

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Сумський державний університет**  
**Факультет технічних систем та енергоефективних технологій**  
**Кафедра комп'ютерної механіки імені Володимира Марцинковського**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Андрій ЗАГОРУЛЬКО  
(підпис)

\_\_\_\_\_ 2024 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття освітнього ступеня магістр**

зі спеціальності 131 Прикладна механіка, освітньо-професійної програми «Комп'ютерна механіка», на тему: Числові дослідження впливу геометричних параметрів лопаток на ефективність генерації енергії в турбомашинах.

Здобувача групи КМ.м-31 ГРИГОР'ЄВА В'ячеслава Сергійовича.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ В'ячеслав ГРИГОР'ЄВ  
(підпис)

Керівник: асистент, доктор філософії Олександр ПОЗОВНИЙ \_\_\_\_\_  
(підпис)

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота бакалавра: 60 с., 29 рис., 19 дж.

Об'єкт досліджень – робоче колесо з конфузором та направляючими пластинами.

Предмет –геометричні параметри робочого колеса, конфузора та направляючих лопаток.

Мета роботи – розробка конструкції для гідрогенерації.

Метод дослідження – комп'ютерне моделювання та числовий розрахунок, заданої конструкції.

Робоче колесо турбомашини — це ключовий елемент турбін і компресорів, який перетворює енергію потоку рідини чи газу на механічну енергію обертання. Лопаті, закріплені на диску колеса, змінюють напрямок і швидкість потоку, забезпечуючи обертання вала турбіни. Це обертання передається на генератор, де механічна енергія перетворюється на електричну.

В електрогенераторах, наприклад, на теплових і гідроелектростанціях, робоче колесо приводиться в рух потоком пари або води під високим тиском. Цей процес є основою для генерації електроенергії, яка подається в мережу.

Конфузор — це звужена частина трубопроводу, яка спрямовує та прискорює потік рідини, перетворюючи його статичний тиск на кінетичну енергію. У гідрогенераторах конфузор грає важливу роль у регулюванні потоку води до турбіни. Він забезпечує оптимальну швидкість і напрямок потоку, що сприяє ефективнішій роботі турбіни, яка, в свою чергу, обертає ротор генератора, перетворюючи механічну енергію обертання на електричну. Конструкція конфузора залежить від вимог до потоку і дозволяє мінімізувати гідравлічні втрати. Таким чином, конфузор підвищує ефективність гідрогенератора, оптимізуючи енергію, що передається турбіні.

ГІДРОГЕНЕРАТОР. КОНФУЗОР. РОБОЧЕ КОЛЕСО. ПРОФІЛЬ ЛОПАТКИ

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ГІДРОГЕНЕРАТОРНІ МАШИНИ .....	11
1.1 Поняття гідрогенератора .....	11
1.2 Компоненти гідрогенеруючої машини .....	13
1.3 Різновиди гідротурбінних установок та принцип їхньої дії .....	15
1.4 Висновок .....	19
2 ПРОЕКТУВАННЯ ГІДРОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ.....	21
2.1 Математичний розрахунок основних кінематичних параметрів конфузора. .....	21
2.2 Побудова 3D моделі конфузору та направляючих лопаток. ....	24
2.3 Побудова 3D моделі робочого колеса.....	27
2.4 Висновок .....	31
3. ЧИСЛОВИЙ РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ ГІДРОГЕНЕРАТОРА.....	33
3.1 Конструкція та принцип роботи гідрогенеруючої установки .....	33
3.2 Розрахунок ефективності конструкції в ANSYS CFX .....	34
3.3 Отримання результатів та їх порівняння .....	41
3.4 Висновок .....	46
4. РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ В ANSYS FLUENT. ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РІЗНИХ ВИРІШУВАЧІВ .....	48
4.1 Огляд вирішувача Ansys Fluent. Області застосування. Порівняння з Ansys CFX.....	48
4.2 Проведення чисельного експерименту в Ansys Fluent .....	50
4.3 Порівняння результатів розрахунків вирішувачів Ansys CFX та ANSYS Fluent.....	56
ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ .....	59

## ВСТУП

Турбомашина — це пристрій, який використовує енергію руху рідини або газу для виконання корисної роботи або, навпаки, витрачає механічну енергію для зміни стану рухомої рідини. Принцип її роботи можна уявити як колесо з лопатями, що обертається. Коли рідина потрапляє на ці лопаті, вона штовхає їх, змушуючи колесо обертатися швидше. Ця обертальна енергія може бути використана для приводу інших механізмів, наприклад, генератора електричного струму.

Існують різні види турбомашин, зокрема турбіни, насоси, вентилятори та компресори. Турбіни використовують енергію рідини або газу для вироблення механічної роботи, як, наприклад, парова турбіна, гідротурбіна та газова турбіна. Насоси, вентилятори й компресори, у свою чергу, витрачають механічну енергію для підвищення тиску або швидкості рідини чи газу. Наприклад, водяний насос, вентилятор для обігрівача та автомобільний компресор.

Турбомашини, і зокрема газові турбіни, широко використовувалися в останні десятиліття для рушійної сили, як авіаційної, так і морської, виробництва електроенергії та механічного приводу; в той час як парові турбіни використовувалися здебільшого для великомасштабного виробництва електроенергії, як автономно, так і в поєднанні з рідкопаливними турбінами у комбінованих циклах. Технологія наближається до зрілості, а ефективність, надійність, доступність і робочий діапазон тепер близькі до права. Отже, подальше вдосконалення стає все більш складним і дорогим. Більшість із цих агрегатів працюють на викопному паливі, і зростаючий тиск щодо зменшення їхнього вуглецевого сліду вимагає змін, які вимагають інновацій у багатьох технологічних сферах, щоб різко зменшити або звести до нуля викиди та безперешкодно взаємодіяти з відновлюваними ресурсами.[1]

Обчислювальна гідродинаміка є одним із найбільш популярних інструментів у проектуванні та аналізі компонентів турбомашин. Від вентилятора двигуна на вході, через компресор і секції згоряння, до турбін на

виході, CFD використовується для виконання аналізу потоку рідини та теплообміну, щоб допомогти розробникам отримати найвищу продуктивність із кожного компонента. У деяких випадках, таких як продуктивність осьового компресора в проектній точці, поточні методи здатні забезпечити хорошу точність прогнозування. Однак багато областей вимагають удосконалених методів, щоб дати надійні прогнози для подальшого впевненого вивчення відповідних проектних просторів.[1]

Для створення числових моделей симуляції було використано інструмент обчислювальної гідродинаміки (CFD) від ANSYS. Найкраща модель симуляції була обрана для багатоцільового оптимізаційного проектування. Цей алгоритм використовувався протягом усього процесу проектування для визначення оптимального рішення. Було створено кілька моделей конструкцій, вибираючи такі характеристики, як розмір спірального корпусу насоса, довжина язика та його кут.

Результати демонструють, що запропонована стратегія є ефективною для вирішення проблеми оптимального проектування. Ці результати можуть слугувати корисним посиленням для виробників насосів, а також для дослідників, зацікавлених у застосуванні своїх розробок у галузі проектування насосів у майбутньому.[2]

Основні принципи роботи турбомашин включають взаємодію лопатей з робочим тілом (рідиною або газом), зміну стану робочого тіла (тиску, швидкості або напрямку руху) та отримання або віддачу механічної енергії. У турбінах механічна енергія отримується, а в насосах, вентиляторах і компресорах — витрачається.

Сучасні гідрогенератори відіграють ключову роль у виробництві екологічно чистої енергії, використовуючи для цього кінетичну енергію рідини. Основна ідея роботи таких установок полягає в ефективному перетворенні енергії потоку води в обертальну механічну енергію, яка потім перетворюється генератором у електричну енергію. Гідрогенератори широко використовуються

в гідроелектростанціях, де вони допомагають забезпечувати електроенергією цілі регіони.

Основними елементами турбінного агрегату в гідрогенераторі є конфузор (вхідний канал), направляючі лопатки та робоче колесо. Кожен з цих елементів виконує певні функції, що сприяють загальній ефективності процесу, і має специфічні особливості, що впливають на якість перетворення енергії. Проектування та оптимізація геометрії кожного елемента є вирішальними для забезпечення максимальної продуктивності та мінімізації енергетичних втрат.

Процес роботи гідрогенератора починається з надходження води у вхідний канал (конфузор), де потік стабілізується та рівномірно розподіляється. Після цього він потрапляє у зону направляючих лопаток, які формують його напрямом і оптимізують кут атаки потоку перед входом в робоче колесо. Саме робоче колесо перетворює кінетичну енергію води в обертальний рух, який передається генератору для виробництва електричної енергії. Завдяки високій ефективності гідрогенератори є важливим компонентом у системах поновлюваної енергетики та мають великий потенціал для подальшого розвитку.

