

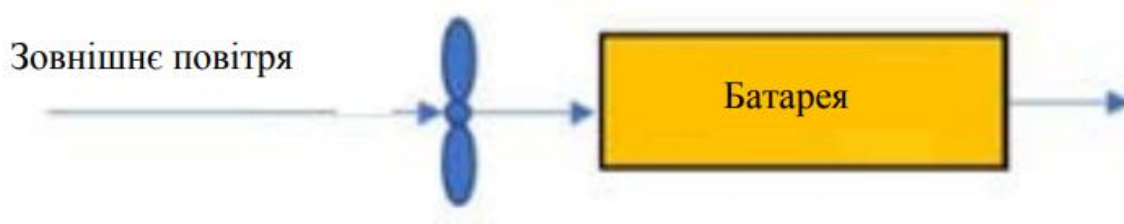


Рисунок 1.5. – Система повітряного охолодження

Ця конфігурація дозволяє охолоджувати лише акумуляторну батарею. Система використовує навколишнє повітря, щоб підтримувати температуру камер в оптимальному робочому діапазоні. Щоб збільшити або зменшити охолодження, можна змінити швидкість обертання одного або кількох вентиляторів. Цей тип охолодження не можна використовувати, якщо температура зовнішнього середовища висока. Простота системи робить її чудовою для застосувань, де основними факторами є вага та обмежений простір.

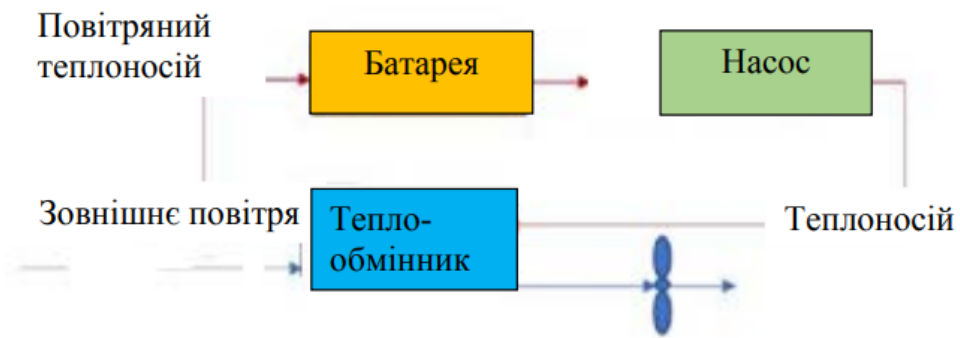


Рисунок 1.6. – Система рідинного охолодження

У цьому випадку система охолодження використовує насос для примусового прокачування теплоносія всередину рідинно-повітряного теплообмінника. Цей тип системи охолодження більш ефективний, ніж використання лише повітря. Наявність теплоносія призводить до збільшення ваги і ускладнення системи.

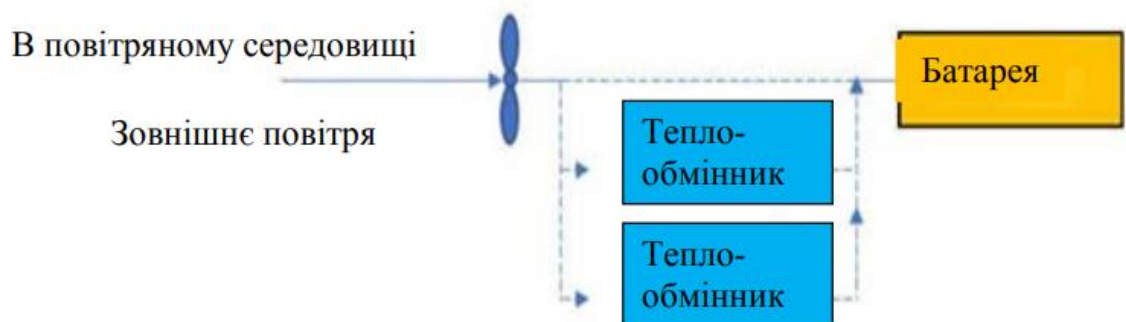


Рисунок 1.7. – Система управління температурою HVAC

Система регулювання температури на рисунку 1.7 використовує систему HVAC (опалення, вентиляції та кондиціонування повітря) для керування температурою акумуляторної батареї. Ця система краще за два попередніх макета за рахунок підвищення складності схеми. У цій конфігурації, крім охолодження, є можливість нагрівати елементи акумуляторної батареї.

За допомогою холодоагенту



Рисунок 1.8. – Система охолодження холодоагентом

Система охолодження на рисунку 1.8. подібна до системи на рисунку 1.6. Основна відмінність полягає у використанні двох різних охолоджуючих середовищ. Ця система використовує не повітря для охолодження елементів, а холодоагент. Використання холодоагенту забезпечує швидкість охолодження в 3 рази вищу, ніж рідкий гліколь, і дозволяє контролювати температуру акумуляторної батареї залежно від температури зовнішнього повітря.

Використання холодоагенту як системи охолодження забезпечує швидшу теплову реакцію, ніж звичайні системи. Ця конфігурація забезпечує більший контроль над безпекою акумуляторної батареї, дозволяючи використовувати спреї для блокування будь-якого розповсюдження тепла.

За охолоджувачем і холодоагентом

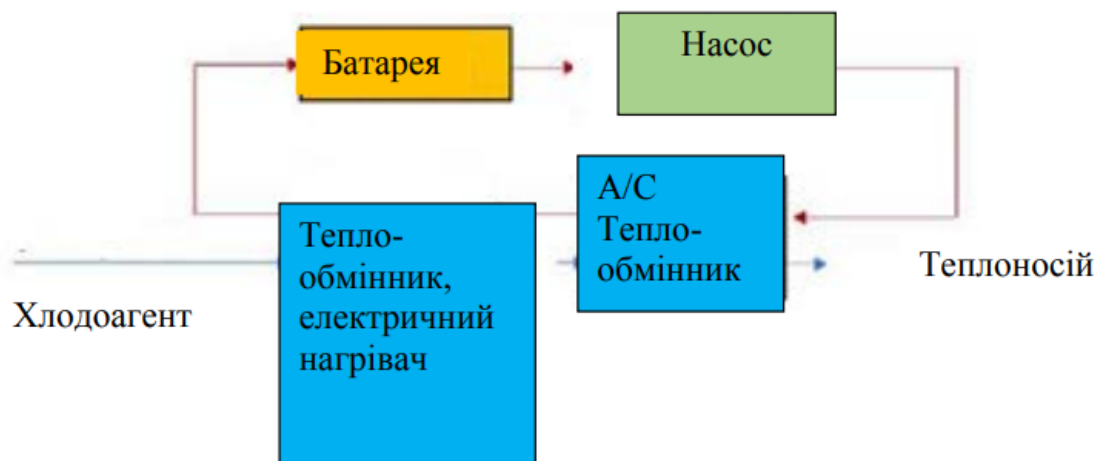


Рисунок 1.9. – Система охолодження охолоджуючої рідини та холодоагенту

Система управління температурою акумуляторної батареї, показана на рисунку 1.10, використовує холодоагент замість повітря як вхідний засіб для теплообмінників. Ця система дозволяє охолоджувати і нагрівати

елементи акумуляторної батареї незалежно від температури зовнішнього повітря. Негативною стороною такої конфігурації є складність системи і збільшення ваги за рахунок наявності рідкого теплоносія.



Рисунок 1.10. – Рідинна система охолодження

Система охолодження на рисунку 1.10 використовує рідину для охолодження комірок, занурених у неї. Цей тип охолодження забезпечує однорідний розподіл температури всередині акумуляторної батареї. Недоліком такої конфігурації є надмірна вага системи.

У таблиці 2 узагальнено та порівняно характеристики трьох основних систем охолодження для акумуляторних блоків.

Таблиця 2 – Порівняння систем охолодження

	Повітряне охолодження	Рідинне охолодження	Охолодження холодоагентом
Ефективність охолодження/нагрівання	Низька	Висока	Дуже висока
Складність системи	Низька	Висока	Середня
Вартість	Низька	Висока	Потенціально низька
Вага	Низька	Висока	Середня
Безпека	Герметична + водонепроникна	Можливий витік	Перевага безпеки
Рівномірність температури	Низька	Висока	Висока
КОНТРОЛЬ	Низький	Високий	Високий

Розділ 2 ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ

2.1. Постановка проблеми

Другий приклад стосується системи охолодження високопродуктивної батареї для автоспорту. Проект планує розробити систему охолодження, яка використовує рідину, яка тече всередині системи .

Повітроводи, згадувані як «охолоджувачі», через промислову таємницю не можуть бути описано детально. Вони складаються з суміші матеріалів, які дають чудові результати, характеристики гнучкості та деформованості при забезпеченні достатньої міцності та структурної цілісності.

Швидкість потоку теплоносія всередині акумуляторної батареї знаходиться в діапазоні від 50 до 70 літрів на хвилину.

До складу гідравлічної системи входять охолоджувачі 4-х модулів акумуляторної батареї з додавання вхідних і вихідних труб.

Цілі проекту

- Максимальний перепад тиску в системі: 500 мбар при 70 л/хв.
- Коефіцієнт витрати теплоносія дорівнює 2,5 при 70 л/хв і 50 л/хв.

2.1.1. Аналіз гідродинаміки компонентів охолодження

У цьому параграфі описано аналіз динаміки рідини, проведений на охолоджувачах акумуляторних блоків. Дослідження включає виконання моделювання:

- Стационарне: для оцінки перепаду тиску та швидкості потоку вздовж кулери.
- Перехідний процес: для аналізу поведінки теплоносія під час заповнення кулера.

2.1.2. Геометрія та параметри

Фізичний домен Змодельовані охолоджувачі:

- Короткий кулер з каліброваними отворами діаметром 1,9 мм.
- Короткий кулер з каліброваними отворами діаметром 1,8 мм.
- Довгий кулер з каліброваними отворами діаметром 2,0 мм.
- Довгий кулер з каліброваними отворами діаметром 2,5 мм.

Оскільки геометрія не симетрична через наявність вхідного і вихідного каналів обидва розташовані на одній стороні, необхідно імітувати кулери повністю.

На рисунку 2.1 і рисунку 2.2 зображено охолоджувачі, змодельовані шляхом виділення внутрішнього об'єму.

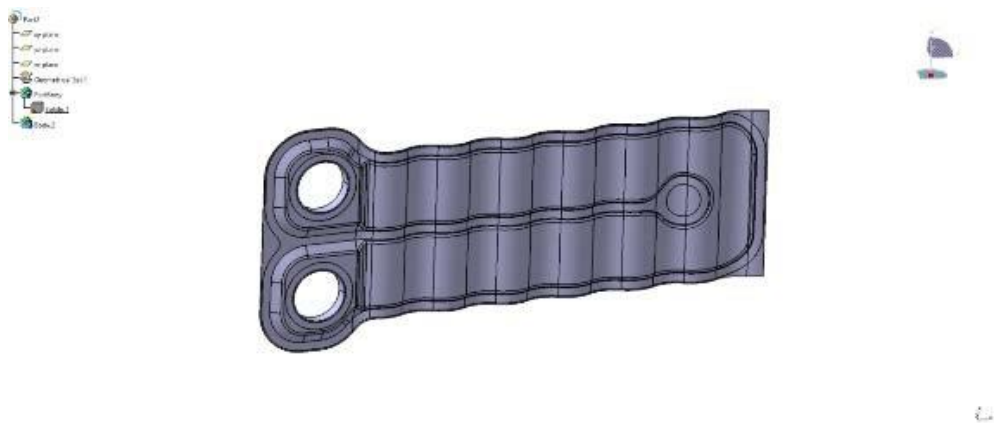


Рисунок 2.1 – Короткий кулер CAD модель

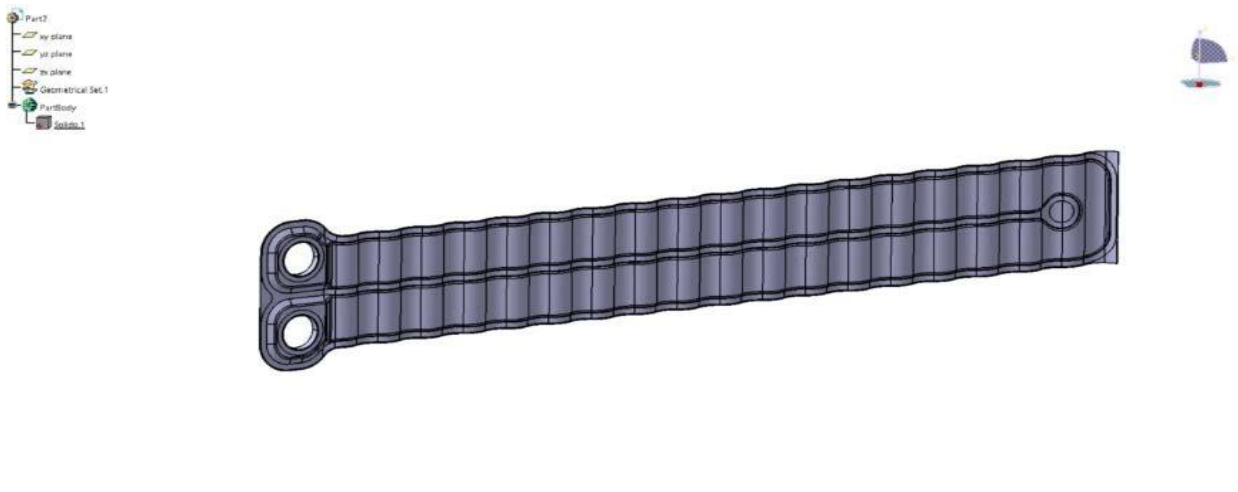


Рисунок 2.2 – Довгий кулер CAD модель

Таблиця 2. Параметри охолоджувачів

Довжина кулера [м]	0,824
Довжина короткого холодильника [м]	0,206
Площа перетину [м ²]	2,29e-5

Властивості рідини

Рідина, яка використовується для охолодження, являє собою суміш, що складається з 90% води та 10% етиленгліколю. Значення властивостей рідини при температурі випробування 25 °С показано в таблиці 11.

Таблиця 3– Властивості рідини

Властивості	Значення
Щільність [кг/м ³]	1013
Динамічна в'язкість [Па*с]	0,001183
Кінематична в'язкість [м ² /с]	1.1662E-06
Питома теплоємність [Дж/кг/К]	4087
Теплопровідність [Вт/м/К]	0,52

2.1.3. Налаштування симуляції

Область розрахунку

Оскільки область моделювання не має періодичності, періодичні граничні умови не застосовані для забезпечення повного виходу потоку. По цій причині, для того щоб потік виходив повністю перед охолоджувачем і після нього були додані канали довжиною у вісім разів більше ніж діаметри вхідного та вихідного отвору.

Граничні умови

Область дослідження розділена на 4 різні межі, визначені таким чином:

- Вхід: встановлюється як вхід масової витрати. Массова витрата

становить 0,01264 кг/с.

- Вихід: встановлено як вихід тиску.
- Циліндри: ця межа представляє калібровані отвори кулерів. Вибір призначення окремої межі для цієї частини геометрії говорить про необхідність правильного уточнення сітки розуміння явищ, які розвиваються в цій делікатній сфері.
- Стіна: ця межа включає всю решту геометрії. З фізичної точки зору її розглядають як адіабатичну поверхню.

Фізика

Вибір найбільш підходящої турбулентної моделі базується на показаннях в літературі . Найбільш підходящою є модель для геометрії SST k- ω . Хоча потік всередині охолоджувачів є ламінарним, існує відокремлення за каліброваними отворами. Модель турбулентності найкраще підходить для роботи зі сприятливими та несприятливими градієнтами тиску в межах прикордонного шару k - ω . Моделі k- ω дозволяють правильно аналізувати потік біля стін. Для вихідної k- ω моделі Вілcoxа, гранична умова ω у вільному потоці, для кінетичної енергії турбулентності $k \rightarrow 0$ і частоти турбулентності $\omega \rightarrow 0$, є найбільш проблематичними. Щоб подолати цю проблему, SST (Hybrid Shear Stress Transport) дозволяється трансформувати модель k- ϵ в модель k- ω в область поблизу стінки, а стандартна модель k- ϵ використовується в повністю турбулентній області далеко від стіни .

Моделі, які використовуються для визначення фізики:

- Тривимірні: оскільки виконане моделювання є тривимірним доменом.
- Стабільні: використовується для стаціонарного моделювання.
- Нестационарні: використовується для моделювання перехідних процесів.
- Рідина: робоча рідина, що, являє собою суміш води та етиленгліколю.

Властивості рідини наведено в таблиці 3.

- Відокремлений потік: відокремлений підхід є найбільш прийнятним для рідини.
- Постійна щільність: передбачається постійна щільність.
- Турбулентна: через фізичну природу проблеми з турбулентною моделлю

вимагають обов'язкового налаштування.

- Моделі RAS: усереднене моделювання за Рейнольдсом. OpenFOAM включає усереднене моделювання, турбулентності Reynolds на основі лінійних і нелінійних моделі вихрової в'язкості та моделі переносу напруг Рейнольдса.
- SST k- ω : це вдосконалений варіант стандартних моделей k- ω , який поєднує найкращі характеристики моделей k- ω і k- ϵ .

2.1.4. Генерація сітки

Автоматизована 2D сітка

Сітка в області будується з урахуванням очікуваної поведінки потоку. Для забезпечення збіжності турбулентної моделі поблизу країв області, сітка складається з призматичних шарів поблизу периметра каналу. Решта домену дискретизована за допомогою шестигранних комірок. Через характер проблеми сітка менш груба в регіонах нижче за напрямком від каліброваних отворів. Вибір кількості шарів призми, що дорівнює 5, виходить із спроби отримати правильне представлення потоку біля стінок із збереженням низької розрахункової вартості. Призменний шар біля товщини стінки встановлено таким чином, щоб отримати y^+ на всіх границях менше одиниці.