Конфузор, або вхідний канал, є першим елементом гідрогенератора, з яким взаємодіє потік води. Основна функція конфузора – забезпечити рівномірний розподіл швидкості потоку та знизити турбулентність, що дозволяє ефективніше використовувати енергію води. Рівномірний розподіл потоку важливий, оскільки нерівномірний рух води може призвести до значних втрат енергії та зменшення ефективності всього агрегату.

У вихрових пристроях часто потрібно зберегти частину енергії вихрового потоку, який потрібно розсіяти. Одним з найбільш раціональних способів енергозбереження є використання конфузора. Характеристика конфузора на закрученому потоці мало вивчена. Проведено чисельне моделювання робочих характеристик конфузора. Для підтвердження математичної моделі проведено порівняння з експериментальними даними по витіканню закрученого струменя. Перевірку результатів проводили шляхом порівняння з експериментальними

результатами не тільки якісно, але й кількісно за швидкостями в характерних точках потоку.[3]

Проектування конфузора базується на розрахунках гідравлічних параметрів, зокрема швидкості потоку, його турбулентності та тиску. Основними геометричними параметрами конфузора є довжина, форма перетину, а також кут звуження. Для забезпечення мінімальних втрат і збереження якості потоку часто використовують спеціальні програмні пакети для числового моделювання потоку, такі як ANSYS CFX, які допомагають візуалізувати розподіл швидкості та тиску по всій довжині конфузора.

**Приклади застосування:** Конфузори також використовуються у вентиляційних та аеродинамічних системах, де необхідно рівномірно розподілити потік повітря та забезпечити його стабільний рух. Наприклад, у реактивних двигунах повітряні конфузори допомагають формувати потік повітря перед його потраплянням у зону компресора.

Направляючі лопатки є наступним елементом, що впливає на напрямок та розподіл швидкості потоку. Їхнє головне завдання – сформувати потік води під оптимальним кутом атаки, щоб максимально ефективно використати енергію потоку в зоні робочого колеса. Регулювання кута нахилу направляючих лопаток дозволяє змінювати потужність гідрогенератора залежно від поточних умов потоку та потреб у виробництві електроенергії.

Проектування направляючих лопаток включає розрахунок таких параметрів, як форма профілю, кут нахилу, а також кількість і розміщення лопаток у потоці. Важливим аспектом є оптимізація відстані між направляючими лопатками, яка визначає рівномірність потоку та зменшення гідравлічних втрат на цьому етапі. Регулювання кута лопаток дозволяє контролювати об'єм потоку, що подається на робоче колесо, що дає змогу адаптувати гідрогенератор до різних режимів роботи.

**Приклади застосування:** Конструкції з направляючими лопатками широко використовуються в насосах, вентиляційних системах і навіть у реактивних двигунах для управління потоком рідини або газу. У реактивній

техніці вони забезпечують правильний кут атаки потоку, що збільшує ефективність двигуна та знижує витрату пального.

Робоче колесо є основним елементом гідрогенератора, де відбувається перетворення кінетичної енергії потоку в механічний обертальний рух. Воно складається з ряду лопаток, які знаходяться під певним кутом до потоку, що дозволяє їм максимально ефективно використовувати енергію води. Ефективність гідрогенератора значною мірою залежить від форми і кута нахилу лопаток, які визначають, наскільки ефективно буде передаватися енергія потоку на генератор.

Проектування робочого колеса передбачає детальне дослідження гідродинамічних параметрів, зокрема кута атаки, профілю лопаток, та швидкості потоку. Числові методи моделювання, такі як метод кінцевих елементів, дозволяють оптимізувати форму лопаток для зменшення енергетичних втрат. Геометричні параметри лопаток підбираються з урахуванням швидкості та напрямку потоку, що дає змогу забезпечити максимальну передачу енергії потоку на генератор. Вибір матеріалів для робочого колеса також є важливим, оскільки він має відповідати вимогам міцності і зносостійкості.

**Приклади застосування:** Робочі колеса різних конструкцій також використовуються в турбінах вітроенергетичних установок, компресорах і насосах, де відбувається перетворення потоку рідини або газу в механічну енергію. Наприклад, вітрові турбіни використовують лопаті для перетворення енергії вітру, що обертає генератор для виробництва електроенергії.

Гідрогенератор – це складна система, де кожен елемент виконує свою унікальну функцію, взаємодіючи з іншими для забезпечення високої ефективності процесу енергоперетворення. Конфузор забезпечує рівномірний потік води, направляючи лопатки формують напрямок потоку для мінімізації втрат енергії, а робоче колесо перетворює кінетичну енергію в обертальний рух. Оптимізація геометричних параметрів кожного з цих елементів є важливим завданням у процесі проектування, оскільки вона визначає продуктивність гідрогенератора.



В подальших розділах роботи будуть детально розглянуті методики числового моделювання, зокрема, CFD-аналіз, та здійснено аналіз впливу різних геометричних параметрів на енергоефективність. Це дослідження стане основою для створення оптимізованих конструкцій, які зможуть ефективніше перетворювати енергію потоку в електричну енергію, сприяючи розвитку енергетики та зменшенню залежності від викопного палива.

# 1 ГІДРОГЕНЕРАТОРНІ МАШИНИ

## 1.1 Поняття гідрогенератора

Гідроенергетика залишається ключовим джерелом відновлюваної енергії в прагненні до декарбонізації економіки, хоча відносно високий потенційний вплив гідроморфологічних змін, які вона може спричинити, викликає серйозне занепокоєння для водних екосистем. В останні роки нові технології та практики все частіше застосовуються для мінімізації впливу гідроелектростанцій, одночасно покращуючи ефективність і гнучкість виробництва енергії. Загальним ефектом цих інновацій може стати більш стійке проектування та експлуатація гідроенергетики, досягнення кращого балансу між цілями декарбонізації та захисту екосистеми.[4]

Енергія - це сила, якою володіє речовина, так що речовина впливає на навколишні умови. Енергія вітру - це енергія, що міститься в рухомих повітряних масах. Вона походить від сонячної енергії. Нагрівання Землі сонячним світлом викликає різницю в густині ( $\rho$ ) повітря. Ця різниця в щільності викликає різницю в тиску повітря, таким чином створюється вітер. Енергія потоку води — це енергія, що міститься в русі води або її потенційному положенні, яку можна використовувати для виконання роботи. Має потенційну та кінетичну складову енергії.[5]

Гідроелектроенергія є безперервно відновлюваним джерелом електричної енергії, вона не тягне, не вимагає витрат на паливо та є вигідною завдяки низькій експлуатації та обслуговуванню. Гідроенергія – це енергія, що створюється внаслідок руху водних об'єктів. Вода тече через канал або напірний патрубок до водяного колеса або турбіни, де вона вдаряється об ковш колеса, змушуючи вал водяного колеса або турбіни обертатися. При виробленні електроенергії обертовий вал, який підключений до генератора змінного струму або генератора, перетворює рух вала в електричну енергію. Гідроелектростанції є економічно ефективнішими порівняно з іншими типами, оскільки; хоча його вартість

будівництва є вищою, після введення в експлуатацію він має певні експлуатаційні витрати та відносно низький рівень обслуговування за умови сприятливих умов середньорічної кількості опадів [6].

Гідрогенератор функціонує, перетворюючи енергію потоку води в електричну завдяки роботі турбіни й генератора. Вода під високим тиском подається на лопаті турбіни, що спричиняє її обертання. Ця механічна енергія передається на ротор генератора, де завдяки електромагнітній індукції утворюється електричний струм.

До основних елементів гідравлічного генератора відносяться турбіна, яка отримує енергію потоку води; ротор і статор, що виконують функції перетворення механічної енергії на електричну; та регулювальні механізми, які оптимізують потужність і ефективність генерації.

Гідравлічні джерела електроенергії поділяються на різні типи за конструкцією турбіни, характеристиками енергетичної системи та розташуванням генератора. Залежно від типу турбіни, виділяють осьові, радіально-осьові (Френсіс), капсульні та Пелтонові турбіни. Осьові генератори застосовуються в умовах, де потік води рухається паралельно осі турбіни, а радіально-осьові є універсальними та використовуються на гідроелектростанціях середнього та високого напору. Капсульні генератори оптимізовані для низьконапірних потоків, а Пелтонові – для високонапірних, де вода подається струменем на лопаті.

За типом енергетичної системи гідравлічні генератори поділяють на стаціонарні та мобільні. Стаціонарні генератори, закріплені на місці, використовуються на великих гідроелектростанціях, тоді як мобільні забезпечують резервне живлення в місцях, де необхідно швидко підключити аварійне енергопостачання.

В залежності від розміщення, існують горизонтальні та вертикальні генератори. Горизонтальні генератори зазвичай забезпечують менші втрати енергії на тертя, що підвищує їхню ефективність, тоді як вертикальні

встановлюються на великих гідроелектростанціях, де використовуються значні перепади висоти води.

## 1.2 Компоненти гідрогенеруючої машини

Гідротурбіна є ключовим елементом гідравлічного генератора, що перетворює кінетичну та потенційну енергію водного потоку на механічну енергію обертання. Кожен компонент турбіни має своє специфічне призначення і сприяє загальній ефективності роботи генератора. У цьому розділі розглянуто основні елементи гідротурбіни, їхні конструкції, функції та роль у перетворенні енергії водного потоку.

**Конфузор** – це звужувальна частина каналу, розташована перед робочим колесом, яка спрямовує потік води на лопаті турбіни, збільшуючи її швидкість. Основне завдання конфузора полягає у фокусуванні і прискоренні водного потоку перед його подачею на робоче колесо, що підвищує кінетичну енергію води. У деяких конструкціях, зокрема тих, які використовуються у цьому проекті, конфузор додатково оснащений направляючими гвинтоподібними пластинами. Ці пластини закручують потік води, що дозволяє спрямовувати його під оптимальним кутом на лопаті робочого колеса. Завдяки цьому відбувається зменшення турбулентних втрат та поліпшення ефективності роботи турбіни. У конструкції з горизонтальним розміщенням гідрогенератора конфузор особливо важливий, оскільки дозволяє максимально ефективно використовувати енергію водного потоку в умовах обмеженого простору.

**Робоче колесо (або ротор)** є основним обертовим елементом турбіни, на який потрапляє вода, викликаючи обертання лопатей. Лопаті робочого колеса спроектовані для максимально ефективного захоплення енергії води. Розміщення, кут нахилу та форма лопатей впливають на обертовий момент, що розвивається на валу турбіни, та на ефективність процесу передачі енергії. Залежно від типу турбіни (осьова, радіально-осьова, капсульна чи Пелтонова), конструкція робочого колеса змінюється, але основна функція залишається

незмінною – прийом кінетичної енергії води та її перетворення на механічне обертання.

У традиційних турбінах з перехресним потоком перетин кожної лопаті площиною, нормальною до осі, задано двома дугами окружності. Найпростіша форма надається одним радіусом і постійною товщиною, із закругленими кінцями. Більш ефективну форму надають дві дуги кола з різним радіусом і змінною товщиною, що зменшуються від середини до двох кінців леза. Далі спочатку показано, що в цьому другому випадку максимальна ефективність досягається, коли зовнішня поверхня лопаті є дотичною до вхідної поверхні робочого колеса. З іншого боку, максимальна товщина леза в цьому випадку може бути недостатньою для конструктивної безпеки машини. Для дотримання умови дотичної при більшій максимальній товщині необхідно перейти від квадратичної до кубічної форми зовнішньої поверхні лопаті.[7]

**Направляючий апарат** – це система, яка керує напрямком і швидкістю потоку води перед подачею на робоче колесо. Він зазвичай складається з регульованих лопатей або пластин, які розташовані у конфузори перед турбіною. Направляючий апарат дозволяє оптимально направляти потік води на лопаті робочого колеса, зменшуючи втрати енергії та підвищуючи ефективність гідротурбіни. Також цей компонент може бути використаний для контролю потужності турбіни, змінюючи кут нахилу лопатей залежно від потреб енергосистеми.

**Вал турбіни** з'єднує робоче колесо з ротором електрогенератора, передаючи йому механічну енергію обертання. Конструкція валу повинна витримувати значні динамічні навантаження, які виникають під час роботи турбіни, і забезпечувати мінімальні втрати енергії. У більшості конструкцій вал обладнаний підшипниками для зменшення тертя, а також системою ущільнень, яка запобігає проникненню води в генератор.

**Підшипники** забезпечують зменшення тертя між валом та нерухомими частинами конструкції, що сприяє плавному обертанню та підвищує надійність і довговічність установки. Найчастіше використовуються підшипники ковзання

або кочення, залежно від розмірів і умов експлуатації турбіни. **Система ущільнень** встановлюється навколо валу, щоб запобігти проникненню води всередину механізмів генератора та забезпечити герметичність системи.

**Диффузор** є розширювальною частиною каналу, що знаходиться після робочого колеса. Його призначення – знизити швидкість потоку води та підвищити тиск. Це дозволяє зменшити втрати кінетичної енергії та підвищити загальний ККД турбіни. Диффузор також створює рівномірний вихідний потік води, що сприяє стабільній роботі турбіни.

**Корпус турбіни** є захисним і направляючим елементом, який утримує всі компоненти у потрібному положенні та забезпечує правильний напрямок потоку води. Він повинен витримувати значні гідравлічні навантаження, залишаючись герметичним, щоб уникнути витоків. Корпус забезпечує стабільність і безпеку роботи турбіни.

Кожен компонент гідротурбіни виконує специфічні завдання, що сприяють ефективному перетворенню енергії водного потоку в електричну. Конфузор відіграє особливу роль у цьому процесі, оскільки фокусує потік води та забезпечує оптимальне навантаження на робоче колесо, що в комплексі з іншими компонентами підвищує ефективність турбіни та надійність роботи гідравлічного генератора.

### **1.3 Різновиди гідротурбінних установок та принцип їхньої дії**

Гідротурбіни є ключовими компонентами гідроенергетичних установок, і їх різновиди розрізняються за конструкцією, призначенням та умовами експлуатації. Вибір типу гідротурбіни залежить від багатьох факторів, включаючи висоту напору води, швидкість потоку, а також особливості гідроелектростанції. У цьому розділі розглянемо основні типи гідротурбінних установок: осьові, радіально-осьові (турбіна Френсіса), капсульні та Пелтонові турбіни. Буде розкрито принцип дії кожного типу, їхні конструктивні особливості, а також надано приклади використання в Україні.

### **Осьові турбіни**

Принцип дії: Осьові турбіни використовуються при низьких напорах і значних об'ємах води. Вода подається уздовж осі обертання турбіни і, проходячи через робоче колесо, спричиняє обертання лопатей. Конструкція осьових турбін передбачає направлення потоку паралельно осі вала, що забезпечує високу ефективність при значних об'ємах і низьких напорах води.

Конструктивні особливості: Осьова турбіна складається з напрямного апарату з регульованими лопатями, робочого колеса з фіксованими лопатями та валу, що передає обертальний момент на генератор. Лопаті напрямного апарату можна регулювати для зміни потужності залежно від рівня води.

Осьові турбіни широко застосовуються на низьконапірних ГЕС, зокрема на Дніпровській ГЕС у Запоріжжі.



Рисунок 1.1 – Проточна частина осьової турбіни

### **Радіально-осьові турбіни (турбіна Френсіса)**

Принцип дії: Радіально-осьові турбіни, відомі також як турбіни Френсіса, перетворюють кінетичну і потенційну енергію водного потоку. Вода подається

на лопаті турбіни радіально, а виходить уздовж осі обертання. Ця конструкція дозволяє використовувати турбіну при середніх і високих напорах.

Конструктивні особливості: Турбіни Френсіса включають направляючий апарат, робоче колесо і диффузор. Робоче колесо має спеціальну форму, що забезпечує ефективне перетворення енергії води на механічну. Лопаті напрямного апарату можуть змінювати кут для адаптації до змін у рівні води і потреб енергосистеми.

Такий тип турбін, зазвичай має високі витрати на встановлення та обслуговування, які значною мірою переважають можливу вигоду. Останнім часом були запропоновані невеликі гідротурбіни з трубчастим гвинтом, а також із зворотно обертовими бігунами. Перевагою запропонованого пристрою є те, що його крильчатка може розташовуватися всередині труби.[8]

Турбіни Френсіса активно використовуються на Канівській ГЕС, де середній напір води забезпечує ефективну роботу цих турбін.



Рисунок 1.2 – Зображення турбіни Френсіса



## Пелтонова турбіна

Турбіна Пелтона є найбільш поширеною і ефективною імпульсною гідроенергетичною турбіною. Корпус Пелтона є статичним, але ключовим компонентом: внутрішні гідродинамічні явища впливають на продуктивність гідроелектростанції, вібрацію обладнання та якість води (розчинений кисень за течією).[9]

Принцип дії: Пелтонова турбіна є турбіною дії і використовується при високих напорах та малих об'ємах води. Вода подається на лопаті у вигляді струменя, що потрапляє на ковші (лопаті) робочого колеса, приводячи їх у рух. Ковшоподібна форма лопатей забезпечує максимальне поглинання кінетичної енергії струменя.

Конструктивні особливості: Пелтонова турбіна має робоче колесо з ковшами, на які під тиском подається вода. Кожен ковш розділений на дві частини, що дозволяє максимально ефективно перетворювати енергію води в обертання.

Пелтонові турбіни встановлені на високонапірних малих ГЕС у Карпатах, де потоки води з високим напором забезпечують ефективну роботу таких турбін.