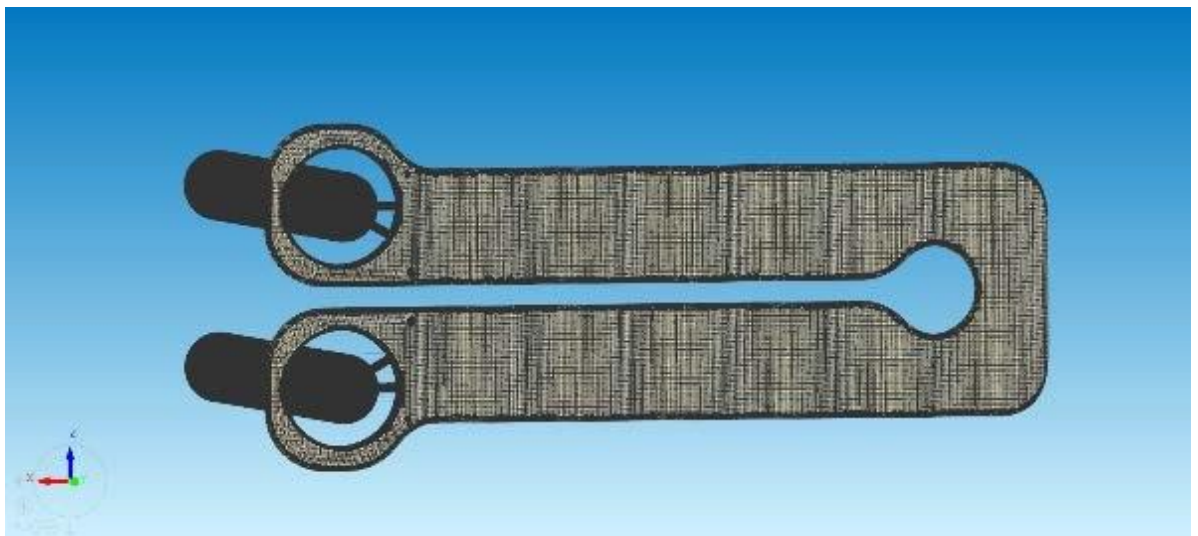


Рисунок 2.3 – Представлення короткої сітки кулера

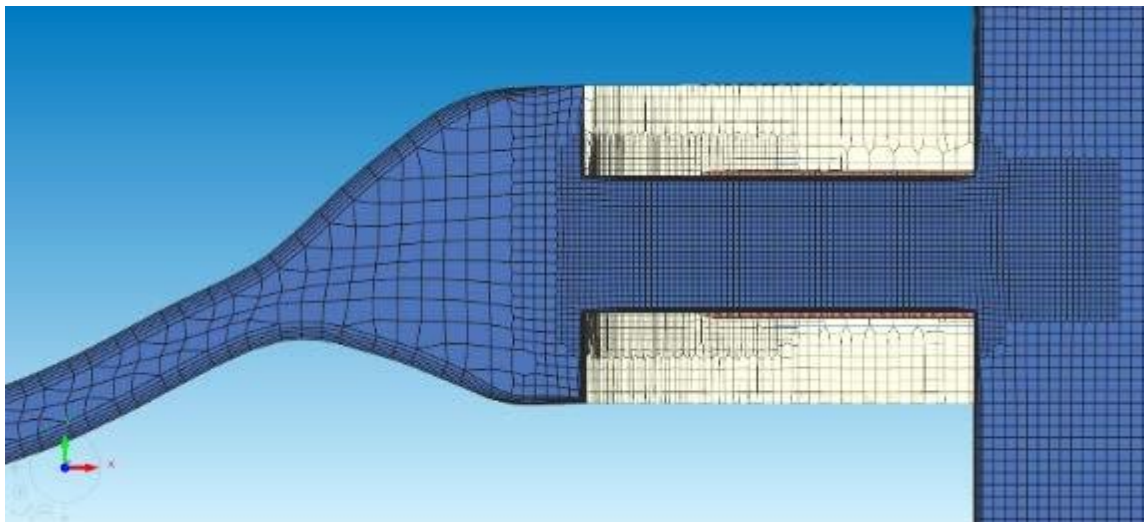


Рисунок 2.4 – Розріз короткої сітки охолоджувача

Щоб оптимізувати сітку створені спеціальні засоби керування:

- Керування поверхнею: керування поверхнею здійснюється шляхом налаштування рівня відносно базового значення розміру моделювання. Кожен рівень характеризується значенням розміру комірки, рівним половині значення попереднього рівня.

Таблиця 4 показує максимальні та мінімальні рівні межі, які використовується для створення сітки.

Таблиця 4 – Рівні контролю поверхні

Межа	Мінімум	Максимум
Стіна	Рівень 2	Рівень 1
Вхідний отвір	Рівень 2	Рівень 0
Розетка	Рівень 2	Рівень 0
калібровані отвори	Рівень 3	Рівень 3

Для точного фіксування, об'ємні елементи контролю зроблені поблизу каліброваних отворів.

- 2 регулятори об'єму навколо каліброваних отворів. Рівень витонченості в об'ємних елементах керування встановлено на рівень 4.

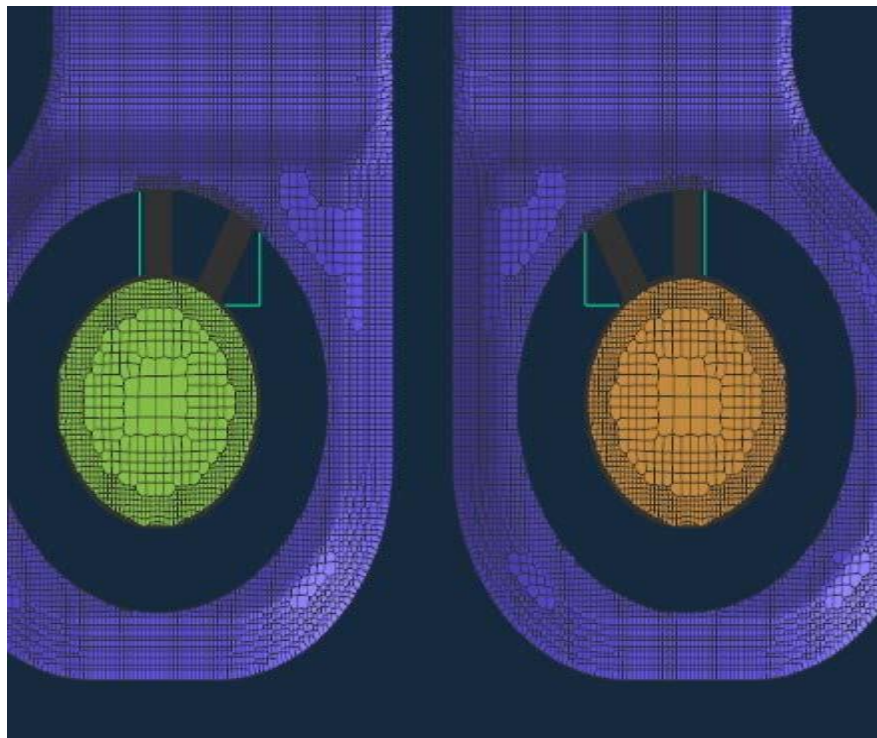


Рисунок 2.5 – Деталь об'ємного контролю на отворах

- 2 циліндричні об'ємні контролі в зоні, прилеглій до каліброваних отворів, встановлені на рівні 3, щоб мати змогу знімати турбулентні явища і перепади тиску внаслідок проходження рідини через калібровані отвори.

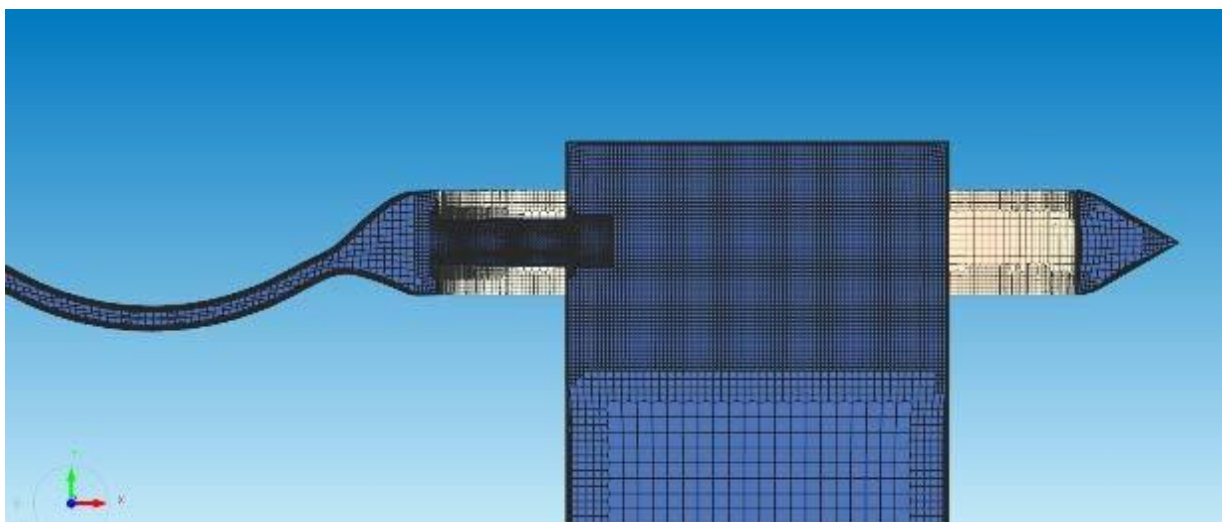


Рисунок 2.6 – Деталь циліндричного об'ємного контролю

2.1.5. Дослідження незалежності сітки

Для реалізації дослідження на залежності сітки оцінюються 3 різні сітки,

прогресивно вдосконалені. Різні проаналізовані конфігурації показано в таблиці 5. Оскільки всі значення, які використовуються для визначення сітки, посилаються на базовий розмір, зміна лише цього останнього параметра виконує дослідження незалежності сітки. Усі три різні міри базового розміру гарантують, що $u + < 1$.

Таблиця 5: Характеристики сітки, використаної для дослідження незалежності від сітки

№ шари	Призма	Базовий розмір [мм]	Номер клітин	Висота першої комірки розміру комірки] [% співвідношення	Розширення
5		0,6	785037	0,1	1,2
5		1	335005	0,1	1,2
5		1,3	126117	0,1	1,2

Як зазначено в книзі, написаній Роучем, дослідження незалежності сітки виконується відносно параметрів, що представляють найбільший інтерес для моделювання. Як зазначено в таблиці 6, відстежується такий параметр:

- Перепад тиску в області, $\Delta P / \rho$ (поверхнева величина). Для розрахунку вищезазначеного параметра одночасний асимптотичний допуск до 1×10^{-4} разом із залишковими значеннями нижче 1×10^{-5} встановлюється як зупинний критерій. Аналіз дослідження незалежності сітки проводиться для фіксованого значення маси і витрата на вході дорівнює 0,01264 кг/с.

Отримані результати представлені в таблиці 6.

1. Маємо принаймні 3 симуляції (тонку, середню, грубу) з константою коефіцієнту уточнення, $r > 1,3$ між ними
2. Вибір параметра, що вказує на збіжність сітки
3. Обчислення порядку збіжності p :

$$p = \frac{\ln\left(\frac{\phi^3 - \phi^2}{\phi^2 - \phi^1}\right)}{\ln r} \quad (3.1)$$

4. Виконання екстраполяції Річардсона для прогнозування значення при $h=0$:

$$f(h=0) = \phi^1 + \frac{\phi^1 - \phi^2}{r^p - 1} \quad (3.2)$$

5. Розрахунок індексу конвергенції сітки (GCI) для середнього та тонкого рівні уточнення:

$$GCI_{12} = \frac{1.25 \cdot |\varepsilon_{12}|}{r^p - 1} \quad (3.3)$$

6. Розрахунок індексу конвергенції сітки (GCI) для середнього та грубого рівні уточнення:

$$GCI_{23} = \frac{1.25 \cdot |\varepsilon_{23}|}{r^p - 1} \quad (3.4)$$

7. Перевірка того, що сітки знаходяться в асимптотичному діапазоні збіжності:

$$\frac{GCI_{23}}{r^p \cdot GCI_{12}} \approx 1 \quad (3.5)$$

Для розрахунку r ефективний коефіцієнт уточнення сітки $r = (N1/N2)^{(1/3)}$, оскільки це r можна використовувати для неструктурованих сіток. N – кількість комірок для кожної конфігурації.

Таблиця 6: Результати дослідження незалежності мережі

Базовий розмір [мм]	№ призми шар	$\Delta P/\rho$ короткий 1.9	$\Delta P/\rho$ короткий 1.8	$\Delta P/\rho$ довго 2.5	$\Delta P/\rho$ довго 2.0
0,6	5	12,532	13,61957	11,62714	15,73686
1	5	12,6159	13,71137	11,70604	15,84438
1,3	5	12,9315	14,06317	12,0143	16,2729
Відносна похибка % 1		0,669486	0,673998	0,678572	0,683208
Відносна похибка % 2		2,501605	2,565791	2,633358	2,704579

Екстрапольована похибка %	0,243014	0,238521	0,233968	0,229352
Екстраполяція Річардсона	12,50162	13,58716	11,6	15,70085
GCI12	0,303031	0,297442	0,291777	0,286034
GCI23	1,132308	1,132308	1,132308	1,132308
p	5,040919	5,111925	5,185266	5,261074
Збіжність рішення	0,99335	0,993305	0,99326	0,993214
Максимальна похибка	3,324291	3,384791	3,448396	3,51535
Падіння тиску [мбар]	126,6414	138	117,508	159,0496

Програмне забезпечення CFD повертає значення тиску, поділене на густину рідини як вихідна змінна. 4 стовпці таблиці стосуються 4 різних імітованих охолоджувачів. Як і очікувалося, для всіх чотирьох змодельованих охолоджувачів значення Grid Convergence Index зменшується від грубої конфігурації до тонкої. Рішення значення конвергенції прагне до 1 у всіх проаналізованих охолоджувачах, гарантуючи, що всі сітки знаходяться в асимптотичний діапазон збіжності. Останній рядок таблиці 14 показує реальний тиск падіння в кожному охолоджувачі, передбачене моделюванням.

2.1.6. Результати моделювання в стаціонарному стані

У цьому розділі показано результати моделювання всіх чотирьох охолоджувачів. Для кожного охолоджувача є контури, що стосуються тиску та швидкості потоку .

Короткий розподіл тиску кулера на 1,9 мм

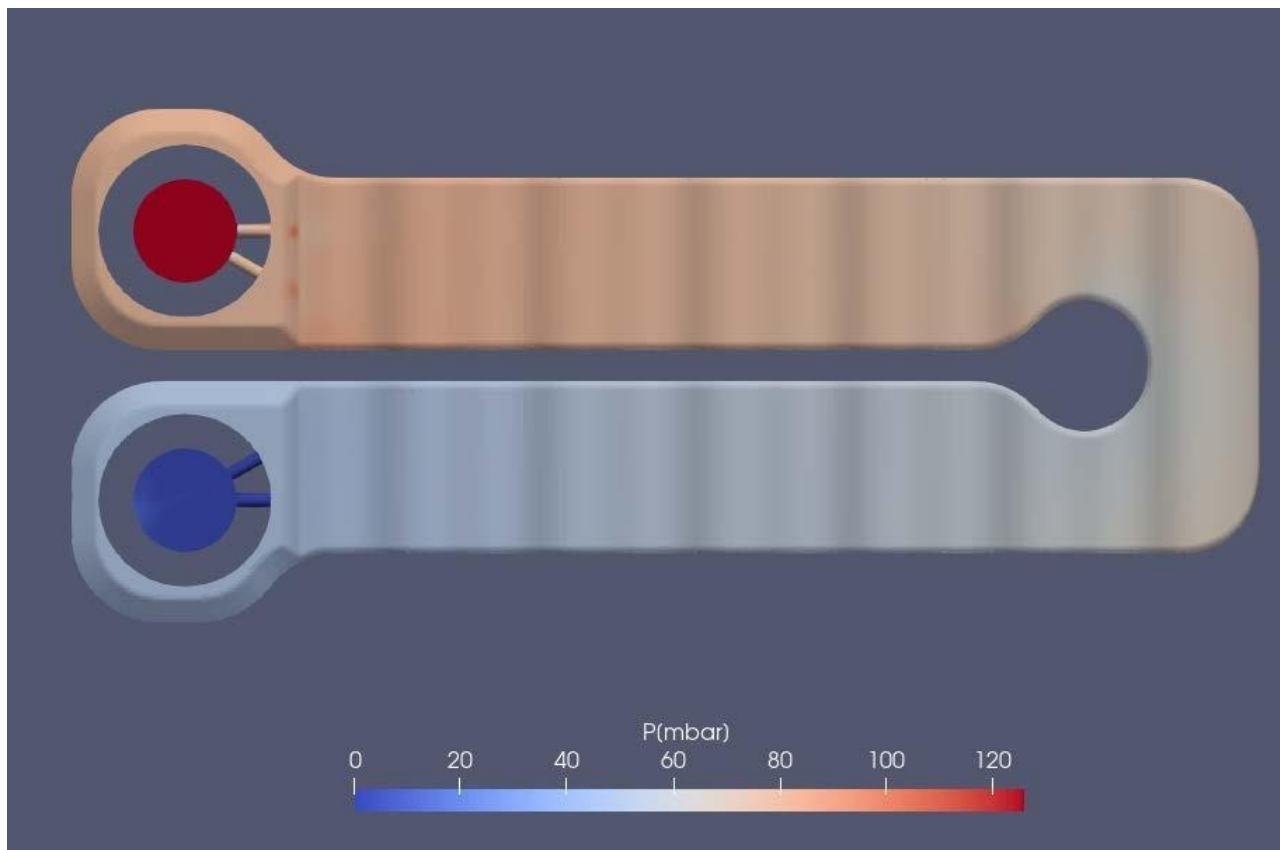
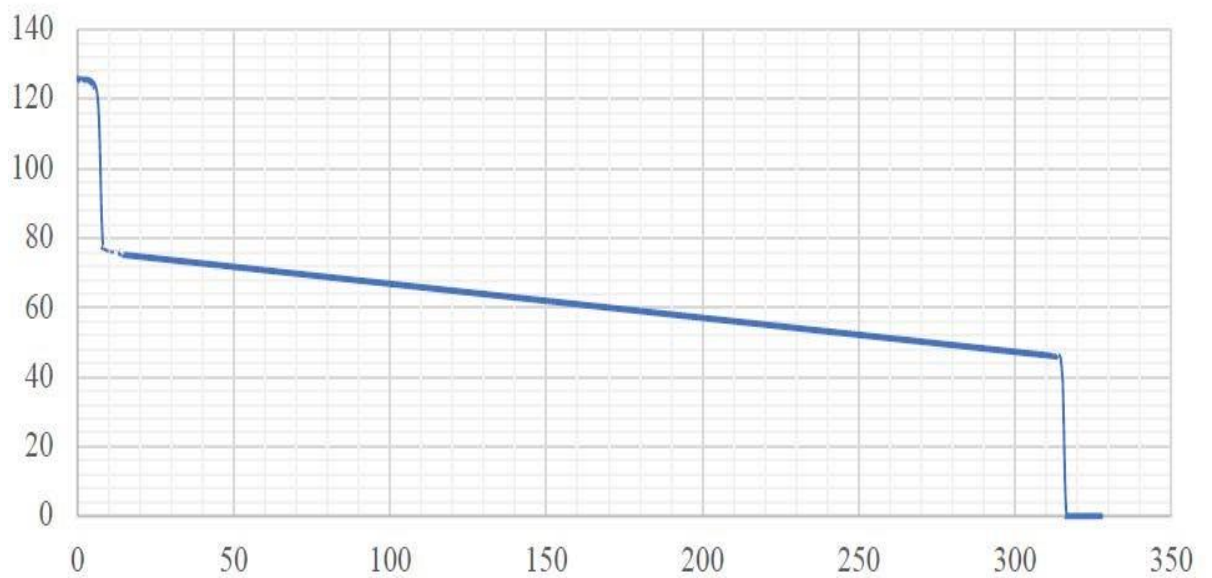


Рисунок 2.7 – Короткий контур тиску охолоджувача 1,9 мм

На рисунку 2.7 показано розподіл тиску на короткому охолоджувачі з відкаліброваним отвором діаметром 1,9 мм. Аналіз рисунка показує, як відкалібрований отвір є основною причиною падіння тиску. Цікаво відзначити, що на виході з двох каліброваних отворів є дві точки високого тиску, потік стикається з бічними стінками кулера. Ця поведінка залежить від геометрії кулера, яка не пропускає потік, а перешкоджає йому.



Повздовжня координата [мм]

Рисунок 2.8 – Короткий тренд тиску кулера на 1,9 мм

Аналіз рисунка 2.8 показує, як падіння тиску має лінійну тенденцію вздовж кулер. Загальний перепад тиску становить 125 мбар, з яких приблизно 1/3 відбувається вздовж канал і 2/3 через калібровані отвори.

Короткий контур швидкості охолодження 1,9 мм

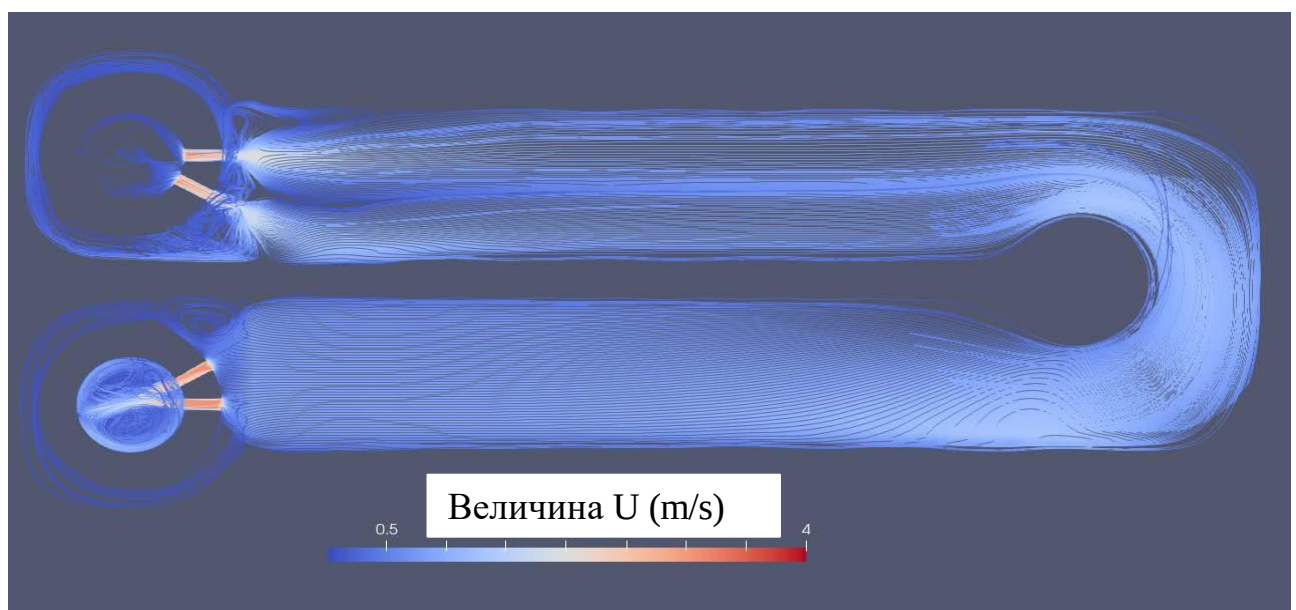


Рисунок 2.9 – Короткий контур охолоджувача товщиною 1,9 мм (обтічні лінії)

На рисунку 2.9 – показано швидкість рідини, що протікає всередині представленого охолоджувача обтічні лінії. Цікаво відзначити, що поведінка потоку всередині кулера є майже завжди ламінарний; гарантує відсутність закручених структур уздовж кулера рівномірне охолодження всіх клітин, що контактують з поверхнею. Єдині завихрені структури, які утворюються, розташовані за каліброваними отворами. Нижче за течією каліброваних отворів, через уповільнення та розширення потоку, відбувається від'єднання. Коли потік розширюється, утворюється несприятливий градієнт тиску що викликає від'єднання. Поділ потоку створює зони турбулентного рециркуляційного потоку з втратами механічної енергії. Вихори утворюються тільки в області, прилеглій до каліброваних отворів і не мають негативного впливу на охолодження.

Таблиця 7: Розподіл потоку теплоносія в короткому кулері 1,9 мм

Qin_0° [%]	Qin_30° [%]	Qout_30° [%]	Qout_0° [%]
55	45	45	55

Таблиця 7 - представляє витрату теплоносія у відсотках, що проходить всередині каліброваних отворів. З таблиці розподілу швидкості потоку між горизонтальними отворами та отворами під кутом 30° є однакові як на вході, так і на виході. 55% потоку проходить всередині горизонтальних отворів, а 45% - в похилих. Геометрична орієнтація отворів є причиною руху на виході з кулера турбулентної поведінки, як показано на рисунку 2.9.

Короткий розподіл тиску кулера на 1,8 мм

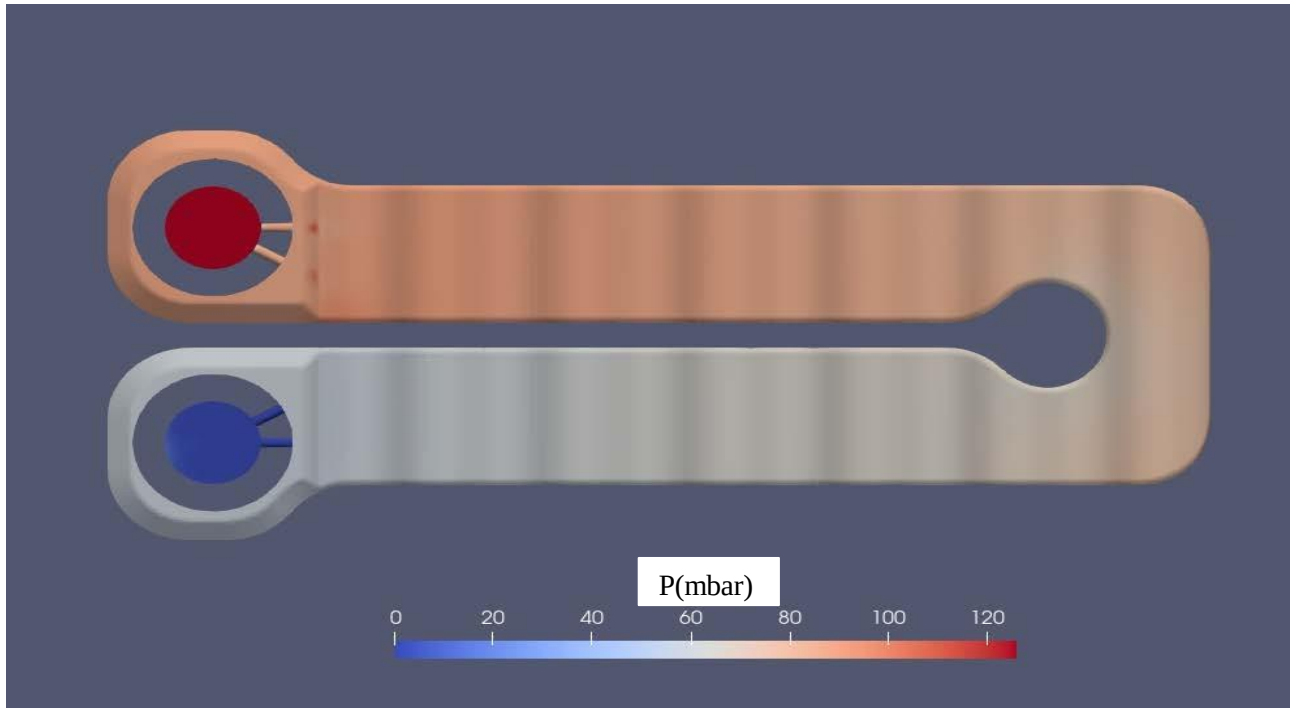


Рисунок 2.10 – Короткий контур тиску охолоджувача 1,8 мм

На рисунку 2.10 – показано розподіл тиску на короткому охолоджувачі з каліброваним отвором діаметром 1,8 мм. Аналіз рисунку показує, як відкалібровані отвори є основною причиною падіння тиску. Цікаво відзначити, що на виході з двох каліброваних вхідних отворів є дві точки високого тиску, потік стикається з бічними стінками кулера. Ця поведінка залежить від геометрії кулера, яка не пропускає потік, а перешкоджає йому.

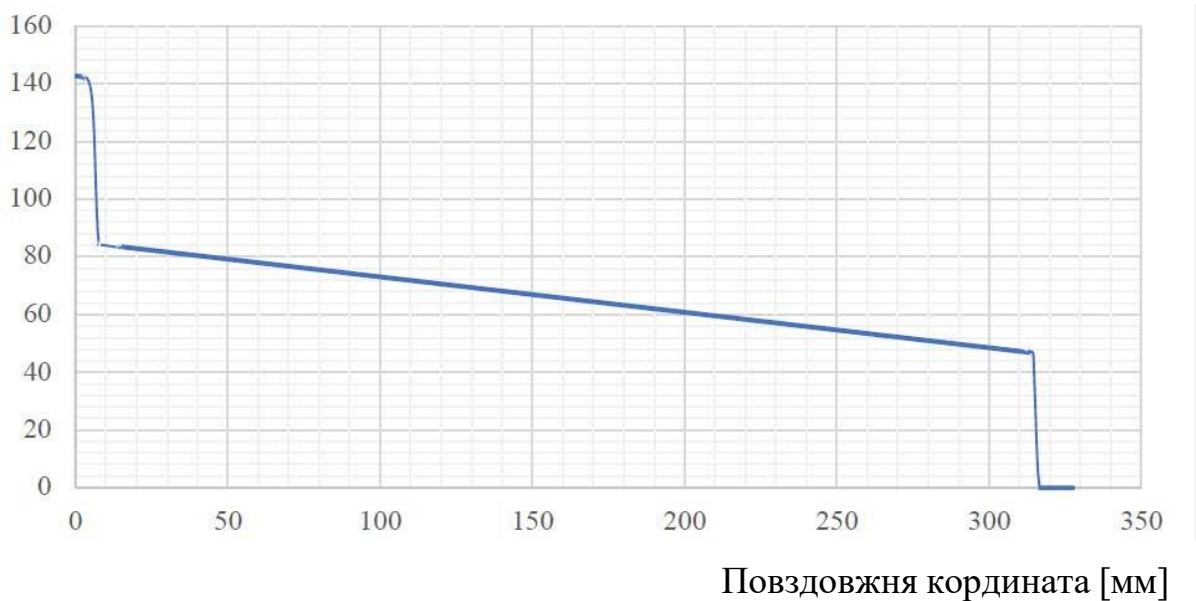


Рисунок 2.11 –Короткий тренд тиску кулера на 1,8 мм

Аналіз рисунку 2.11 показує, як падіння тиску має лінійну тенденцію вздовж охолоджувач і має два стрибки у відповідності з каліброваними отворами, рівними 57 і 43 мбар. Загальний перепад тиску становить 141 мбар, що на 11% більше, ніж у версії з 1.9 мм. У цій конфігурації перепад тиску вздовж вхідних отворів становить приблизно 40%, а вздовж вихідних отворів – 30%. Падіння тиску відбувається вздовж охолоджувача.

Короткий контур швидкості охолодження 1,8 мм

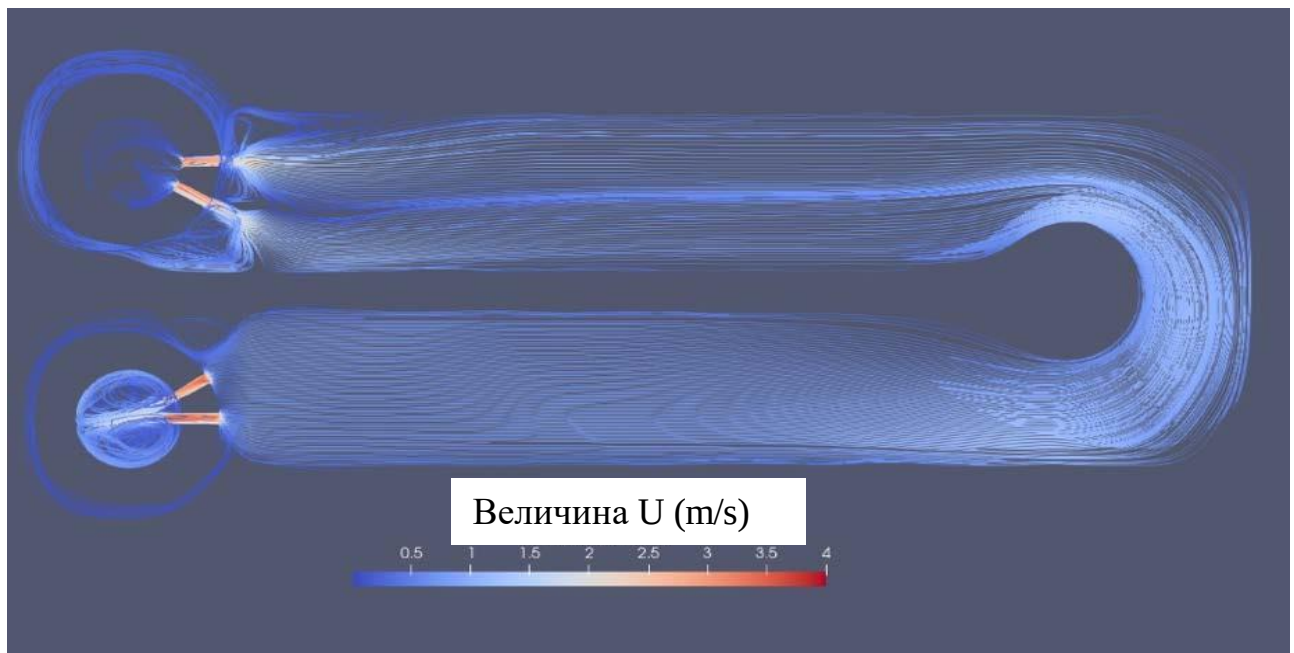


Рисунок 2.12 – Короткий контур швидкості охолоджувача 1,8 мм
(зображення обтічної лінії)

На рисунку 2.12 показано швидкість рідини, що протікає всередині представленого охолоджувача. Цікаво відзначити, що ламінарний потік всередині кулера відбувається як і в попередньому випадку. Відсутність завихрених структур уздовж кулера забезпечує рівномірне охолодження всіх клітин, що контактують із зовнішньою поверхнею. Також у цьому випадку калібровані отвори є маленькі і мають ізольовані вихори. Завихрення утворюються в результаті відриву потоку на виході з каліброваних отворів. Їх розмір і розташування не впливають на охолодження.

Таблиця 8: Розподіл потоку теплоносія в короткому кулері 1,8 мм

Qin_0° [%]	Qin_30° [%]	Qout_30° [%]	Qout_0° [%]
55	45	45	55

Таблиця 8 представляє витрату теплоносія у відсотках, що проходить всередині калібровані отвори.

Результати такі ж, як і в попередньому моделювання. Потік достатньо збалансований між каліброваними отворами. Також в у цьому випадку на виході з охолоджувача виникає турбулентна область через геометрію отвора, які концентрують два вихідних потоки, створюючи закручені структури.

Довгий розподіл тиску кулера 2,0 мм

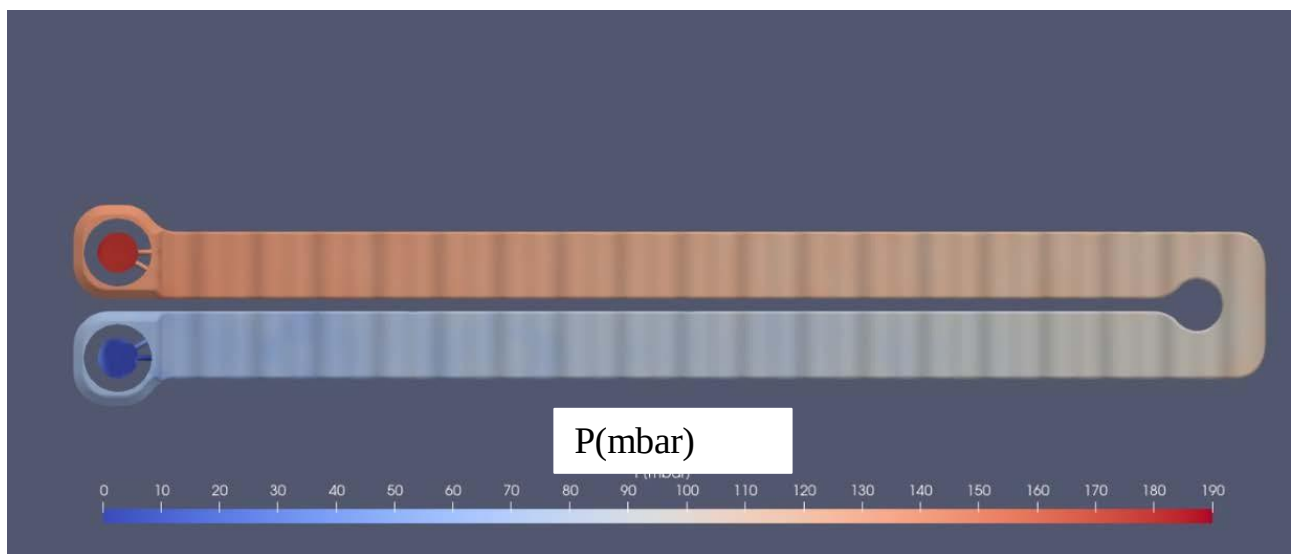


Рисунок 2.13 – Довгий контур тиску охолоджувача 2,0 мм

На рисунку 2.13 показано розподіл тиску на поверхні довгого охолоджувача, що має калібровані отвори діаметром 2 мм. Аналіз рисунка показує, що калібровані отвори більше не є основною причиною падіння тиску. Це цікаво зауважте, що на виході з двох каліброваних вхідних отворів є два високих тиску точки, де потік стикається з бічними стінками кулера.