Рисунок 1.2 – Зображення турбіни Пелтона

Кожен тип гідротурбіни має унікальні конструктивні особливості, що роблять їх придатними для конкретних умов роботи. В Україні широко використовуються різні типи гідротурбін, які адаптовані до специфічних особливостей річкових ресурсів та інфраструктури.

#### **1.4 Висновок**

У першому розділі ми дослідили, що собою являє гідрогенератор, його принцип дії та ключові компоненти. Було з'ясовано, що гідрогенератор перетворює кінетичну та потенційну енергію води в механічну, а згодом – у електричну енергію. Гідрогенератори відрізняються залежно від типу гідротурбіни, умов експлуатації та місця встановлення. Ці установки є основою для отримання екологічно чистої енергії на великих річках і водосховищах, що робить їх невід'ємною частиною енергетичних систем у країнах з розвинутою гідроенергетикою, таких як Україна.

У другому розділі було розглянуто конструкцію основних компонентів гідротурбіни, включаючи напрямний апарат, робоче колесо, дифузор та конфузор. Кожен із цих елементів грає свою важливу роль у забезпеченні ефективної роботи установки. Конфузор і напрямний апарат регулюють потік і спрямовують воду до робочого колеса, максимізуючи продуктивність турбіни. Дифузор дозволяє стабілізувати потік води на виході та зменшити втрати енергії. Така комплексна конструкція забезпечує високу ефективність та стабільну роботу гідроустановки навіть за умов змінного потоку води.

Третій розділ детально описує різновиди гідротурбінних установок та специфіку їхнього застосування. Було розглянуто осьові, радіально-осьові (Френсіс), капсульні, Пелтонові та турбіни Каплана, кожна з яких підходить для різних гідрологічних і технологічних умов. Осьові турбіни та капсульні моделі використовуються для низьких напорів, а Френсіс та Пелтонові турбіни ефективніші при середніх і високих напорах. Турбіна Каплана, завдяки своїм

регульованим лопатям, має універсальне застосування в умовах змінного рівня води. Кожен із цих типів турбін знаходить застосування в Україні, що дозволяє максимально ефективно використовувати різноманітний гідропотенціал країни.

Отже, на основі аналізу конструктивних особливостей гідрогенераторів, специфіки їхньої конструкції та різновидів гідротурбін, можна зробити висновок, що інтегрований підхід до вибору типу турбіни і конструкції гідроустановки дозволяє забезпечити високу ефективність роботи та адаптивність до умов роботи конкретної гідроелектростанції. Це є критичним для підтримання енергетичної безпеки країни, сприяє розвитку екологічно чистої енергетики та забезпечує стабільну генерацію електроенергії для промислових і побутових споживачів.

## 2 ПРОЕКТУВАННЯ ГІДРОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

### 2.1 Математичний розрахунок основних кінематичних параметрів конфузора.

Вхідні дані:

Швидкість потоку на вході:  $v_1=0.55$  (м/с), площа перетину на вході:  $A_1=0.1257$  м<sup>2</sup>, площа перетину на виході:  $A_2=0.0079$  м<sup>2</sup>, діаметр на вході:  $D_1=0.4$  м, діаметр на виході:  $D_2=0.05$  м, довжина конфузора:  $L=0.36$  м, середовище: вода ( $\rho=998$  кг/м<sup>3</sup>,  $\mu=1.002 \cdot 10^{-3}$  Па\с).

1. Розрахунок швидкості потоку через конфузур:

За рівнянням нерозривності:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (2.1)$$

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 \quad (2.2)$$

$$v_2 = \frac{0.1257}{0.0079} 0.55 = 8.74 \quad (2.3)$$

2. Розрахунок числа Рейнольдса:

Число Рейнольдса визначає режим течії:

$$Re = \frac{\rho v_2 D_2}{\mu} \quad (2.4)$$

$$Re = \frac{998 \cdot 8.74 \cdot 0.05}{1.002 \cdot 10^{-3}} \approx 435,400 \quad (2.5)$$

Це число Рейнольдса підтверджує турбулентний режим течії ( $Re > 4000$ ).

3. Розрахунок втрат енергії в конфузурі:

3.1 За формулою Дарсі-Вейсбаха втрати напору через тертя:

$$h_f = f * \frac{L}{D_{сеп.}} * \frac{v_{сеп.}^2}{2g} \quad (2.6)$$

3.2 Середній діаметр:

$$D_{\text{сер.}} = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{0.4 + 0.05}{2} = 0.225 \quad (2.7)$$

3.3 Середня швидкість:

$$v_{\text{сер.}} = \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{0.55 + 8.74}{2} \approx 4.645 \quad (2.8)$$

3.4 Визначення коефіцієнта тертя  $f$ :

Для турбулентної течії за формулою Блазіуса:

$$f \approx 0.316 * Re^{-0.25} \quad (2.9)$$

Далі отримано  $Re$  для середньої швидкості:

$$Re_{\text{сер.}} = \frac{\rho * v_{\text{сер.}} * D_{\text{сер.}}}{\mu} = \frac{998 * 4.645 * 0.225}{1.002 * 10^{-3}} \approx 1041100 \quad (2.10)$$

$$f = 0.316 * 1041100^{-0.25} \approx 0.0183 \quad (2.11)$$

Втрати напору:

$$h_f = 0.0183 * \frac{0.36}{0.225} * \frac{4.645^2}{2 * 9.81} \approx 0.074 \quad (2.12)$$

4. Аналіз розподілу напору (рівняння Бернуллі):

За рівнянням Бернуллі:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f \quad (2.13)$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + h_f \quad (2.14)$$

$$\frac{p_1-p_2}{\rho g} = \frac{8.74^2-0.55^2}{2*9.81} + 0.074 \approx 3.89 \quad (2.15)$$

Отримані математичні параметри необхідні для подальшого проектування оптичної частини гідрогенераторної установки та числових експериментів з нею.



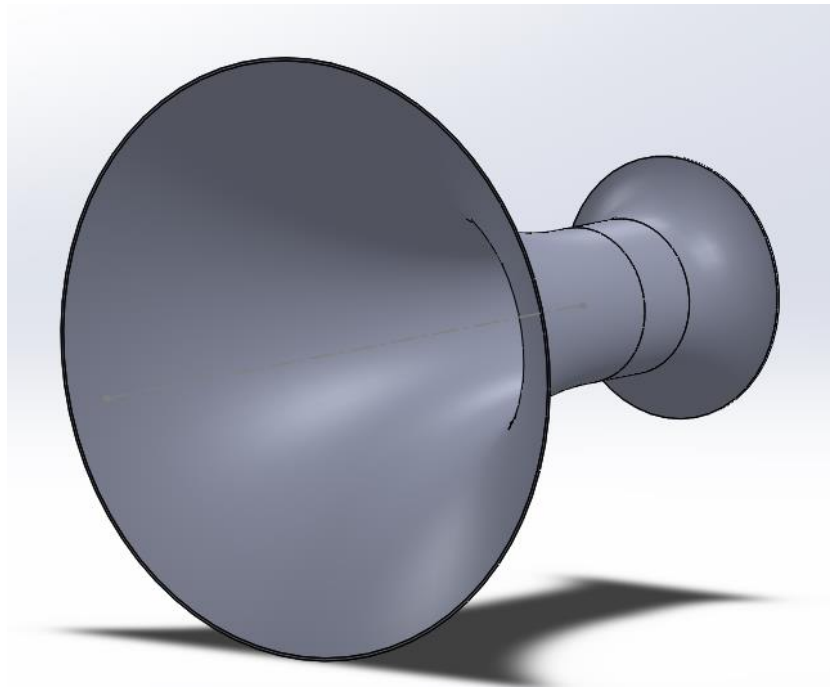


Рисунок 2.1 – Об'ємне зображення конфузору без направляючих лопаток

Далі на відстані 50 мм одна від одної були побудовані 7 допоміжних площин на яких будується ескіз напрямної лопатки. Задля спрощення конструкції при виготовлення та розрахунку був використаний прямокутний профіль товщиною 2 мм.