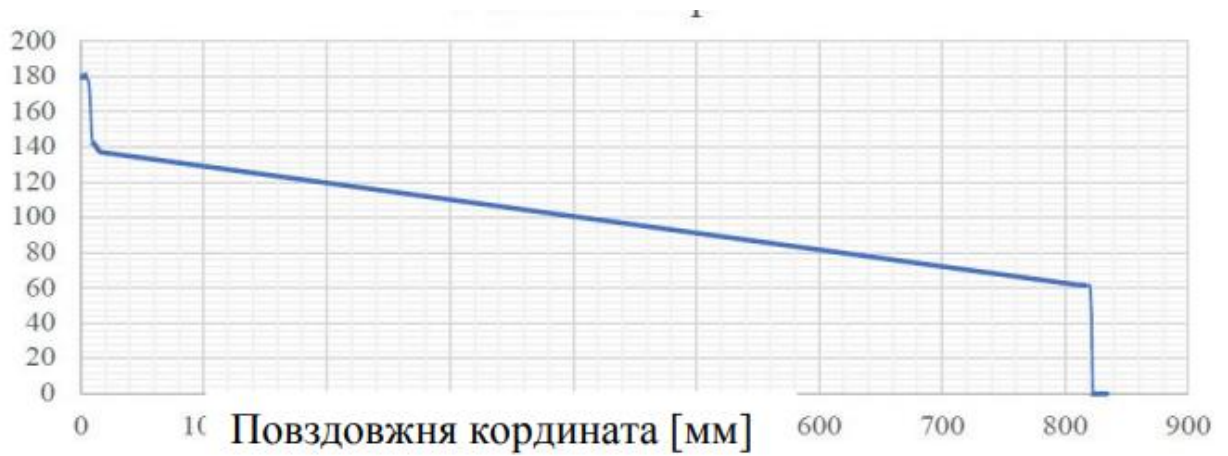


Рисунок 2.14 – Тенденція тиску в охолоджувачі 2,0 мм

Аналіз рисунку 2.14 показує, як падіння тиску має лінійну тенденцію вздовж кулера і має два стрибки у відповідності з каліброваними отворами, рівними 36 і 58 мбар. Загальний перепад тиску становить приблизно 178 мбар. Падіння тиску вздовж вхідних отворів становить приблизно 20% від загального падіння, вздовж вихідних отворів – приблизно 33%. Решта падіння тиску відбувається вздовж охолоджувача. Падіння тиску вздовж охолоджувач стає рівним уздовж каліброваних отворів за рахунок збільшення довжини каналу в 4 рази від минулої спроби.

Довгий контур швидкості охолодження 2,0 мм

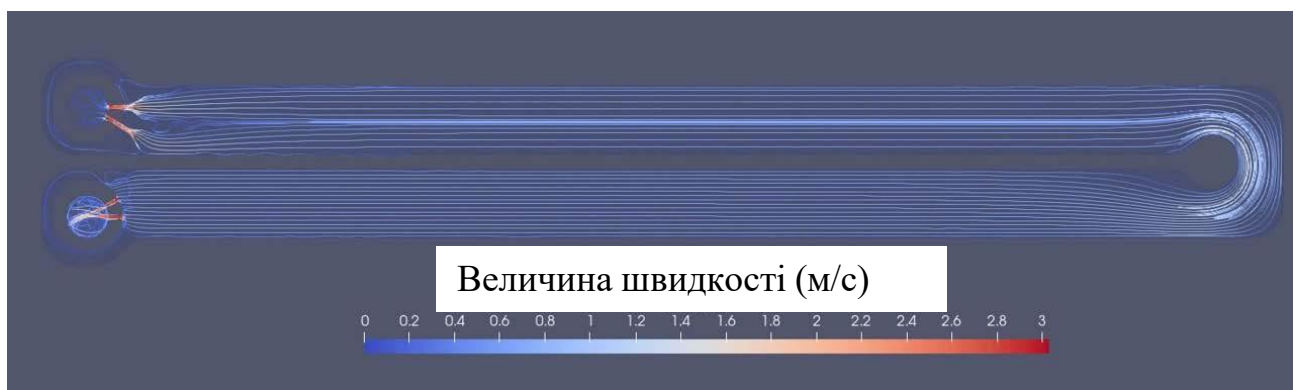


Рисунок 2.15 – Довгий контур швидкості охолоджувача 2,0 мм (обтічні лінії)

На рисунку 2.15 – показаний контур швидкості потоку всередині охолоджувача. Як видно з рисунка, потік всередині кулера ламінарний. Така поведінка забезпечує однорідний теплообмін між теплоносієм і осередками в контакті з поверхнею охолоджувача. Нижче за вхідними каліброваними отворами є невелика ділянка з збільшеним тиском рідини. Ця поведінка, яка закінчується через кілька сантиметрів, відбувається за рахунок розширення потоку на виході. Завитки утворюються як результат поділу потоку на виході з каліброваних отворів. Їх розмір і розташування не впливають на охолодження. За напрямком від каліброваних випускних отворів потік є турбулентним за рахунок геометрії отворів, що призводять до змішування вихідних потоків.

Таблиця 9 – Розподіл потоку теплоносія в довгому кулері 2,0 мм

Q _{in_0°} [%]	Q _{in_30°} [%]	Q _{out_30°} [%]	Q _{out_0°} [%]
52	48	49	51

Таблиця 9 показує відсоток потоку, який проходить всередині каліброваного входу і вихідні отвори.

Зі значень, наведених у таблиці, видно, що швидкість потоку рідини, яка проходить всередині горизонтального отвору та всередині отвору з кутом нахилу 30°, є майже однаковими як на вході, так і на виході.

Довгий розподіл тиску кулера 2,5 мм

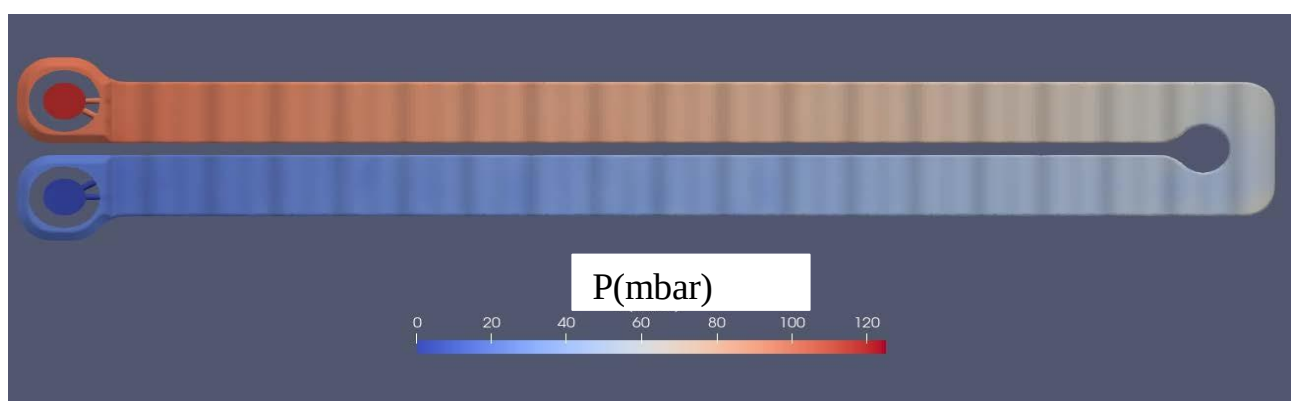


Рисунок 2.16 – Довгий контур тиску охолоджувача 2,5 мм

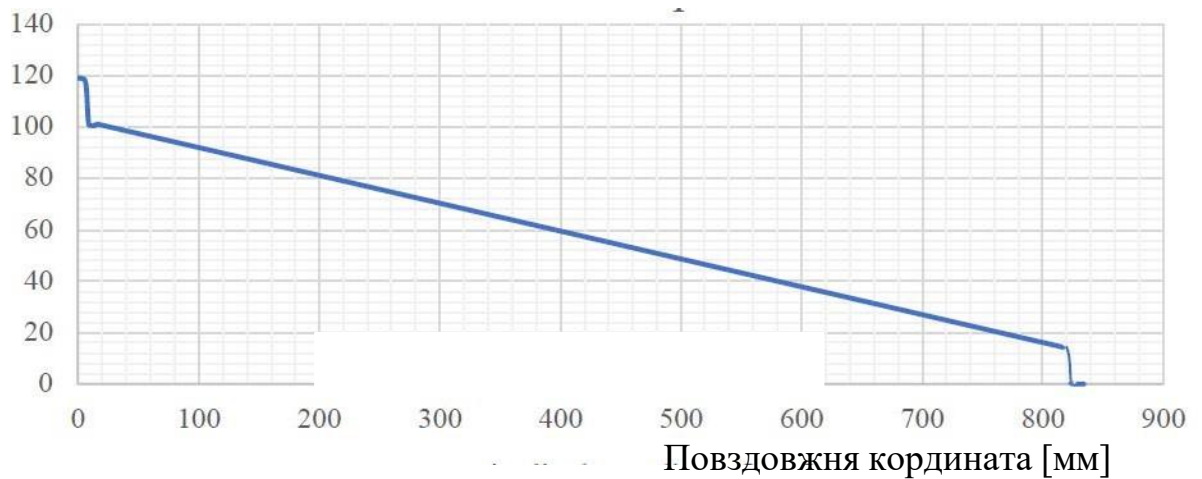


Рисунок 2.17 – Довга тенденція тиску в охолоджувачі 2,5 мм

На рисунку 2.16 показано розподіл тиску на довгому охолоджувачі з відкаліброваним отвором діаметром 2,5 мм. Аналіз рисунка показує, що калібр отвору не є основною причиною падіння тиску. Цікаво відзначити, що на виході з двох каліброваних вхідних отворів є дві точки високого тиску, потік стикається з бічними стінками кулера.

Аналіз рисунку 2.17 показує, як падіння тиску має лінійну тенденцію вздовж охолоджувача і має два стрибки у відповідності з каліброваними отворами, рівними 16 і 11 мбар. Загальний перепад тиску становить 119 мбар. У такій конфігурації перепад тиску вздовж вхідних отворів становить приблизно 13% від загального падіння, вздовж вихідних отворів – приблизно 13%.. Решта падіння тиску відбувається вздовж охолоджувача. У вже описаних конфігураціях перепад тиску вздовж охолоджувача є основним домінуючий фактором за рахунок збільшення діаметрів каліброваних отворів.

Довгий контур швидкості охолодження 2,5 мм

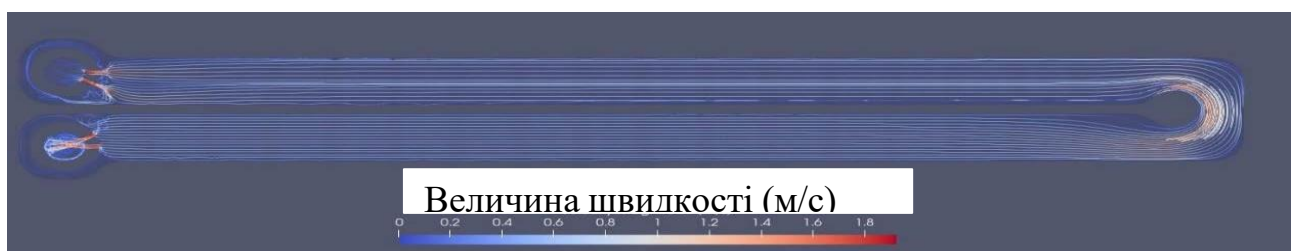


Рисунок 2.18 – Довгий контур охолоджувача довжиною 2,5 мм (обтічні лінії)

На рисунку 2.18 показаний контур швидкості потоку всередині охолоджувача через обтічні лінії. Також в цьому випадку потік всередині кулера є ламінарним. Ця поведінка забезпечує однорідний теплообмін між осередками та теплоносієм. На відміну від попередньої конфігурації, завдяки більшому діаметру каліброваних отворів, зменшується зона турбулентності за вхідними каліброваними отворами. Як і в попередньої конфігурації, потік нижче за калібровані вихідні отвори турбулентний внаслідок змішування двох потоків.

Таблиця 10: Розподіл потоку теплоносія в довгому кулері 2,5 мм

Q _{in} _0° [%]	Q _{in} _30° [%]	Q _{out} _30° [%]	Q _{out} _0° [%]
49	51	50	50

Таблиця 10 показує відсоток охолоджуючої рідини, що протікає всередині каліброваного вхідного отвору та вихідні отвори.

У такій комплектації практично ідеальний баланс потоку затікання теплоносія всередину каліброваних отворів який досягається за рахунок збільшення діаметра лист.

2.1.7. Результати моделювання перехідних процесів

У цьому підрозділі наведено результати проведеного моделювання гідродинаміки перехідних процесів на довгому кулері з каліброваними отворами діаметром 2,0 мм. Вибір для здійснення моделювання перехідних процесів лише на кулері довжиною 2,0 мм базується на необхідності перевірки поведінки теплоносія на етапі заповнення в найбільш критичній конфігурації (найдовший тип кулера з найменшими каліброваними отворами). Крок моделювання за часом вибрано рівним 0,08 с. Це значення еквівалентно 1/20 часу, необхідного для того, щоб частинка рідини пройшла весь охолоджувач.

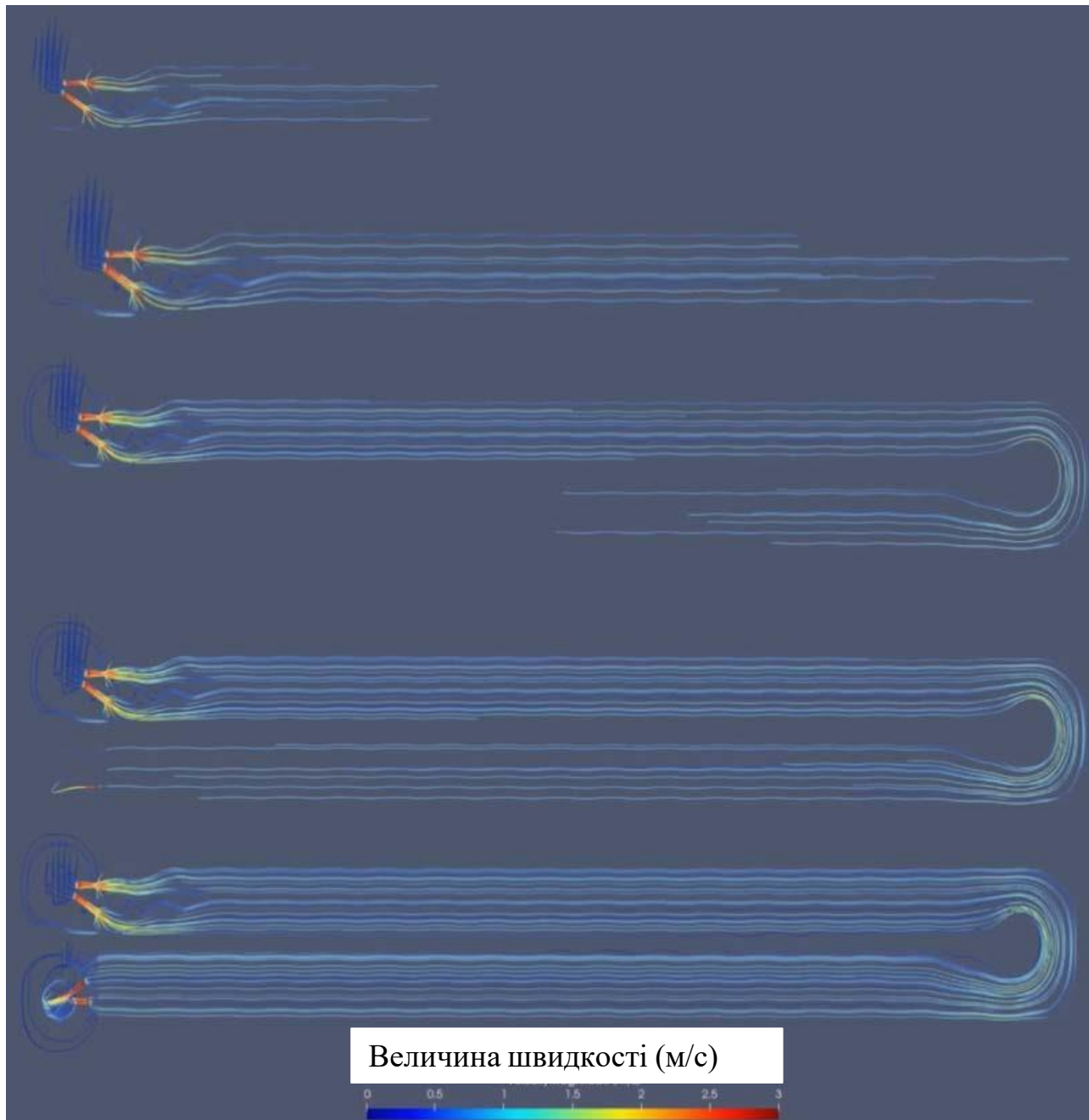


Рисунок 2.19 – Етапи заповнення охолоджувача. Перехідне CFD моделювання

На рисунку 2.19 – показано через лінії току поведінку рідини під час заповнення кулера. Представлена величина є швидкістю рідини в м/с. Поведінка потоку всередині охолоджувача ламінарна, а наповнення однорідне. У маленькій області, безпосередньо за течією від каліброваних вхідних отворів, є невеликі завихрення внаслідок відриву потоку в результаті розширення. Відразу після цього потік стабілізується і залишається шаруватим по всій довжині кулера. За напрямком через вихідні отвори потік турбулентний через перемішування.

2.1.8. Перевірка

Для перевірки CFD моделювання в стаціонарному стані значень падіння тиску використовувалися надані виробниками охолоджувачів.

Таблиця 11 – Порівняння змодельованих і експериментальних значень падіння тиску для різних типів охолоджувачів

Кулер	Перепад тиску експериментальний [мбар]	Перепад тиску CFD [мбар]
Короткий 1.8	238	141
Короткий 1.9	215	125
Довгий 2.0	290	178
Довгий 2,5	186	119

З аналізу таблиці 11 видно, що падіння тиску вздовж охолоджувачів отриманих в результаті експериментальних випробувань, більше, ніж отримане за допомогою моделювання динаміки рідини.

Для перевірки правильності введених результатів в таблицю 11 оцінюють реальний перепад тиску всередині кожного охолоджувача, спрощену батарею було створено для проведення експериментальних випробувань. Характеристика спрощеної акумуляторної батареї та проведення експериментальних випробувань описані в параграфі 2.2.

Розділ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІНІМОДУЛІВ

3.1. Постановка проблеми

У цьому розділі аналізується структура спрощеної батареї еквівалентна справжній як з електричної, так і з гідравлічної точки зору. Вибір створення спрощеної моделі заснований на необхідності перевірки результатів отриманих з моделей через:

- Експериментальні гідравлічні випробування
- Експериментальні термічні випробування

Цілі:

1. Перевірка перепаду тиску в охолоджувачах.
2. Оцінка розподілу потоку теплоносія в кожному спрощеному акумуляторному блоку, кулер із вхідним потоком 7,5 л/хв.
3. Максимальна температура елемента, досягнута після 10-секундного циклу заряджання та 10 секунд розряду при $1\text{C} < 35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Спрощена акумуляторна батарея складається з двох гідравлічних паралельно з'єднаних мінімодулів. Перший мінімодуль складається з 5 коротких холодильників, які охолоджують 4 ряди комірок, що складається з 6 елементів кожен; другий мінімодуль складається з 5 довгих паралелей охолоджувачі, які також охолоджують 4 ряди комірок, кожен з яких складається з 18 елементів.

Оскільки зовнішні охолоджувачі охолоджують лише половину ряду комірок, на відміну від внутрішніх які охолоджують 1 ряд комірок кожна, намагаючись забезпечити калібровані отвори дисбаланс швидкості потоку, який забезпечує рівномірне охолодження всіх комірок всередині модулів. З цієї причини зовнішні кулери мають невеликий діаметр каліброваних отворів який дорівнює 1,8 мм, а ті, що відносяться до внутрішні кулери 1,9 мм.

Таким же чином відкалібровані отвори зовнішніх охолоджувачів довгого

мінімодуля які мають діаметр 2 мм, на 0,5 мм нижче отворів центральних охолоджувачів.

На рисунку 3.1 зображено спрощену CAD-модель блоку батарей.

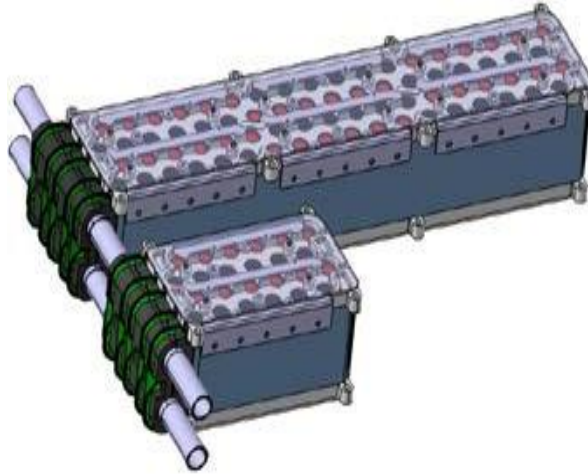


Рисунок 3.1 – Спрощена CAD-модель блоку батарей

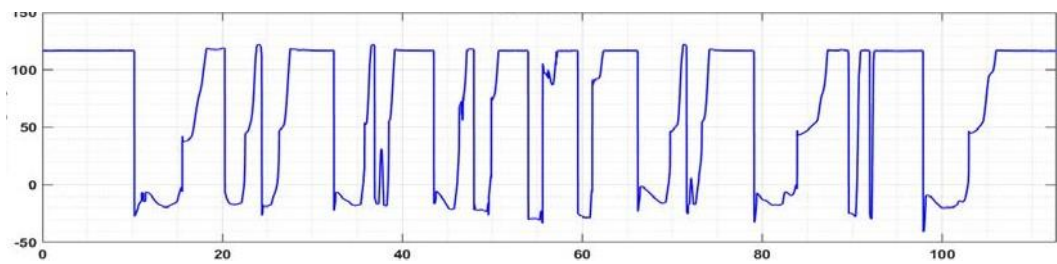
Електрична еквівалентність між двома акумуляторами гарантується за допомогою однотипних клітин, які зібрані за тією ж технологією.

Кількість паралелей становить те ж саме для двох блоків батарей, щоб можна було розряджати однаковий струм. Гідравлічна еквівалентність гарантується за допомогою тих самих охолоджувачів, зібраних у однакову конфігурація (все паралельно).

Цикл, який використовується для тестування спрощеної батареї, належить до профілю місії яка визначається замовником, масштабована для конфігурації 16s 6p.

Показано профіль місії, визначений для моделювання та перевірки проекту на рисунку 3.2. Відтепер профіль буде визначено як MP110kW.

Вхідна потужність



Час (с)

Рисунок 3.2 – Профіль місії, який використовується для моделювання та перевірки

Профіль місії MP110kW використовується відповідно до необхідної карти використання (таблиця 12). для характеристики батареї щодо:

- Миттєвої ефективності раннього життя (BOL)
- Миттєвої продуктивності після закінчення терміну служби (EOL)
- Повного циклу для імітації терміну служби

Таблиця 12 – Карта використання акумуляторної батареї

Продуктивність	Довідка місія профіль	BCs	Повторення (кола)	Вихід
Гонка (BOL)	MP110 кВт (1 коліна)	- Температура навколишнього середовища: 20°C - Запуск охолоджуючої рідини. Температура: 20°C - Витрата охолоджуючої рідини: 70 л/хв	7-8	- Доповнити 1 заряд - Температура не до перевищувати безпечні значення
Гонка (BOL)		- Температура навколишнього середовища: 40°C - Запуск охолоджуючої рідини. Температура: 40°C - Витрата охолоджуючої рідини: 70 л/хв		- Напруги/струми до бути в межах безпеки

Термін служби батареї	Гонка		> 60	- Загальна кількість кіл на EOL у кожній гонці подія не < 7
Гонка (EOL)	MP110 кВт (1 коліна)	(1 Те саме, що раса (BOL)	7-8	Те саме, що раса (BOL) Кількість кіл не < 7

У таблиці 13 схематично представлено параметри, що стосуються електричної і гідравлічної еквівалентності двох блоків батарей.

Таблиця 13: Порівняння між справжнім і спрощеним акумулятором

	Акумулятор	Спрощення АКБ
Комірки	MOLICEL INR-21700-P42B	MOLICEL INR-21700-P42B
Електрична комплектація	192s 6p	16s 6p
Зварювальні матеріали	Алюміній 99,99%	Алюміній 99,99%
Технології зварювання	Heavy Wire bonding	Heavy Wire bonding
Система охолодження	Гнучкі кулери	Гнучкі кулери
Профіль місії заряд/розряд	Заряд: профіль CCCV 25A макс Розряд: Таблиця 15	Заряд: профіль CCCV 25A макс Розряд (з регенерацією): 1 один цикл MP110kW розрахований на 16s6p

На рисунку 3.3 показує типовий профіль заряду CCCV.

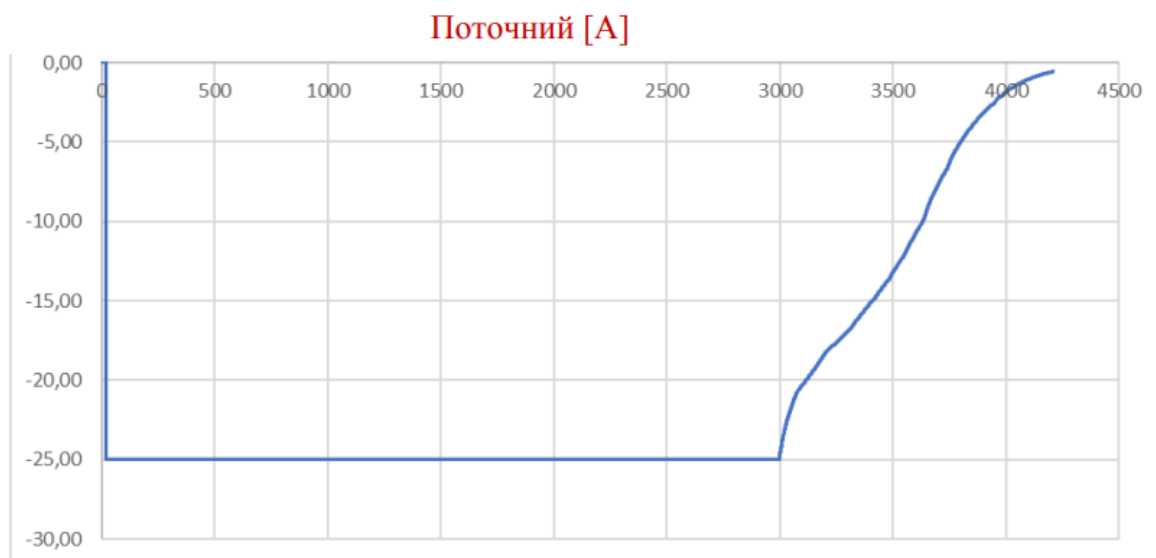


Рисунок 3.3 – Профіль заряду CCCV

У таблиці 14 наведено фізичні та електричні характеристики комірок, які утворюють акумуляторний блок.

Таблиця 14: Характеристики клітини

Форма	циліндрична	
Матеріал банки	Сталь	
Діаметр	21,55 мм	
Висота	70,15 мм	
Вага	70 г	
Ємність	Типовий	4200 мАг
		15,1 Вт·год
	не менше	4000 мАг
		14,4 Вт·год
Напруга комірки	Номінал	3,6 В
	Зарядка	4,2 В
	Розряд	2,5 В
Струм заряду	Стандарт	4,2 А
	Максимум	12,6 А

		(гранична температура 70 °C)
Стандартний час	зарядки	1,5 год
Постійний струм	розряду	45 А
		(80 °C відсікання)
Температура	зарядки	від 0 °C до 60 °C
	Розрядження	від -40 °C до 60 °C
Типовий імпеданс	енергії	601 Вт·год/л
	Гравіметрична	226 Вт·год/кг
Об'ємна щільність	змінний струм (30% SOC)	7 мОм
	Постійний струм (50% SOC)	16 мОм

3.2. Перевірка падіння тиску вздовж охолоджувачів.

Для визначення реального значення перепаду тиску вздовж охолоджувачів ΔP і вздовж спрощеної акумуляторної батареї, експериментально досліджуємо за допомогою Podium, порівнюємо з ΔP , розрахований за допомогою гідравлічної моделі зосереджених параметрів.

Гідравлічна модель із зосередженими параметрами

Гідравлічна модель із зосередженими параметрами являє собою спрощену акумуляторну батарею за рахунок використання гідравлічних опорів (рис. 3.4). У гідравлічній моделі кожен охолоджувач акумуляторної батареї замінюється враховуючи власний гідравлічний опір. Як у справжній конфігурації, усі опори з'єднані паралельно, забезпечуючи гідравлічну еквівалентність моделі та спрощеної батареї.

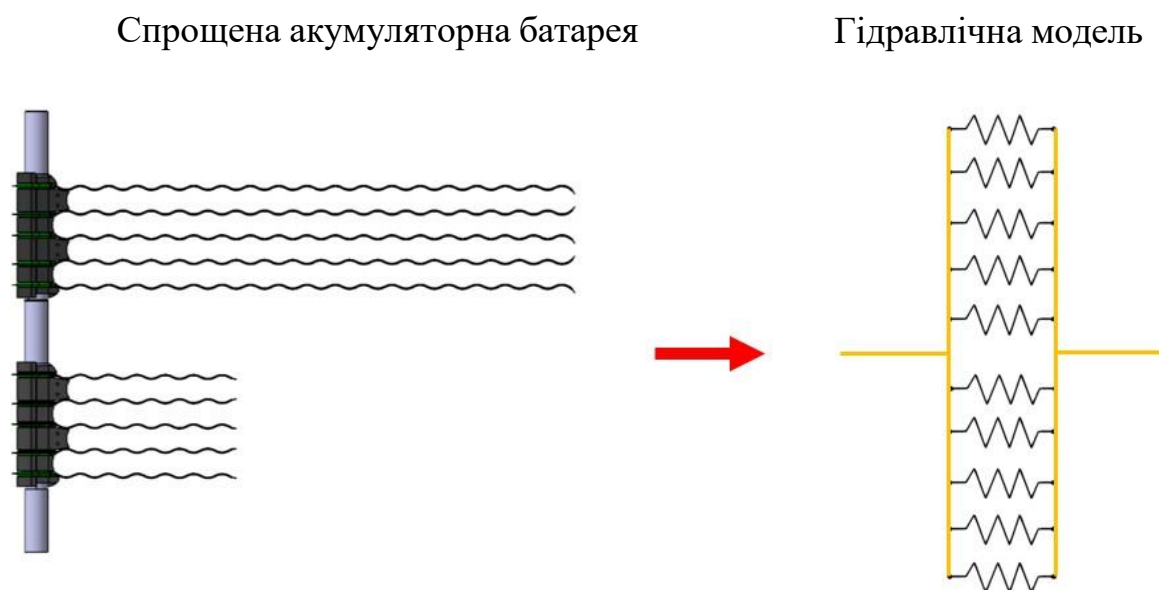


Рисунок 3.4 – Еквівалентність між спрощеною акумуляторною батареєю та гідравлічною моделлю

Значення гідравлічних опорів охолоджувачів оцінюють за допомогою рівняння 3.6.

$$\Delta P = R \cdot Q^2 \quad (3.6)$$

Таблиця 15: Порівняння між гідравлічним опором охолоджувачів

Кулер	Гідравлічний опір експериментальний [мбар]	Гідравлічний опір CFD [мбар]
Короткий 1.8	1.5328E+14	9.05616E+13
Короткий 1.9	1.3809E+14	8.02851E+13
Довгий 2.0	1.86261E+14	1.14326E+14
Довгий 2.5	1.19464E+14	7.64314E+13

Таблиця 15 представляє значення гідравлічного опору кожного охолоджувача, оцінені як функція перепадів тиску, наведених у таблиці 11.

Для визначення загального перепаду тиску необхідно розрахувати еквівалентний гідравлічний опір зосередженої моделі. Процедура подібна до тієї, яка використовується для розрахунку еквівалента опорів в електричних мережах, однак, оскільки зв'язок між перепадами тиску і витратою рідини приблизно квадратичний, розрахунок еквівалентної опори в паралельній конфігурації відрізняються від електричного випадку як показано рівнянням 3.3.

Рівняння 3.2 і 3.3 показують, як розрахувати еквівалентні гідравлічні опори в послідовній і паралельній конфігурації.

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots R_n \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{\sqrt{R_{eq}}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}} + \dots \frac{1}{\sqrt{R_n}} \quad (3.8)$$

Таблиця 24 показує перепади тиску, розрахований за допомогою моделі зосереджених параметрів враховуючи як вхідні значення ΔP охолоджувачів, розраховані за допомогою CFD (ΔP Гідравлічна модель 2) і поставляється виробниками (ΔP гідравлічна модель 1).

Таблиця 16 Порівняння між експериментальними та змодельованими перепадами тиску для різних проаналізованих конфігурацій

	Мінімодуль короткий	Мінімодуль довгий	Спрощена акумуляторна упаковка
ΔP Гідравлічна модель 1	224	219,6	221,8
ΔP Гідравлічна модель 2	131	138	134

Валідаційні тести

Перевірка значень падіння тиску, отриманих з моделі зосереджених параметрів було виконано шляхом вимірювання ΔP уздовж спрощеної батареї за допомогою Подіумног випробувального стенду. Результати експериментальної

перевірки розрахунку ΔP уздовж короткий і довгий показані в таблиці 17. Значення червоного кольору вказують на падіння тиску, отримане при замірі швидкості потоку, що використовується в CFD моделюванні та в експериментальному випробуванні постачальників.

Таблиця 17 – Падіння тиску, експериментально розраховане вздовж довгого та короткого міні-модуля, як функція витрати потоку рідини

Масова витрата	Мінімодуль короткий	Мінімодуль довгий
[л/хв]	ΔP [мбар]	ΔP [мбар]
0	0	0
1,07	20	30
2,14	75	95
3,21	155	180
3,74	195	224
4,28	250	280
5,35	360	390
6,42	495	515
7,5	650	650

На рисунку 3.5 показано падіння тиску по короткому мінімодулю (синя крива) і довгому мінімодулю (помаранчева крива) як функція вхідної витрати.

З аналізу на графіку можна спостерігати, що два експериментальних падіння тиску є аналогічно з дещо більшим перепадом тиску вздовж довгого мінімодуля.