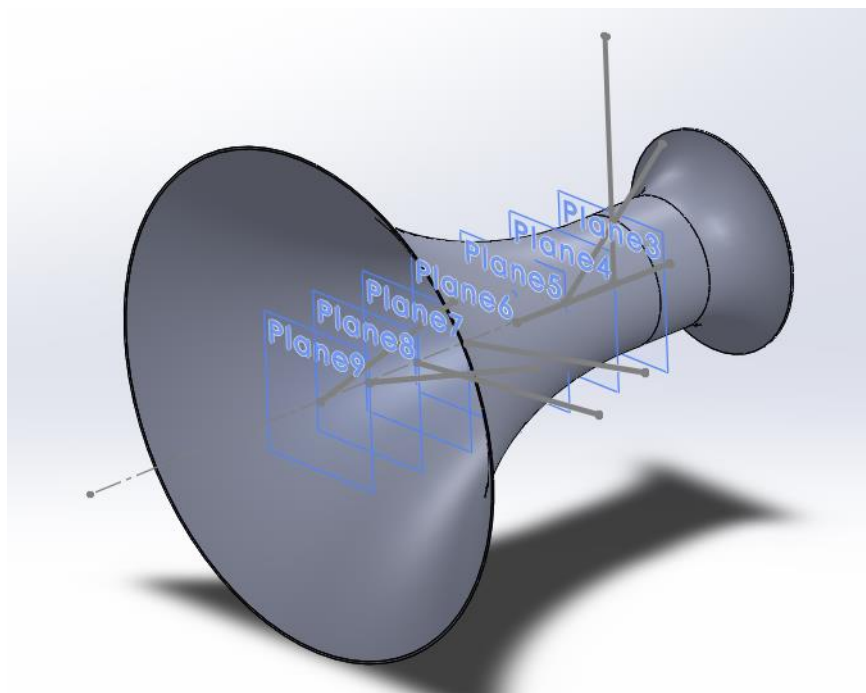


Рисунок 2.3 – Ескізи профілів напрямних лопаток конфузора



Після цих маніпуляцій була створена модель самої напрямної лопатки та розмножена за допомогою інструменту круговий масив. Дана форма лопатки використана для направлення потоку рідини більш перпендикулярно до профілю лопатки робочого колеса та збільшення динамічного тиску, що збільшує ефективність всієї установки.

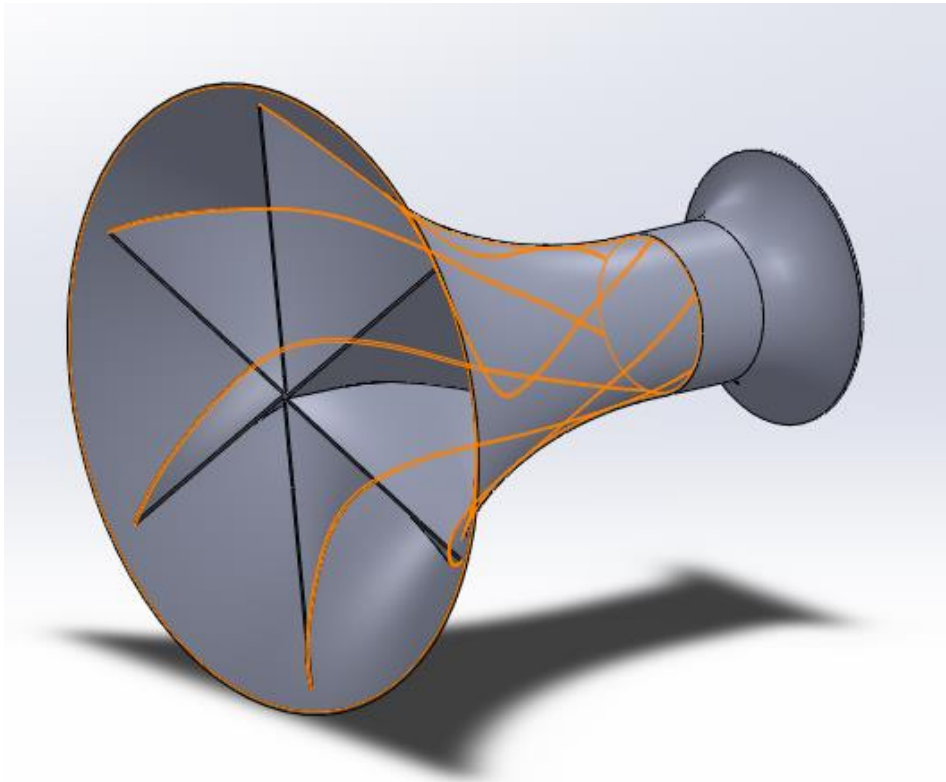


Рисунок 2.4 – Повна 3D модель конфузора з лопатками

Таким самим способом для кращого розуміння ефективності даної конструкції було створено ще декілька моделей з іншою формою лопаток та без них.

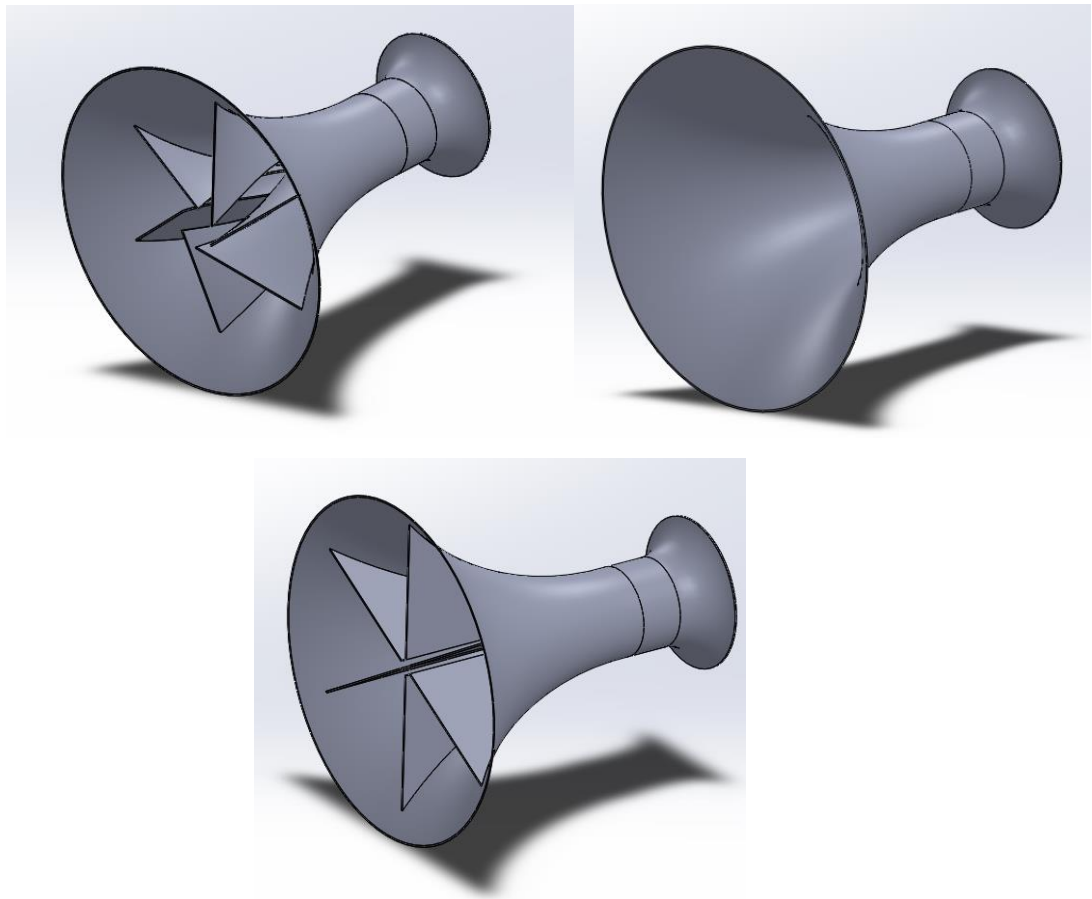


Рисунок 2.5 – 3D моделі різних виконань конфузора

Модель побудову якої було зображено, є основною та найефективнішою з використаних.

### 2.3 Побудова 3D моделі робочого колеса

Робоче колесо (рис. 2.5) являє собою елемент за допомогою якого енергія руху рідини через обертання передається на вал електродвигуна, який і слугує генератором електричного струму. За основу була взята форма робочого колеса турбіни Каплана, але була модифікована під використання у горизонтальному положенні та для роботи з конфузуром.

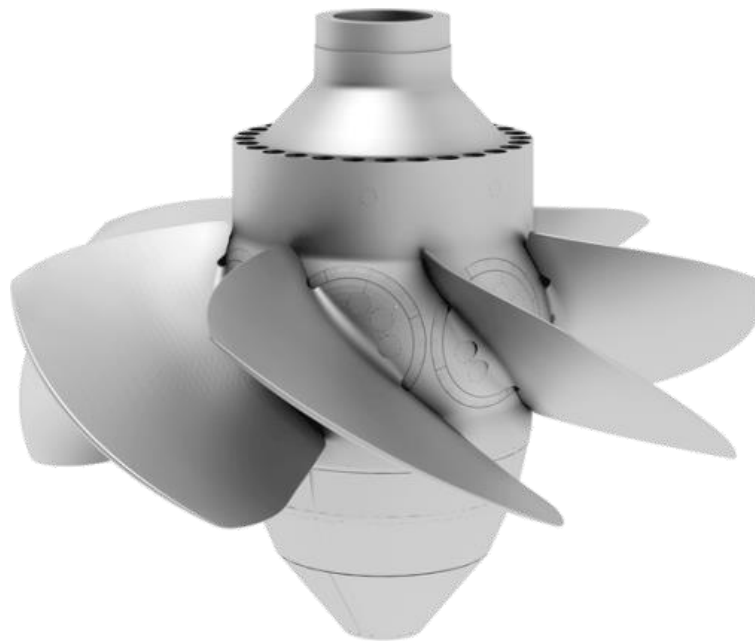


Рисунок 2.6 – Зображення робочого колеса турбіни Каплана

Спочатку було створено ескіз основи робочого колеса та за допомогою інструменту Повернута Бобишка було створено об'ємну модель. Така форма дозволяє знизити зону небажаного високого тиску перед самим робочим колесом.