Перепад тиску мінімодуль

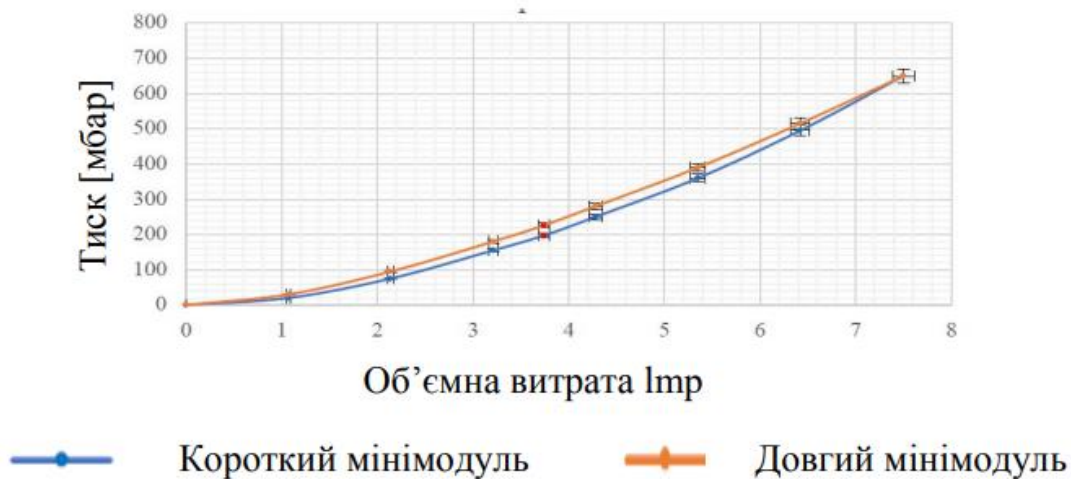


Рисунок 3.5 – Падіння тиску вздовж довгого та короткого мінімодулів як функція витрати теплоносія. Відносний відсоток, похибка вимірювання тиску $\pm 3\%$. Відносна похибка вимірювання витрати становить $\pm 1,5\%$

На рисунку 3.6 – показано падіння тиску в мбар уздовж спрощеного акумуляторного блоку як функція швидкості потоку охолоджувача. На графіку видно, що перепад тиску при 7,5 витрата л/хв дорівнює 216 мбар.

Перепад тиску спрощеної АКБ

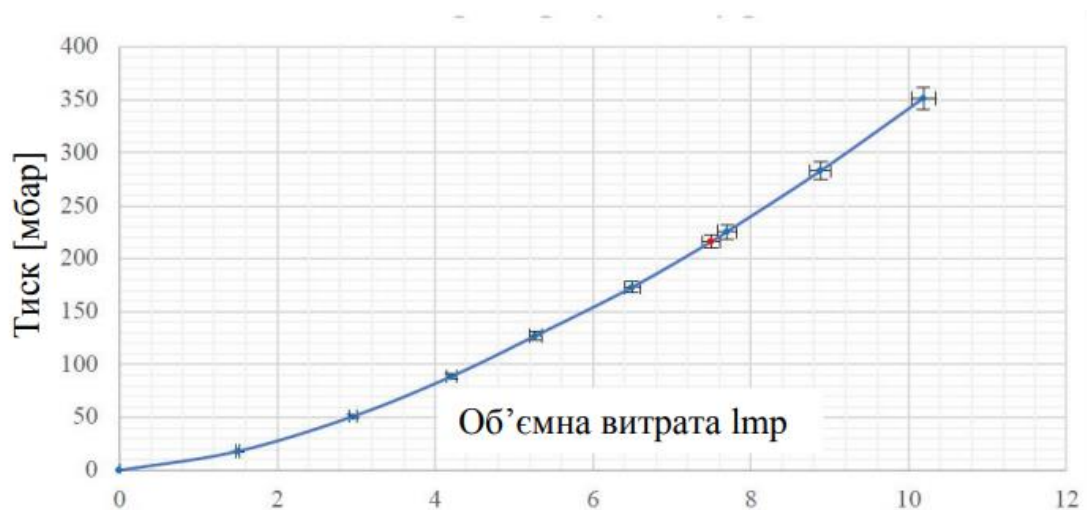


Рисунок 3.6 – Падіння тиску вздовж спрощеного акумуляторного блоку як функція швидкості потоку теплоносія. Відносна похибка вимірювання тиску $\pm 3\%$. Відносна похибка вимірювання витрати становить $\pm 1,5\%$

У таблиці 18 представлені значення падіння тиску для різних конфігурацій .

ΔP Experimental відноситься до значень ΔP , отриманих експериментальним шляхом стендовий тест Podium. ΔP , розрахований за допомогою гідравлічної моделі 1, використовує ΔP значення, надані виробником охолоджувачів як вхідні дані моделі. Нарешті, ΔP розрахований за допомогою гідравлічної моделі 2, використовує значення, отримані від динамічного моделювання рідини як вхідні дані моделі зосереджених параметрів.

Таблиця 18 Порівняння між експериментальними та змодельованими значеннями падіння тиску

	Мінімодуль короткий	Мінімодуль довгий	Спрощена акумуляторна упаковка
ΔP Експериментальний	195	224	216
ΔP Гідравлічна модель 1	224	219,6	221,8
ΔP Гідравлічна модель 2	131	138	134
Відносна похибка1	14,9	2	2.7
Відносна похибка 2	32,8	38,4	38

Аналіз таблиці 18 показує, що зосереджений параметр гідравлічної моделі, який використовує значення ΔP для кожного охолоджувача, надані виробником як вхідні дані. Результати відповідають експериментальним випробуванням щодо тиску вздовж довгого міні-модуля та спрощеного акумулятора. Відносна похибка між експериментальними результатами та зосередженою моделлю становить 2% і 2,7%. Що стосується перепаду тиску на короткому міні-модулі, обидва ΔP , отримані з CFD моделювання та експериментальні дані, надані виробниками, не відповідають результатам експерименту. Зокрема, модель зосереджених параметрів переоцінює падіння тиску на короткому міні-модулі на 14,9%, якщо ΔP s використовує дані надані виробниками. І навпаки, він занижує ΔP на 32,8% при використанні значень, отриманих через CFD.

Оскільки використовуються значення ΔP , надані виробниками кулерів, помилка падіння тиску спрощеного акумуляторного блоку становить 2,7%; а так

як в кінцевому акумуляторі кількість довгих кулерів перевищує кількість коротких кулерів у 3 рази, використовуємо значення падіння тиску, наведені в таблиці 19, як вхідні дані для подовження проектної діяльності.

Таблиця 19 Значення падіння тиску, що використовуються для наступних етапів проектування

Перепад	Тиск охолоджувача [мбар]
Короткий 1.8	238
Короткий 1.9	215
Довгий 2.0	290
Довгий 2,5	186

3.2.1. Розподіл потоку

У цьому підпараграфі аналізується моделювання гідродинаміки, проведене для оцінки розподіл теплоносія всередині кулерів спрощеного акумуляторного блоку. Через брак ресурсів з точки зору обчислювальної потужності, було виконано моделювання пакета шляхом заміни кулерів на інтерфейси, до яких повідомляються значення ΔP Таблиця 27.

Коротке мінімодульне дослідження незалежності від сітки

З міркувань часу дослідження незалежності електромережі проводилося лише на короткий час. Весь спрощений акумулятор був змодельований у «грубій сітці» конфігурацію та результати були виправлені з урахуванням загальної виявленої помилки через ГІС.

Незалежне від сітки дослідження, що стосується короткого мінімодуля, показано в таблиці 20, було виконано за кроками, зазначеними Роучером і описаними в підпункті 2.1.5. Параметри під контролем - це значення $\Delta P/\rho$, яке є вирішальним для оцінка перепаду тиску, а значень швидкості на вході в

охолоджувачі пронумеровані від 1 до 5. Ці значення є середніми для поверхні і використовуються для визначення розподілу швидкості потоку в охолоджувачах. Загальна вхідна витрата в міні-модуль становить 3,74 л/хв.

Таблиця 20: Коротке дослідження незалежності від сітки міні модуля

Базовий розмір [мм]	№ призми шар	$\Delta P/\rho$ [Па/кг/м ³]	V1 [PC]	V2 [PC]	V3 [PC]	V4 [PC]	V5 [PC]
1	5	20,60217	0,189584	0,201491	0,201601	0,201531	0,189578
1,5	5	20,73725	0,190252	0,202203	0,202126	0,202137	0,190274
3	5	21,05184	0,191401	0,203146	0,203406	0,203267	0,191521
Відносна похибка 1		0,6556591	0,35235	0,353366	0,260415	0,300698	0,367131
Відносна похибка 2		1,5170285	0,603936	0,466363	0,633268	0,559027	0,655371
Екстрапольована похибка		0,4958251	0,491741	1,101155	0,181412	0,348968	0,465905
Екстраполяція Річардсона		20,500523	0,188656	0,199296	0,201236	0,20083	0,188699
GCI12		0,6167235	0,611669	1,361452	0,226354	0,434692	0,579681
GCI23		1,4269415	1,048413	1,79681	0,55044	0,808135	1,034796
p		2,7679086	1,775722	0,919976	2,917907	2,04005	1,909262
Збіжність розв'язку		0,9934861	0,996489	0,996479	0,997403	0,997002	0,996342
Максимальна похибка		2,618853	1,434005	1,894973	1,066864	1,198833	1,47355
Падіння тиску [мбар]		207,6703	-	-	-	-	-

Оскільки неможливо безпосередньо перевірити значення швидкості потоку в кожному охолоджувачі значення ΔP вздовж короткого мінімодуля дорівнює 207,7 мбар, перевірка симуляції гідродинаміки. Це значення порівнюється з результатом експериментального тесту, показаного у таблиці 18. Відносна похибка між двома тисками дорівнює 6,1%.

Спрощення результату симуляції акумуляторної батареї

На рисунку 3.7 показана витрата теплоносія, який проходить всередині кожного охолоджувача спрощеного акумулятор, отриманий за допомогою симуляції динаміки рідини. Труби від 1 до 5 відносяться до короткого мінімодуля, а від 6 до 10 — до довгого мінімодуль.

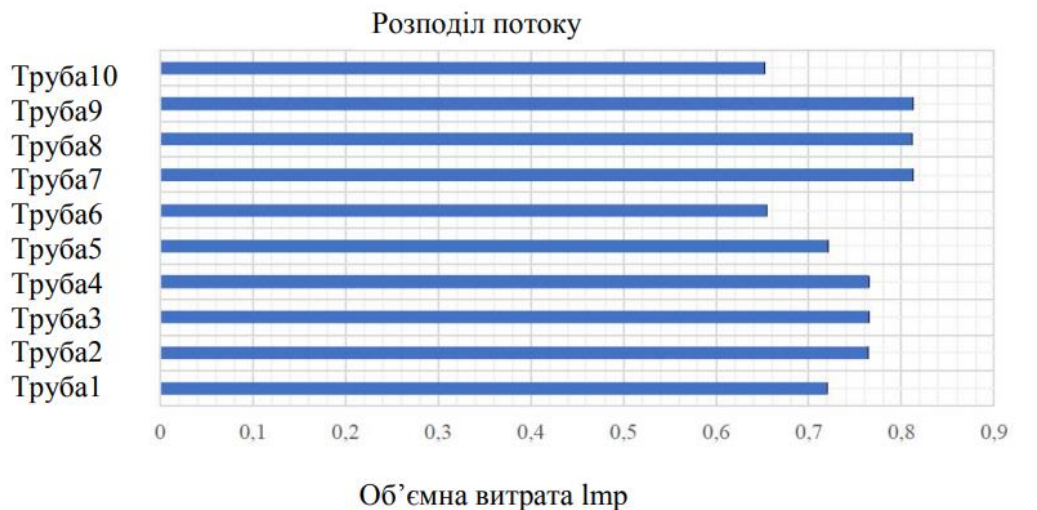


Рисунок 3.7 – Швидкість потоку теплоносія в кожному спрощеному охолоджувачі акумуляторної батареї

Цікаво відзначити, як швидкість потоку теплоносія, що протікає всередині центрального і бічних охолоджувачів збалансовані між двома міні-модулями. Це гарантує рівномірне охолодження всіх елементів спрощеної батареї.

Слід зазначити, що в короткому мінімодулі співвідношення між витратою в центральних охолоджувачах більше, ніж в довгого мінімодуля. Це залежить від діаметрів каліброваних отворів. У короткому міні-модулі співвідношення між діаметрами каліброваних отворів становить 1,06, а в довгому міні модуль це 1,25.

Висновки

У цьому розділі аналізується причина падіння тиску в охолоджувачах за допомогою симуляції гідродинаміки користуючись обчислювальним експериментом.

Таблиця 21 показує значення падіння тиску, експериментальні та змодельовані за допомогою CFD, вздовж усієї спрощеної батареї. Четвертий

стовпець таблиці 21 представляє різницю між двома кривими, тобто співвідношення між значеннями падіння тиску отриманими експериментально та розрахованим CFD.

Таблиця 21 – Порівняння між значеннями перепадами тиску вздовж спрощеної батареї, отримані експериментально та шляхом CFD моделювання

масова витрата [л/хв]	ΔP експериментальний [мбар]	ΔP CFD [мбар]	Приріст
0	0	0	---
1,5	18	8	2,25
2,298124	36	16,4106	2,183215
2,9615	51	27,0471	2,077436
4,205331	88,7	54,702	1,621049
5,271471	127,1	85,092	1,493258
6,497532	173	128,651	1,344905
7,699901	225,5	180,6179	1,248453
8,884501	283	240,1823	1,206905
10,18756	351,6	315,5495	1,114125

Рисунок 3.8 показує експериментальні та змодельовані падіння тиску вздовж спрощеної акумуляторної батареї як функції витрати теплоносія. Експериментальне значення в падінні тиску вище, ніж змодельоване CFD моделюванням. Ця різниця, однак не є постійною, а зменшується, коли швидкість потоку теплоносія збільшується, минаючи значення від 2,25 до 1,11.

Така поведінка залежить від природи охолоджувачів. Будучи гнучким і деформованим об'єктом, канали, в яких тече теплоносій, не мають фіксованих розмірів. Вони розширюються зі збільшенням швидкості потоку, що призводить до зменшення гідравлічного опору як результат виникає падіння тиску.

Розширення кулерів зі збільшенням потоку робить реальну геометрію

більше подібну до ідеальної, що використовується в CFD. Будь-які негативні наслідки, викликані в охолоджувачі через деформацію після складання зменшуються зі збільшенням тиску. Щоб зменшити цей небажаний ефект навіть при меншій швидкості потоку, охолоджувачі використовувалися для охолодження перед складанням батареї.

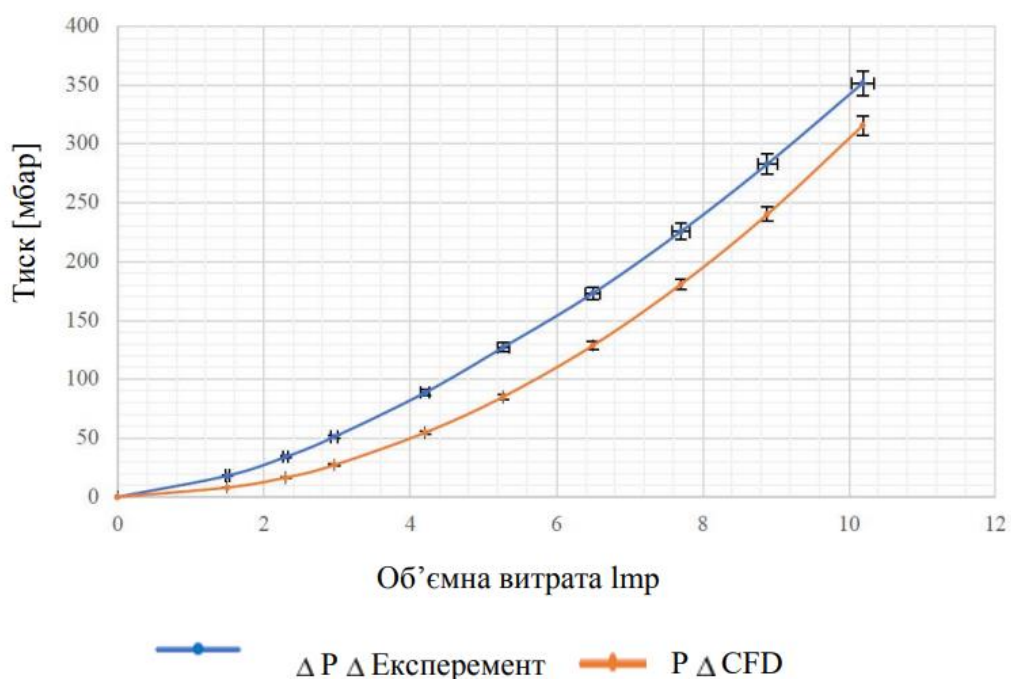


Рисунок 3.8 – Падіння тиску вздовж спрощеної акумуляторної батареї як функція об'ємної витрати теплоносія.

Синя крива позначає значення, отримані експериментально. Червона крива представляє значення, отримані CFD моделюванням. Відносний відсоток похибки вимірювання тиску $\pm 3\%$. Відносна похибка вимірювання витрати становить $\pm 1,5\%$.

Відносна невизначеність CFD симуляції падіння тиску становить $\pm 2,5\%$

3.2.2. Спрощений термічний аналіз акумуляторної батареї

Дослідження спрощеного охолодження акумуляторної батареї проводилося через 3D терморідинамічне моделювання динаміки та створення 1D моделі з

зосередженими параметрами щоб забезпечити досягнення мети проекту, а саме не допущення перевищення максимуму температури елемента більше 35 °C протягом циклу заряду-розряду при постійній вихідній потужності. Отримані результати були підтверджені стендовими випробуваннями.

3.2.2.1. Обчислювальне моделювання тепловій гідродинаміки

Метою моделювання є оцінка температури клітин під час циклу заряду-розряду, що характеризується генерацією постійної електричної енергії. Область дослідження використовується для моделювання короткого охолоджувача, що має 1,8 мм калібровані отвори з додаванням 6 напівциліндрів, які представляють об'єм комірок, на які впливає охолодження.

Теплофізичні властивості

Охолоджувач той самий, що використовується в моделюванні гідродинаміки; його властивості зазначено в таблиці 3.

Таблиця 22 показує фізичні властивості охолоджувачів.

Таблиця 22 – Фізичні властивості комірок і охолоджувачів

Властивості	Значення
Щільність комірок [кг/м ³]	2698,9
Питома теплоємність комірок [Дж/кг/К]	900
Теплопровідність комірок [Вт/м/К]	{2,5 2,5 22}
Щільність охолоджувача [кг/м ³]	900
Питома теплоємність охолоджувача [Дж/кг/К]	1800
Кулер термічний провідність [Вт/м/К]	0,22

Обчислювальна область

Моделювання термофлюїдної динаміки була виконана шляхом додавання до короткого охолоджувача з каліброваними отворами 1,8 мм 6 напівциліндрів,

що представляють об'єм комірок і охолоджується кулером.

Проаналізована конфігурація першого кулера короткого мінімодуля, охолоджує лише половину комірок, яка складає перший ряд.

Граничні умови

Область дослідження має ті самі межі, що визначені в підпункті 2.2.3 з додавання шести твердих доменів, що представляють клітини.