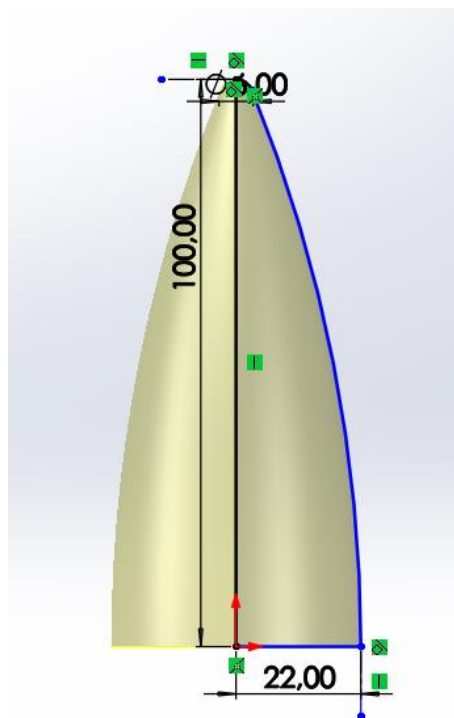


Рисунок 2.7 –Ескіз основи робочого колеса

В подальшому за аналогією з принципом побудови напрямних лопаток конфузору було побудовано 11 площин з інтервалом 10 мм між ними.

На кожній з цих площин був створений профіль лопатки робочого колеса гідрогенератора. Лопатка буде створена з такою товщиною, як і лопатка конфузора. Саме такий профіль лопаток був обраний задля збільшення площі контакту з рідиною, аби захопити більше інерції потоку та підвищити продуктивність.

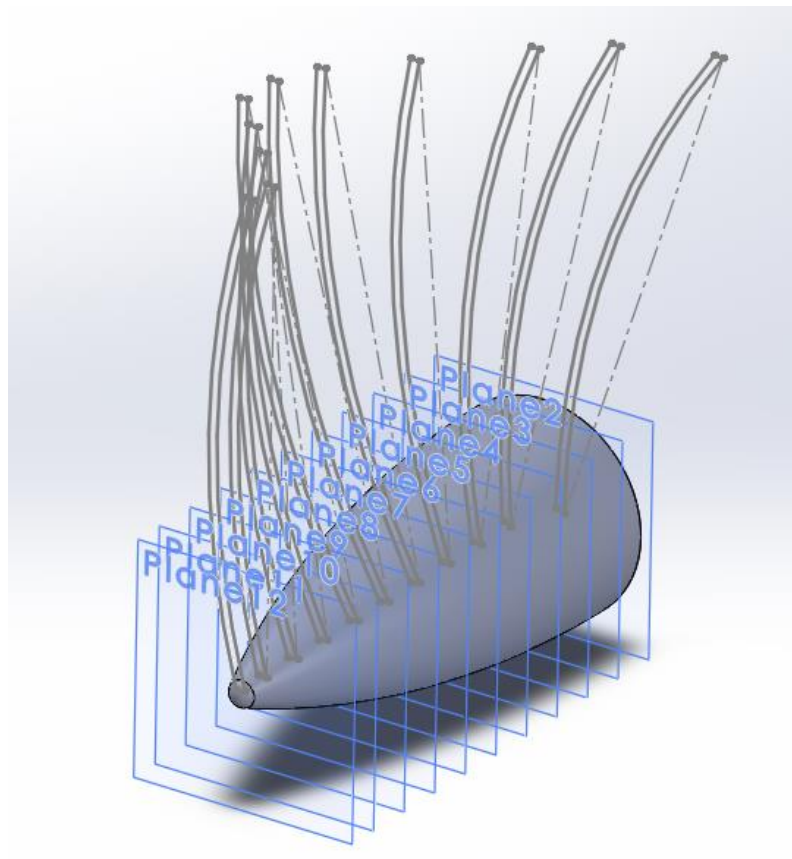


Рисунок 2.8 –Ескізи лопатки робочого колеса

В подальшому інструментом Видавлювання за перерізом було створено саму лопатку та Круговим масивом розмножено їх навколо центральної вісі колеса.

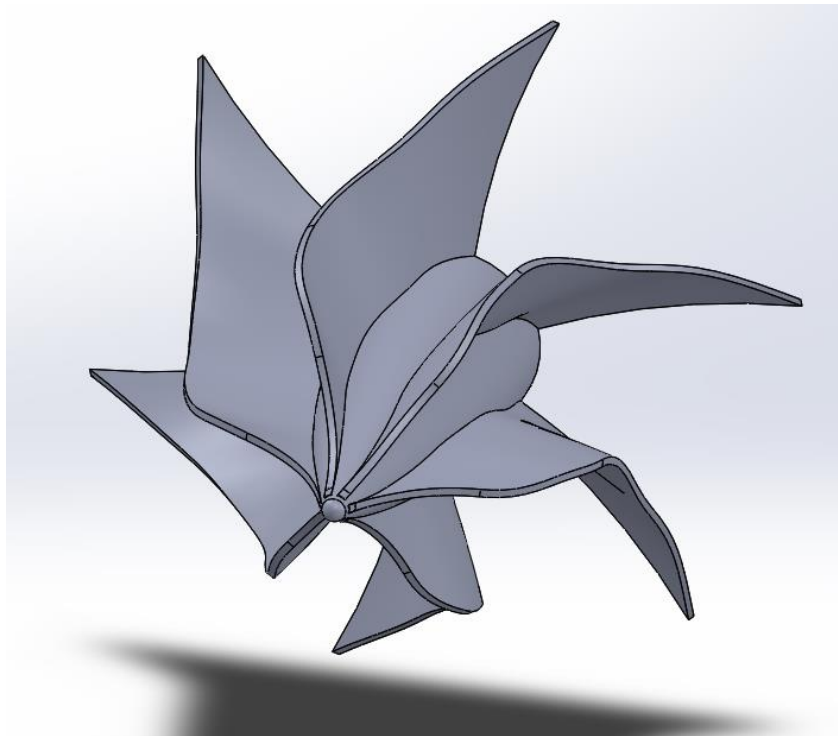


Рисунок 2.9 – Модель робочого колеса

За таким же принципом було спроектовано ще одне робоче колесо для порівняння ефективності їхньої роботи у створюваній конструкції.

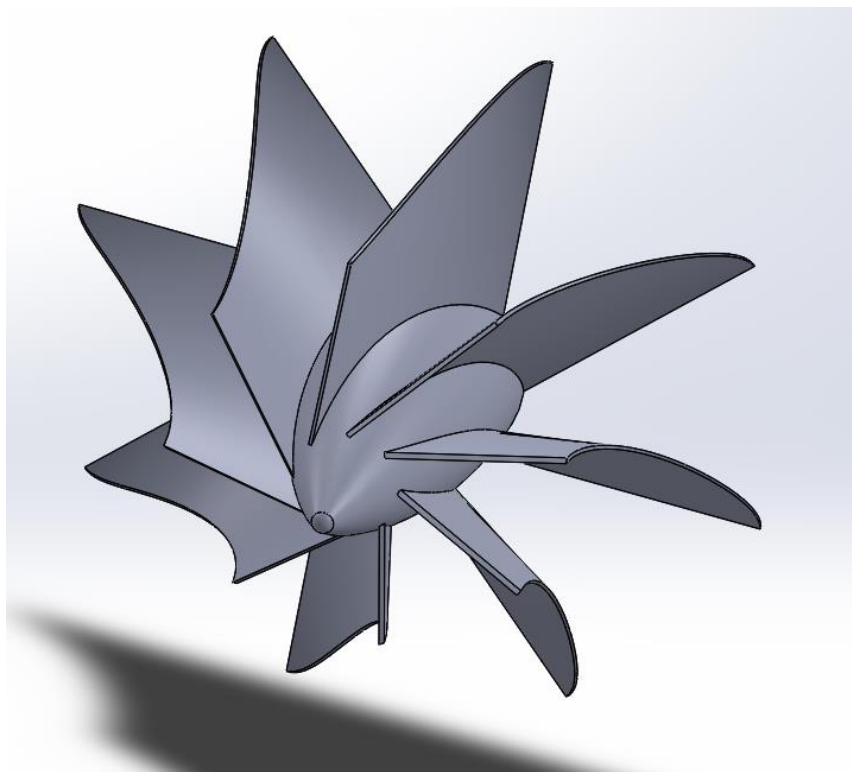


Рисунок 2.10 – Модель робочого колеса

## 2.4 Висновок

У розділі, присвяченому проектуванню конструкції гідрогенератора, виконано низку ключових етапів, спрямованих на створення ефективної і компактної установки для генерації електроенергії.

Було розроблено кілька варіантів робочого колеса та направляючих лопаток, що дозволило провести порівняльний аналіз їх ефективності та визначити оптимальні параметри для забезпечення максимальної продуктивності системи. Основна увага приділялася адаптації конструкції до умов невеликих габаритів, що критично для встановлення у локальних або віддалених місцях з обмеженим простором.

Конфузор із направляючими лопатками, які забезпечують попередню підготовку потоку перед його входом у робоче колесо, продемонстрував високу ефективність у спрямуванні водяного потоку, зменшенні турбулентності та підвищенні коефіцієнта корисної дії системи. Це досягається завдяки оптимальному вибору кута нахилу, форми та кількості направляючих лопаток.

Робоче колесо, яке є ключовим елементом системи, проектувалося з урахуванням різних геометричних параметрів, таких як кількість лопатей, їхня форма та профіль. Було визначено, що найбільш ефективні варіанти колеса забезпечують рівномірне перетворення кінетичної енергії потоку в обертальний момент із мінімальними втратами енергії.

Особливістю конструкції є її малі габарити, що стало одним із головних викликів при проектуванні. Незважаючи на обмежений простір, вдалося досягти високої ефективності системи завдяки раціональному використанню матеріалів та оптимізації розташування компонентів.

Проектування базувалося на використанні сучасних підходів до моделювання гідродинамічних процесів, що дозволило врахувати потенційні втрати енергії та забезпечити високу надійність роботи гідрогенератора в різних умовах. Запропонована конструкція також має потенціал для подальшого

вдосконалення, зокрема шляхом використання новітніх матеріалів або технологій 3D-друку для створення високоточних компонентів.

У підсумку, проведена робота підтвердила можливість створення ефективної гідротурбінної установки невеликої потужності, яка може бути використана для локального енергозабезпечення в умовах обмеженого простору та змінних характеристик водяного потоку. Це відкриває перспективи для подальшого впровадження подібних конструкцій у сферу малої гідроенергетики, сприяючи розвитку екологічно чистих джерел енергії.

### 3. ЧИСЛОВИЙ РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ ГІДРОГЕНЕРАТОРА

#### 3.1 Конструкція та принцип роботи гідрогенеруючої установки

Мікрогідроелектростанція — це невелика електростанція, яка використовує енергію води, наприклад, у річках, іригаційних каналах або природних водоспадах. Її робота базується на використанні потенціальної енергії водного потоку, що має різницю висот від джерела до установки станції. Мікрогідроелектростанція може використовувати реакційні або імпульсні турбіни залежно від доступних джерел енергії. Такі станції є ефективним рішенням для забезпечення електроенергією в місцевостях.[10]

Мікрогідроелектроенергетика є ефективним і надійним джерелом відновлюваної енергії. Це може бути чудовим способом використання відновлюваної енергії малих річок і струмків. Проект мікроГЕС розроблений як річкового типу, оскільки для живлення турбіни потрібно дуже мало резервуарів або зовсім не потрібно. Вода протікає прямо через турбіну і повертається в річку або потік, щоб використовувати її для інших цілей. Це мінімально впливає на місцеву екосистему.[11]

Типова конструкція МГЕС включає кілька основних елементів: трубопровід (напірний водогін), гідротурбіну, генератор. Вода спрямовується до турбіни через водозабір, створюючи необхідний напір завдяки різниці перерізів підводу. Гідротурбіна перетворює кінетичну або потенційну енергію води в механічну, яка обертає генератор, генеруючи електроенергію. Використана вода продовжує рух у природному руслі, що наближує вплив на довкілля до нуля. Продуктивність конструкції залежить від умов потоку: швидкості води та напору.

Особливим різновидом МГЕС є конструкція, що складається з конфузора та турбіни. Конфузор (звужуючий трубопровід) підвищує швидкість потоку води, зменшуючи її статичний тиск за рахунок закону збереження енергії. Високошвидкісний потік подається безпосередньо на лопаті турбіни, яка обертає



вал генератора. Така система є ефективною для використання в місцях з низьким природним напором, де важливо максимізувати кінетичну енергію потоку. Головною перевагою конструкції з конфузором є її компактність і простота, оскільки немає потреби у великій висоті падіння води.

Малі гідроелектростанції (МГЕС) вважаються "однією з найбільш екологічно чистих і економічно ефективних енергетичних технологій для генерації електроенергії". Зазначається, що "місця з великим напором часто віддаються перевагу, оскільки можна використовувати менші турбіни та менший об'єм води". МГЕС мають низку переваг у порівнянні з традиційними джерелами енергопостачання, зокрема високу надійність, високі рівні ефективності, низькі витрати на обслуговування та можливість зберігання енергії (залежно від конструкції). Крім того, малі гідроелектростанції зазвичай мають коротший період будівництва, можливість отримання субсидій на капітальні витрати, не потребують великих територій, характеризуються високим коефіцієнтом використання потужності і вважаються безпечною та безвідходною технологією.[11]

### **3.2 Розрахунок ефективності конструкції в ANSYS CFX**

Ansys CFX є провідним програмним забезпеченням для обчислювальної динаміки рідин (CFD), яке використовується для моделювання турбомашинерії, таких як насоси, турбіни, компресори та вентилятори. Програма відома своєю точністю та надійністю, забезпечуючи високий рівень інтеграції між налаштуваннями проблем, аналізом і представленням результатів. Вона підтримує моделювання турбулентних і ламінарних потоків, багатофазних потоків, теплопередачі, а також розрахунки для субзвукових, трансзвукових і надзвукових режимів. ANSYS CFX включає інтуїтивний інтерфейс і підтримує автоматизацію за допомогою скриптів та високопродуктивних обчислень.[13]

Програма використовує методи кінцевих елементів для дискретизації фізичних рівнянь, що описують потоки, а також включає потужні моделі для

опису турбулентних, стисливих та термодинамічних процесів. ANSYS CFX дозволяє точно моделювати складні потоки з різними умовами, такими як змінні швидкості, температури, тиску та в'язкості, що дає змогу отримувати високоточні результати для різних інженерних застосувань. Ця програма активно використовується у таких галузях, як авіація, автомобільна промисловість, енергетика, нафтовидобуток, хімічна та харчова промисловість.

Програмний пакет ANSYS був використаний для розробки тривимірної, повністю турбулентної моделі стисненого потоку через складну геометрію робочого колеса, наприклад, таких, які використовуються в відцентрових насосах. Це найпоширеніший тип насоса, що застосовується в промисловості та побуті.[14]

Однією з основних переваг ANSYS CFX є його здатність вирішувати комплексні проблеми, пов'язані з турбулентними потоками, включаючи моделювання турбулентних режимів, процесів теплообміну та взаємодії з твердими об'єктами. За допомогою ANSYS CFX можна проводити чисельні експерименти для передбачення поведінки рідин або газів у різних умовах, що дозволяє інженерам оптимізувати конструкції, покращувати ефективність систем і знижувати витрати на фізичні випробування.

Крім того, ANSYS CFX включає інструменти для автоматизації процесу створення сітки, вирішення рівнянь, аналізу результатів та оптимізації моделей, що робить його потужним інструментом для інженерів, які працюють з потоковими процесами та теплообмінними системами.

Для початку розрахунку потрібно підготувати 3D модель. Для цього в програмному комплексі SolidWorks навколо готової конструкції видавлюється тіло, яке слугуватиме розрахунковою областю для програми розрахунку. Така процедура проводиться з усіма моделями перед роботою у самому ANSYS.