Програмне забезпечення автоматично створює 6 кордонів у зонах розділу між комірками та охолоджувачем. Не можливо, з точки зору обчислювальних ресурсів, змодельовати товщину кулера; контактний опір встановлювався на межі розділу між осередками і охолоджувачем для імітації теплового опору через стінку охолоджувача.

Умови

Джерело тепла: кожна комірка вважається постійним джерелом тепла, що дорівнює 2,8 Вт. Оскільки симуляція враховує половину кожної комірки, встановлене значення становить 1,4 Вт як абсолютна потужність.

Фізика

Моделі та фізика, що використовуються для моделювання, ті самі, що вже обговорювалися в підпункт 2.2.3.

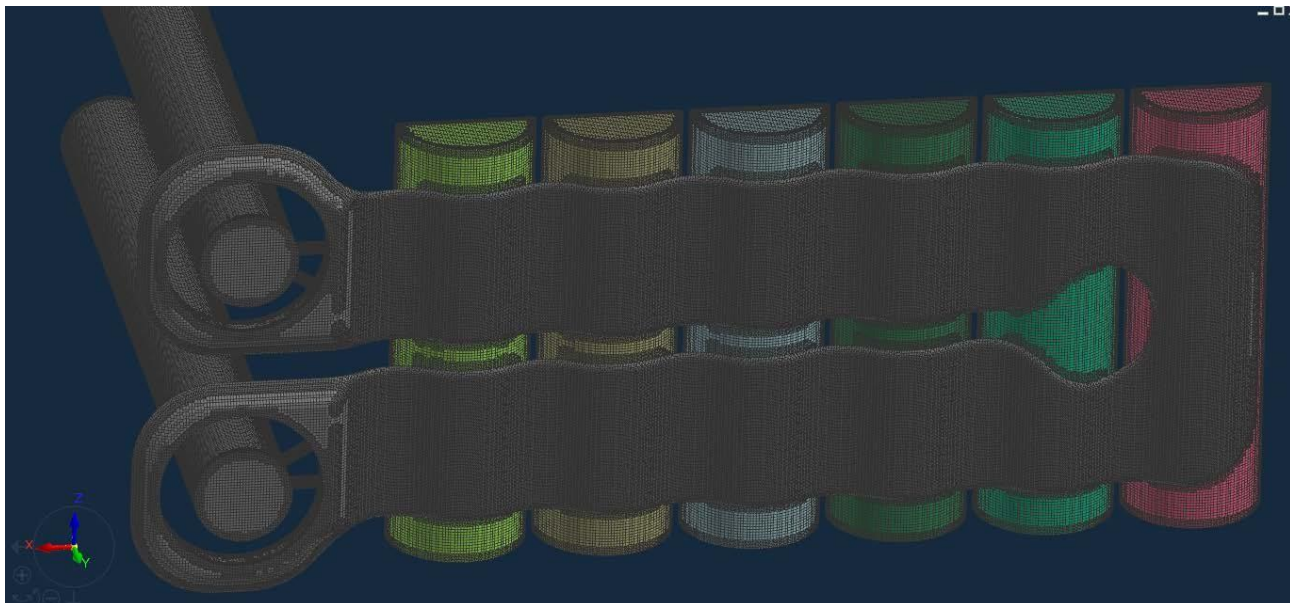


Рисунок 3.9 – Зображення сітки домену дослідження

Щоб оптимізувати сітку, наступні елементи керування вже реалізовано в додаток до інших описаних в розділі 2.2.3:

- Керування поверхнею: Елементи керування поверхнею реалізуються шляхом налаштування рівня уточнення відносно базового значення розміру моделювання. Кожен рівень має базове значення розміру, що дорівнює половині значення попереднього рівня. Таблиця 23 показує максимальний і мінімальний межі, що використовується для створення сітки.

Таблиця 23 – Рівні уточнення керування поверхнею

Межа	Мінімум	Максимум
Клітинка	Рівень 2	Рівень 1

Дослідження незалежності мереж

Через високу обчислювальну вартість було неможливо виконати сітку.

Результати моделювання

Обговорення в цьому розділі поділено на дві частини; на початку більш детально проаналізовано розподіл температури клітин (рис. 3.10). Згодом аналізується зміна температури теплоносія всередині охолоджувача (рисунок 3.11 та рисунок 3.8).

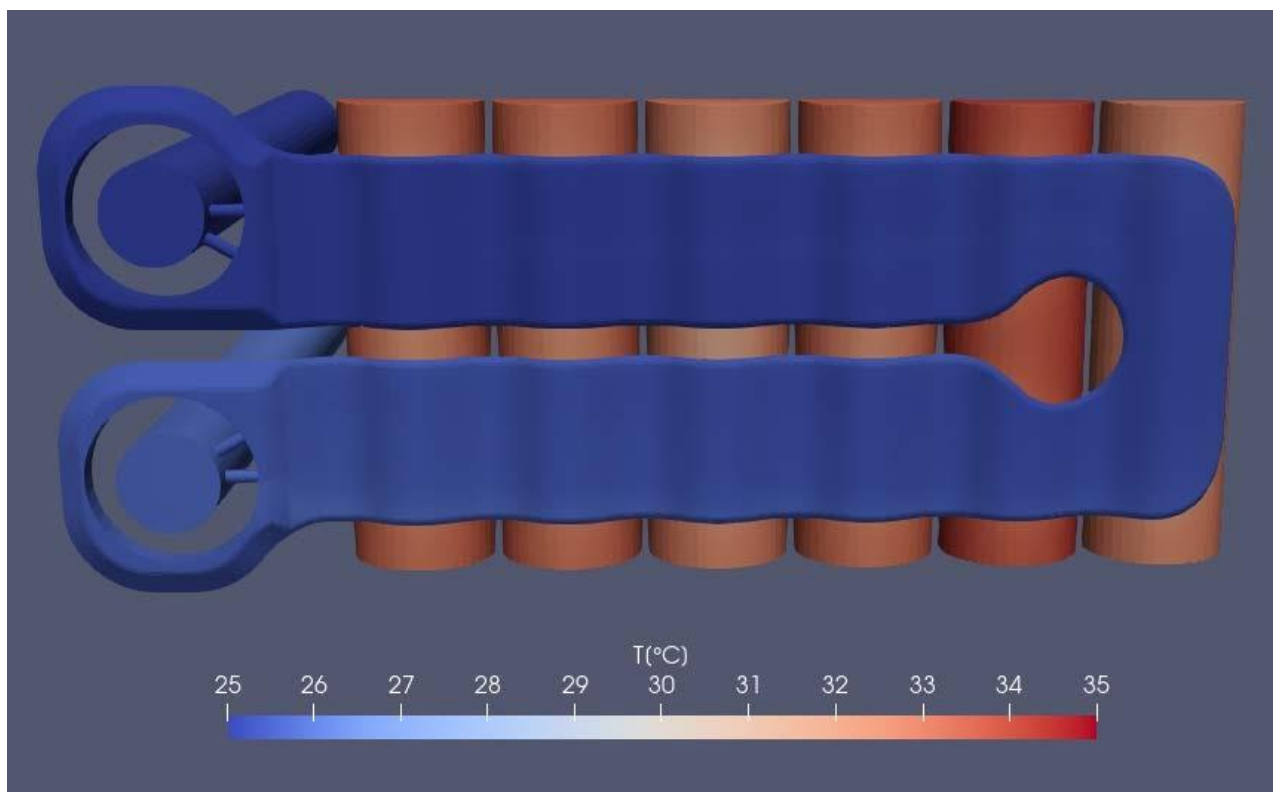


Рисунок 3.10 – Зображення температурного контуру досліджуваної області

На рисунку 3.10 показано результат моделювання термофлюїдно-динамічного моделювання. Представлена величина є температурою в градусах Цельсія.

На рисунку 3.1 показана температура клітини в градусах Цельсія, отримана з моделювання. Цікаво відзначити, що розподіл температури узгоджується з фізикою охолодження; перші три комірки, починаючи зліва, показують зменшення температури, оскільки відстань від каліброваних отворів збільшується. Така поведінка пояснюється тим фактом, що потік, який тільки що виходить з отворів, не заповнює канал однорідно, зменшуючи теплообмін.

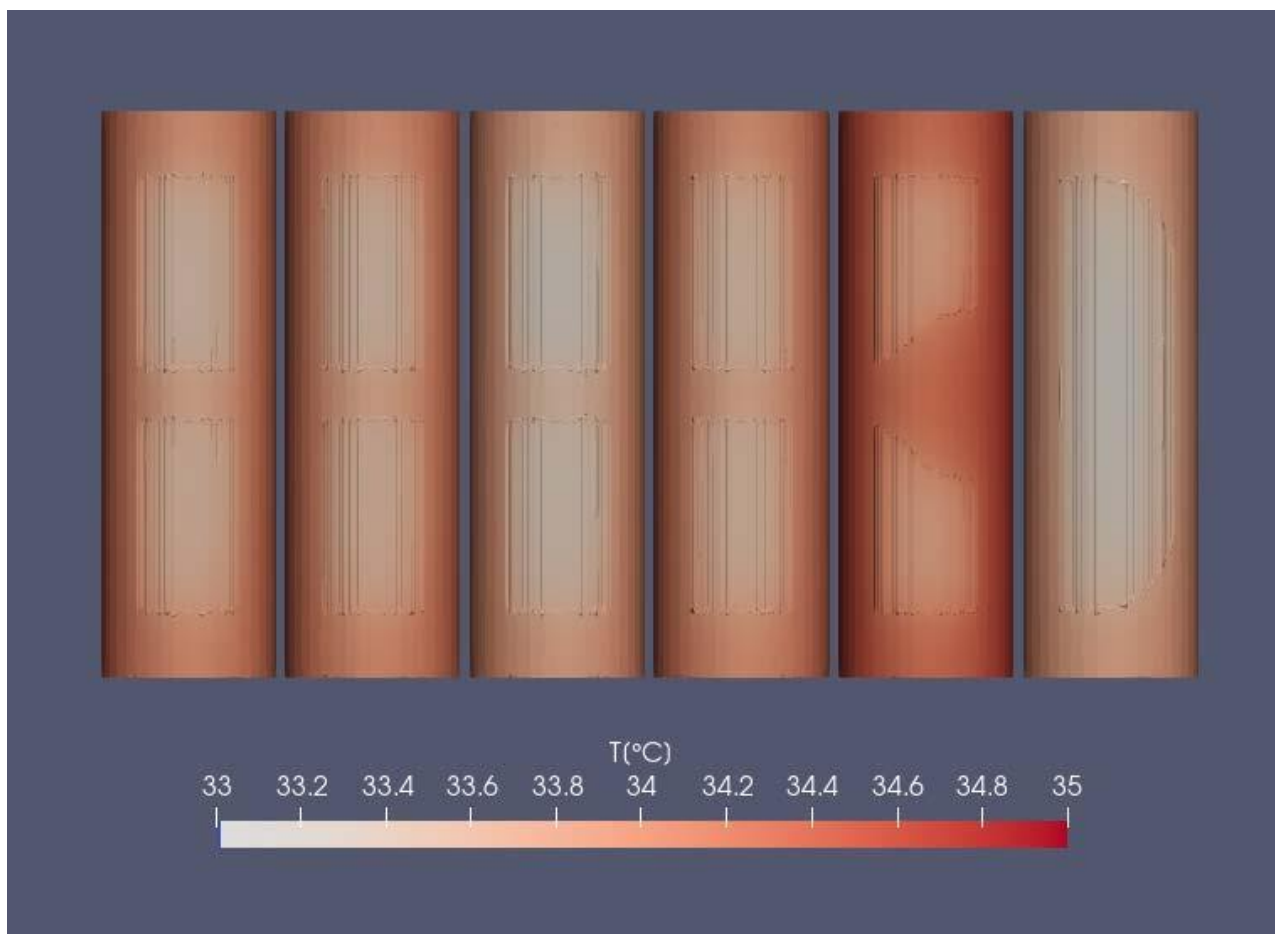


Рисунок 3.1 – Температурний контур комірок

Комірка № 5 є найгарячішою з максимальною температурою близько 35 °C. Це пояснюється меншою поверхнею теплообміну з охолоджувачем через геометрію останньої. Комірка 4 має трохи вищу середню температуру, ніж комірка 3; ця поведінка ймовірно, залежить від зміни форми напрямку руху комірки, що мінімально впливає на її охолодження. Комірка 6 є найхолоднішою та найбільшою поверхнею теплообміну з охолоджувачем. Аналізуючи розподіл температури між комірками очевидно, що охолоджувач забезпечує рівномірне охолодження. Максимальна різниця температур між комірками, отримана в результаті моделювання не перевищує 1,5 °C.

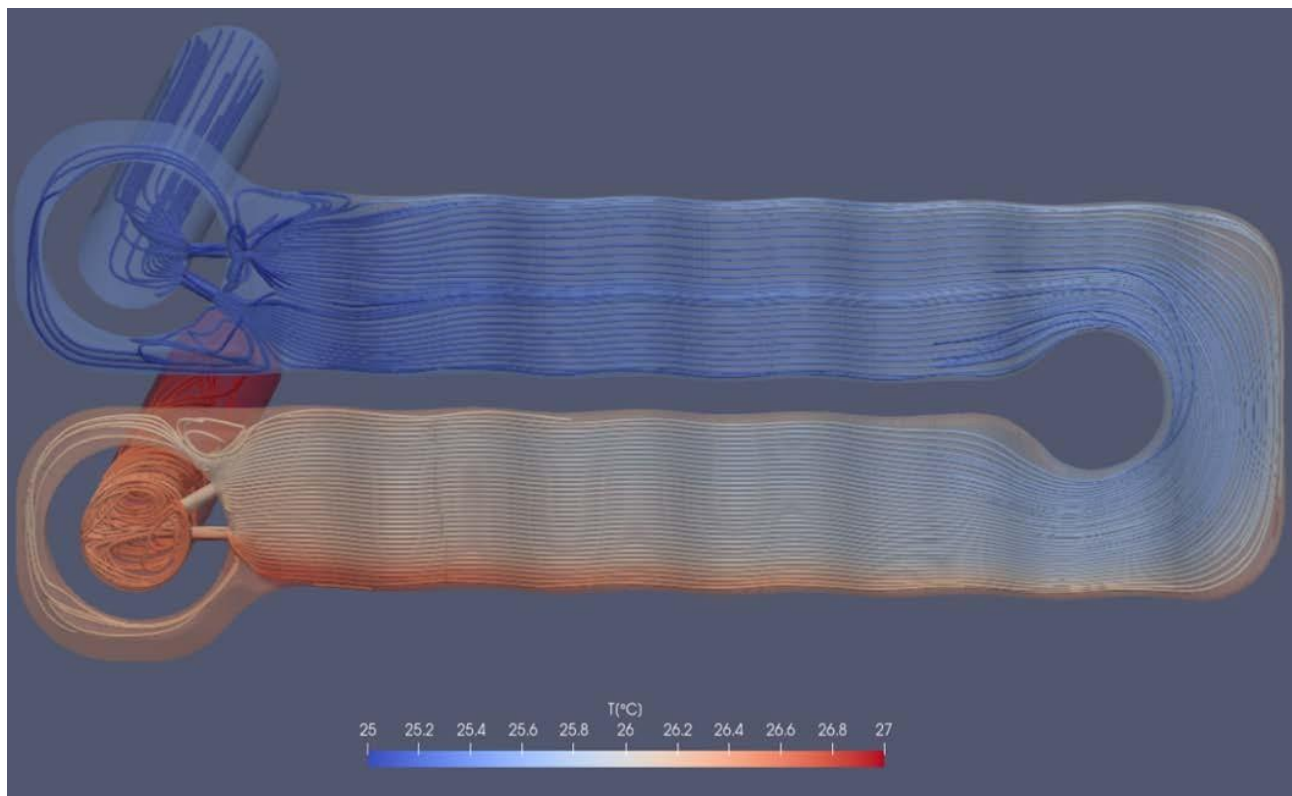


Рисунок 3.12 – Температурний контур потоку всередині охолоджувача, показаний лініями струму

На рисунку 3.12 показано температуру потоку, який протікає всередині охолоджувача через зображення ліній струму. Цей тип репрезентації цікавий тим, що дозволяє зафіксувати будь-яку нерівномірність або турбулентність потоку, яка може загрожувати охолодженню. Очевидно, що потік ламінарний і по всій області єдиний; Область, яку слід розглядати, це область нижче за вхідні отвори та вище за розташуванням вихідних отворів, де є невеликі завихрення. Це причина, чому комірка є другою найгарячішою в партії. На рисунку показано, що на зовнішній стороні у каналі температура в середньому вища. Це явище виникає тому, що в цій області геометрія охолоджувача перешкоджає проходженню рідини, яка викликає підвищення температури.

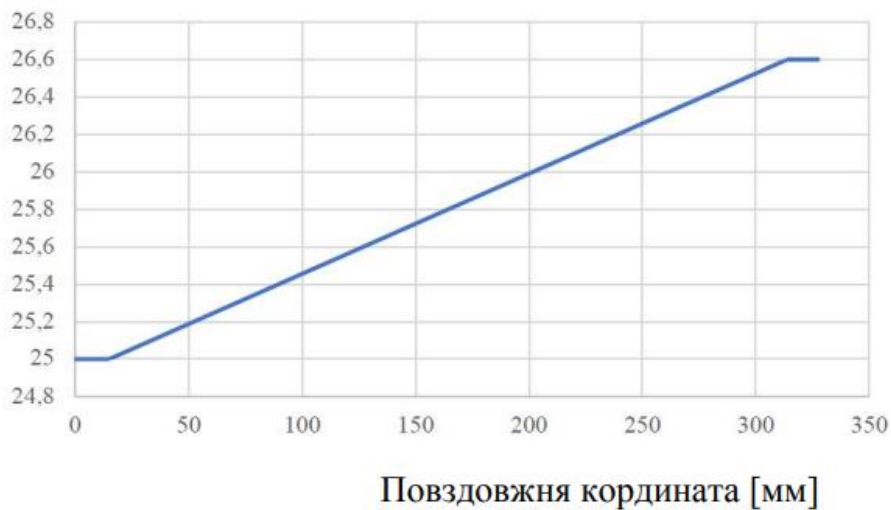


Рисунок 3.13 – Залежність температури охолоджуючої рідини від поздовжньої координати

На рисунку 3.13 показана динаміка середньої температури теплоносія вздовж каналу. Температура на вході та температура навколишнього середовища є вхідними даними моделювання і становить 25 °С. На графіку показано лінійний тренд температури теплоносія яка збільшується приблизно на 1,6 °С між входом і виходом.

3.2.2.2. Теплова модель Simscape 1D

У цьому розділі аналізується одновимірна модель із зосередженими параметрами, створена для прогнозування максимальної температура елемента протягом циклу заряду-розряду при постійному генеруванні середньої потужності. Модель виконана за допомогою програмного забезпечення Simscape; результати порівнюються з тими, що були отримані за допомогою термофлюїдно-динамічного моделювання та перевірені засоби стендових випробувань.

Фізичні параметри

Таблиця 24 – Фізичні параметри моделі зосереджених параметрів

Вироблена тепла потужність [Вт]	16,8
Питома теплоємність клітини [Дж/кг/К]	1000
Маса комірки [кг]	0,42816
Поверхня теплообміну [м ²]	6,055 е-3
Товщина [м]	10,655 е-3
Теплопровідність комірки [Вт / (м * К)]	2.5
Теплова маса охолоджувача [кг]	7,63е-4
Питома теплоємність охолоджувача [Дж / кг / К]	1800
Товщина охолоджувача [м]	7 е-5
Теплопровідність охолоджувача [Вт / (м * К)]	0,22
Температура води на вході	25 °С
Кімнатна температура	20 °С
Щільність повітря [кг/м ³]	1013
Динамічна в'язкість повітря [Па*с]	0,001183
Кінематична в'язкість повітря [м ² /с]	1.1662Е-06
Питома теплоємність повітря [Дж/кг/К]	4087
Теплопровідність повітря [Вт/м/К]	0,52



Рисунок 3.14 – Модель із зосередженими параметрами системи охолодження акумуляторної батареї

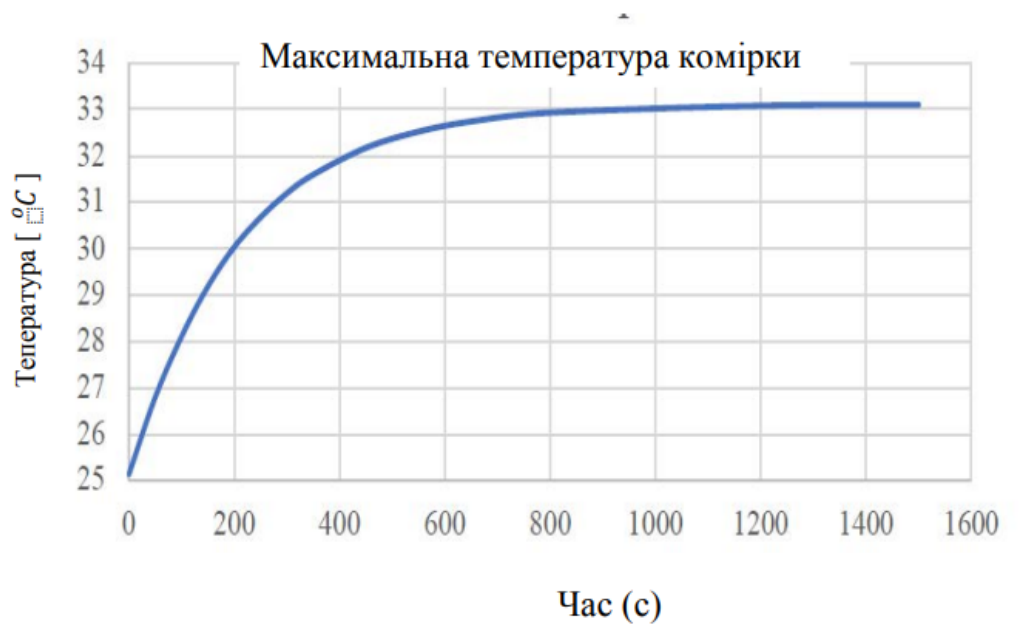


Рисунок 3.15 – Максимальна температура комірки, змодельована за допомогою моделі зосереджених параметрів

Рисунок 3.15 – представляє результат моделювання. У стабільному стані максимальна температура досягається клітинами приблизно 33 °C. Проаналізовано валідацію теплової моделі у наступному підпункті.

3.2.2.3. Перевірка теплового моделювання

Огляд

Перевірка симуляції термофлюїдної динаміки та зосередженого параметра. 1D- модель виконується за допомогою стендового випробування, яке передбачає цикл заряджання тривалістю 10 с потім 10 с розряду; як цикли заряду, так і цикли розряду виконуються при 1C.

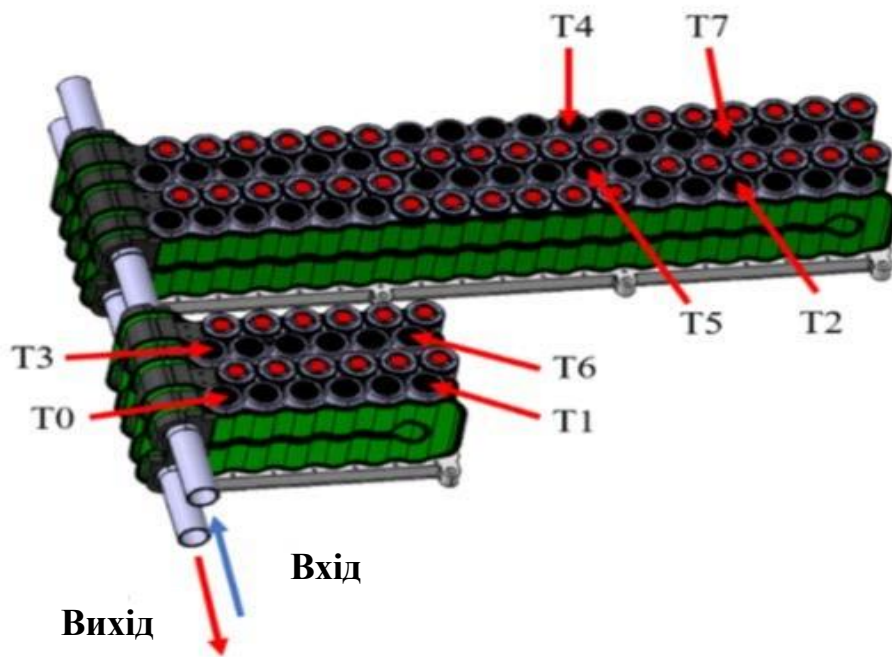


Рисунок 3.16 – Розташування датчиків NTC, які використовуються для вимірювання температури

На рисунку 3.16 зображено розташування комірок спрощеної батареї, які були оснащені термісторами NTC для вимірювання температури. Термістори розташовані на негативних полюсах комірок (чорні полюси на рисунку 3.16) оскільки позитивний полюс не є репрезентативними для температури клітини. Синій і червоний стрілки вказують напрямок входу і виходу теплоносія.

Результати моделювання.

Температура комірки

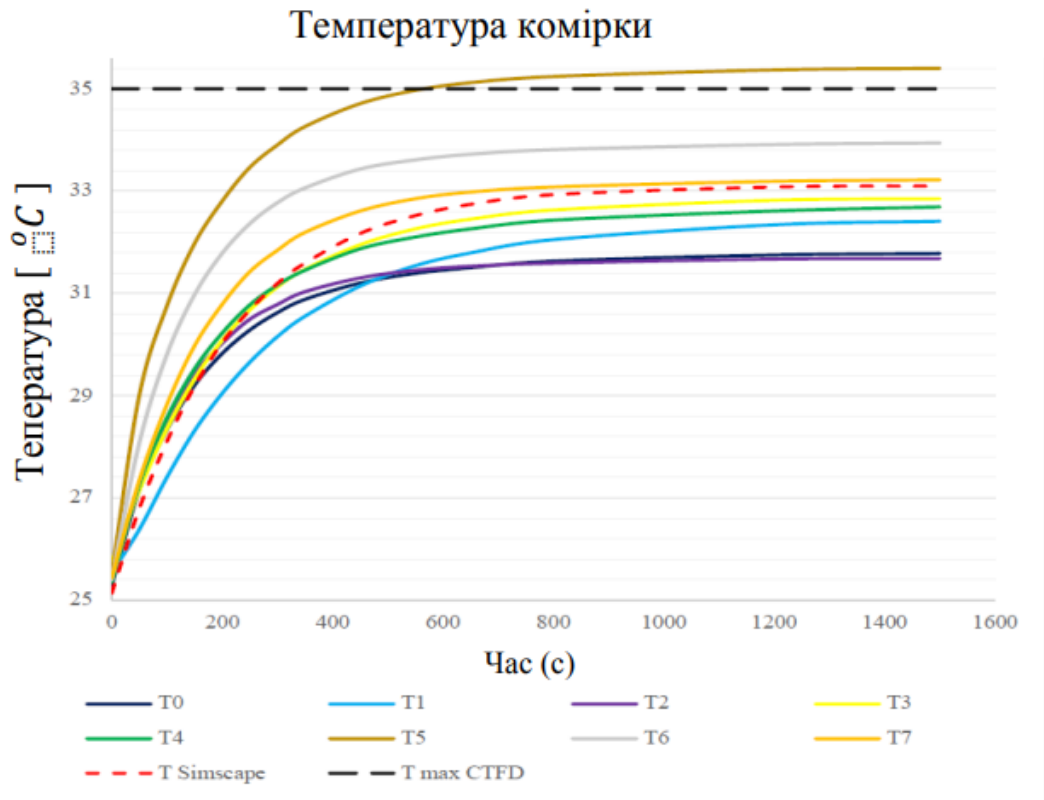


Рисунок 3.17 – Порівняння між максимальними температурами комірки, виміряними датчиками NTC, і змодельованими

На рисунку 3.17 – результати експериментального випробування порівнюються з результатами, отриманими з моделювання термофлюїдної динаміки та з одновимірної моделі зосереджених параметрів. Рисунок 3.17 показує, що модель зосереджених параметрів забезпечує максимальну температуру комірки 33,1 °C, що потрапляє в діапазон [8, 12] значень температури отримані в результаті вимірювання. Датчик T5 визначає температуру 35,4 °C; Це явище обумовлено через не правильне розташування термістора NTC.

Чорна пунктирна лінія позначає максимальну температуру комірки, отриману з термофлюїдно-динамічного моделювання. Розрахункове значення 35 °C це температурний діапазон, вимірюваний під час випробування; це відбувається через симуляцію і розглядає систему як адіабатичну, нехтуючи теплообміном, який відбувається між клітини і повітря. Під час тестової фази також відбувається заміна елементів акумуляторної батареї з теплом повітрям навколо, що призводить до максимальної температури, нижчої за отримані в результаті моделювання термофлюїдної динаміки.

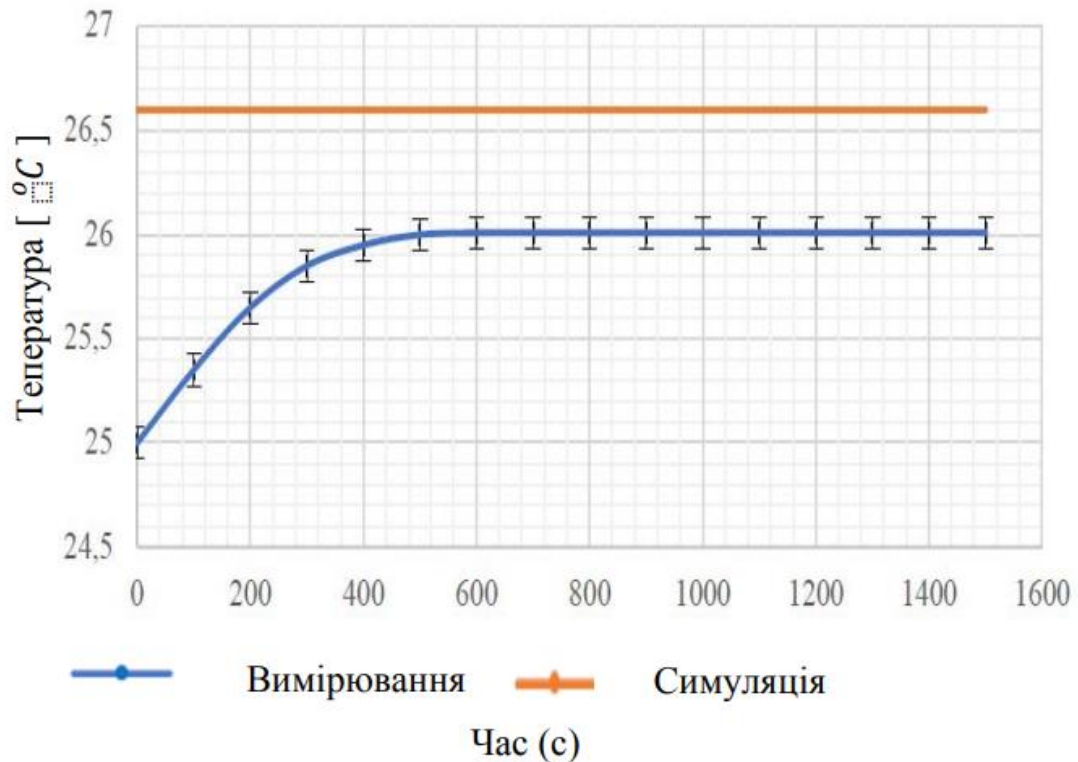


Рисунок 3.18 – Порівняння між вимірною та змодельованою температурою теплоносія на виході.

Відносна невизначеність у відсотках вимірювання температури $\pm 0,3\%$ На рисунку 3.18 представлені виміряні та змодельовані значення температури теплоносія при вихідному отвору спрощеної батареї. Помаранчева лінія позначає температуру отриману за допомогою симуляції динаміки терморідин, а синя крива являє собою експериментально виміряну температуру. Відносна похибка між значення температури становить 6%. Теплообмін між клітинами і повітрям в середньому моделюється температурою клітин вище, ніж виміряно експериментально. З цієї причини кількість теплообмін між осередками та теплоносієм буде більшим у разі моделювання. Це призводить до збільшення температури теплоносія.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз конструкції електромобіля, визначено основні переваги та недоліки даного виду транспорту. Проведено аналіз основних типів систем охолодження акумуляторних батарей електромобілів та визначено їх умови роботи. Встановлено, що робота при підвищених температурах та суттєва різниця розподілу по поверхні комірок значно зменшує експлуатаційний ресурс батареї.

2. Розроблено CFD модель системи охолодження акумуляторної батареї електромобіля. За результатами моделювання визначено такі параметри запропонованої системи охолодження, які забезпечують:

- температуру комірок не більше 30 °C після 15 годин заряджання;
- максимальний перепад тиску в системі на рівні 500 мбар при 70 л/хв;
- зменшення витрати теплоносія до 2,5 при 50 і 70 л/хв.

3. Проведено перевірку результатів моделювання на основі порівняння вимірних і змодельованих параметрів температури комірок мінімодулів, тиску теплоносія в системі охолодження, витрати енергосія. Порівняння отриманих результатів показує, що модель зосереджених параметрів забезпечує максимальну температуру комірки 33,1 °C, що потрапляє в діапазон значень температури отриманих в результаті вимірювання.

Список літератури

1. Ahmad, P., Shriram, S., Gi-Heon, K. (2013). Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle. 30th International Battery Seminar. Florida.
2. Alawee, W., H., Almolhem, Y., A., Yusuf, B., Mohammad, T., A., Dhahad, H., A. (2020). Variation of Coefficient of Friction and Friction Head Losses Along a Pipe with Multiple Outlets. *Water*, 12, 844. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/844/pdf>.
3. Bagabir, A. M., Khamaj, J. A., Hassan, A. S. (2013). Numerical Study of Turbulent Periodic Flow and Heat Transfer in a Square Channel with Different Ribs. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 1, 65-73.
4. Bravo, R. (2006). Using Equation Solver Programs to Teach Design of Pipe Networks. Tri-State University. 2006-1702. Retrieved from <https://peer.asee.org/using-equation-solver-programs-to-teach-design-of-pipenetworks.pdf>.
5. Han, J. C., Glicksman, L. R., Rohsenow, W. M. (1978). An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 21(8), 1143-1156.
6. Incropera, F., P., et al. (2011). Introduction to heat transfert sixth edition. Jefferson City: Wiley and sons.
7. Kalenik, M., Chalecki, M., Wichowski, P. (2020). Real Values of Local Resistance Coefficients during Water Flow through Welded Polypropylene TJunctions. *Water* 2020, 12, 895. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/3/895>
8. Kudela, H. (n.d). Pipeline systems. Hydraulic losses in pipes. Retrieved from http://www.itcmp.pwr.wroc.pl/~znmp/dydaktyka/fundam_FM/Lecture_no7_Pipeline_Systems.pdf. References 10 0
9. Makinejad, K., Arunachala, R., Arnold, S., Ennifar, H., Zhou, H., Jossen, A., Changyun, W. (2015). A Lumped Electro-Thermal Model for Li-Ion Cells in Electric Vehicle Application. *World Electr. Veh. J.* 7, 1-13. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/wevj7010001>.

10. Maleki, H., Al Hallaj, S., Selman, J.R., Dinwiddie, R. B., & Wangb, H. (1999). Thermal Properties of Lithium-Ion Battery and Components. *Journal of The Electrochemical Society*, 146 (3), 947-954.
11. Munson, B., R., Okiishi, T., H., Huebsch, W., W., Rothmayer, A., P. (2013). *Fundamentals of fluid Mechanics*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
12. Nerinckx, K., Vierendeels, J., & Dick, E. (2007). A mach-uniform algorithm: coupled versus segregated approach. *Journal of Computational Physics*, 224, 314- 331.
13. OpenFOAM user guide Documentation. Retrieved from <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide>.
14. Patel, P., D., Shah, K., N., Mahant, K., V., Yadav, C., O. (2013). Cfd Analysis Of Heat Exchanger Over A Staggered Tube Bank For Different Angle Arrangement Of Tube Bundles. *Int J Eng. 2*.
15. Roacher, P., J. (1994). Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. *Journal of Fluids Engineering*, 116(3), p. 405.
16. Roacher, P., J. (1997). Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. *Annual Review Fluid Mechanics*, 29, 123-160.
17. Sakib, S., Al-Faruk, A. (2018). Flow and Thermal Characteristics Analysis of Plate-Finned Tube and Annular-Finned Tube Heat Exchangers fo In-Line and Staggered Configurations. *Mechanics and Mechanical Engineering*, 22, 1407-1417.