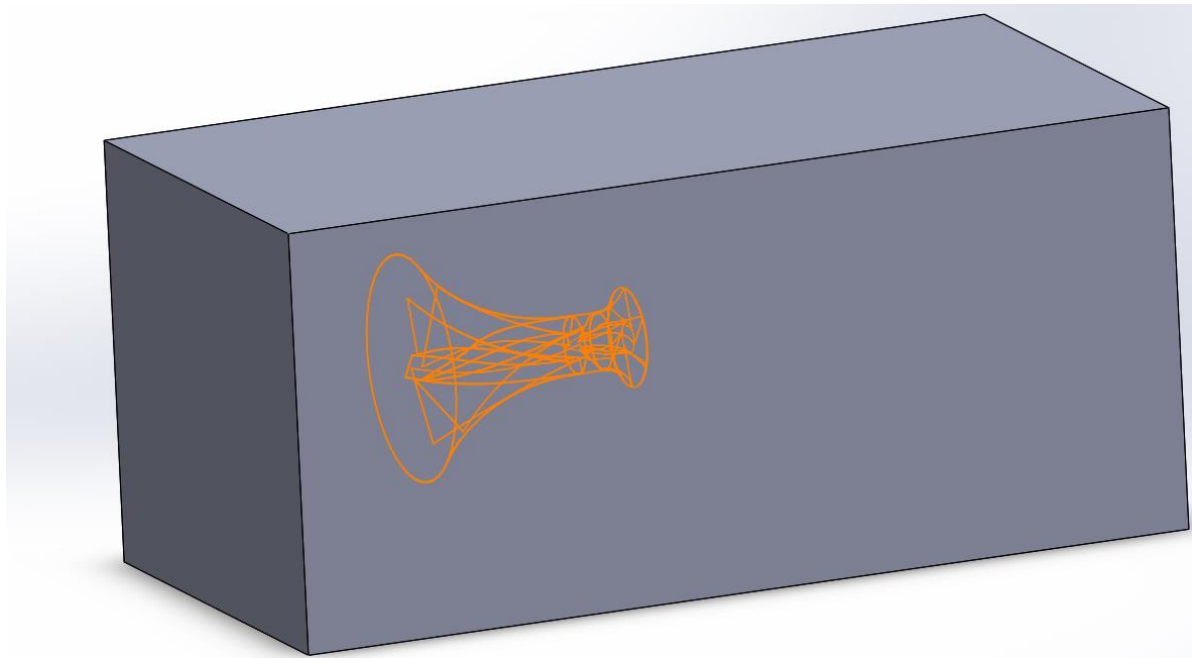


Рисунок 3.1 – Створення розрахункової області

Спочатку для розуміння загальної ефективності та орієнтовних результатів було проведено розрахунок окремо робочого колеса. Всі розрахунки проводилися паралельно із задаванням робочого середовища вода та повітря та порівнювалися для наочності дослідження. Параметри швидкостей потоку були взяті із відкритих джерел. Для води: річка Псел - 0,55 м/с. Для повітря: середня швидкість вітрів у Сумській області в осінню пору на основі аналізу ресурсів прогнозу погоди - 4,2 м/с.

Після підготовки моделі створюється розрахункова сітка. При розрахунках була використана тетраедна сітка, яка забезпечить вищу точність результатів. Також при кожному розрахунку було використано функцію Inflation, яка дозволяє ущільнювати пристінкові слої.

Функція Inflation в ANSYS Fluent дозволяє створювати шари елементів і комірок особливим чином, що часто можливо лише на їхніх межах. Шар із розширенням можна створити, захоплюючи нормальний градієнт поблизу бар'єрів без зсуву. Для цього можуть використовуватися лише тонкі елементи та невелика їхня кількість.

Основна мета функції Inflation — забезпечити правильну дискретизацію області граничного шару, яка залежить від безрозмірного параметра  $y$ , що вказує відстань першого вузла сітки від стінки. Зазвичай  $y$  налаштовується відповідно до моделі турбулентності. Крім того, Inflation дозволяє створити детальну сітку поблизу стінки, зберігаючи менш деталізовану сітку у віддалених частинах області, що знижує загальну кількість елементів і обчислювальні витрати.

Функція Inflation працює шляхом додавання інфляційних шарів сітки — тонких елементів, товщина яких поступово збільшується від поверхні. Цей процес налаштовується через кілька ключових параметрів, таких як кількість шарів, коефіцієнт їх росту, максимальна загальна товщина та початкова товщина першого шару. Це дозволяє оптимізувати сітку для ефективного моделювання граничного шару.

Inflation широко застосовується в аеродинамічних і гідродинамічних задачах, наприклад, для моделювання обтікання лопаток турбомашин, крил літаків або корпусів суден. Також функція використовується в задачах теплообміну, де важливо точно врахувати тепловий потік поблизу стінок, і в задачах з високими градієнтами швидкості чи тиску, таких як сопла, дифузори та закручені потоки.

Основні переваги Inflation включають високу точність моделювання у критичних зонах, оптимізацію сітки для ефективного використання обчислювальних ресурсів і підвищення якості розрахунків турбулентних і теплових ефектів. Водночас функція має певні обмеження: вона може значно збільшити кількість елементів у великих моделях і потребує ретельного налаштування для досягнення бажаних значень та стабільності розрахунків. Загалом, Inflation є ключовим інструментом у створенні високоякісної сітки для точного моделювання потоків у задачах з турбулентністю та теплообміном.

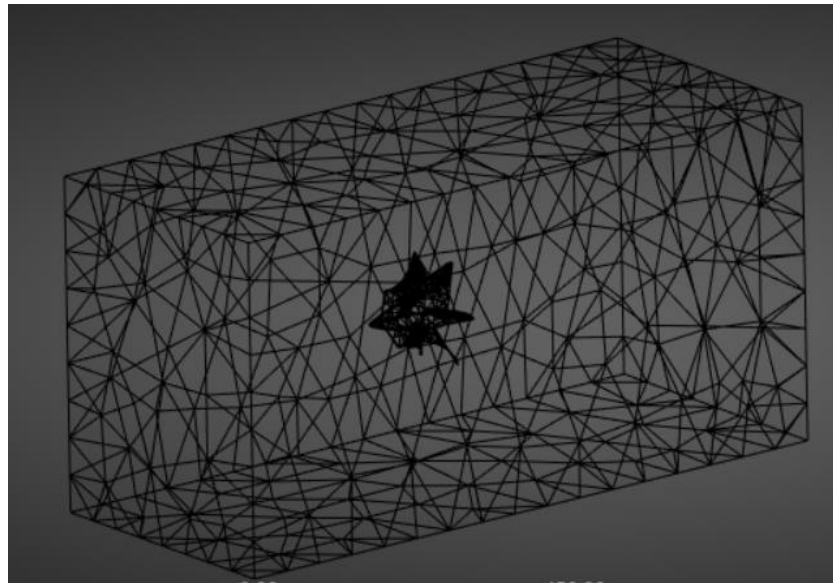


Рисунок 3.2 – Розрахункова сітка робочого колеса гідрогенератора

Після отримання сітки задаються граничні умови. Так як основним середовищем є вода, то умови потоку задаються саме для неї. Швидкість потоку – 0,55 м/с та тиск 1,2 атм. Для подальшого розрахунку була використана SST (Shear Stress Transport) модель, яка найбільш доречно описує задані умови.

**Shear Stress Transport (SST) модель** у ANSYS CFX є популярною моделлю турбулентності, яка використовується для чисельного розрахунку потоків рідин і газів, особливо в задачах з обтіканням поверхонь, турбомашинами та аеродинамікою. Ця модель об'єднує переваги двох класичних моделей турбулентності:  $k-\omega$  і  $k-\epsilon$ , що дозволяє досягати високої точності розрахунків як поблизу стінок, так і в зонах далекого потоку.

Модель Shear Stress Transport (SST), доступна в ANSYS CFX, об'єднує переваги моделей турбулентності  $k-\epsilon$  та  $k-\omega$ . Вона використовується для точного прогнозування розділення потоку за умов сильних градієнтів тиску. Особливістю SST є функція змішування, що активує модель  $k-\omega$  у прилеглих до стінки зонах і переходить до  $k-\epsilon$  в основному потоці. Це дозволяє враховувати перенесення напружень зсуву для підвищення точності моделювання різноманітних потоків.[14]

Особливістю SST є її здатність точно враховувати ефекти зсувного напруження у турбулентних потоках, що робить її ідеальною для аналізу потоків з сильною анізотропією. Крім того, ця модель враховує кривизну потоку і локальні градієнти тиску, що дозволяє більш точно розраховувати відриви потоку або зони рециркуляції.

Подібний аналіз зазвичай проводиться в CFD та Ansys Fluent. Основна увага зосереджена на порівнянні результатів, отриманих за допомогою моделі турбулентності K-Epsilon (CFX) та моделі турбулентності K-Omega SST (Ansys Fluent). Аналіз може виконуватися теоретично або обчислювально, враховуючи певні основні рівняння для різних типів моделей турбулентності. Рівняння загальної енергії, яке включає рівняння збереження маси, рівняння збереження імпульсу та рівняння збереження енергії, вирішується внутрішньо для отримання результатів у будь-якому завданні, пов'язаному з динамікою рідин.[16]

У задачах ANSYS CFX SST модель часто використовується для моделювання турбомашин, крил, обтікання автомобілів, дифузорів, а також для теплообміну в складних геометріях. Вона вимагає хорошої роздільної здатності сітки в граничному шарі, а значення  $y^+$  має бути близьким до одиниці для першого шару елементів сітки. Це забезпечує коректне відображення турбулентного потоку у в'язкому підшарі.

Переваги SST моделі включають високу точність у прогнозуванні розподілу швидкості, тиску та тепла, здатність моделювати складні потоки з відривами та її універсальність для широкого спектра задач. Основним недоліком є вимоги до сітки та більша обчислювальна складність порівняно з простішими моделями турбулентності. У цілому, SST модель у ANSYS CFX є надійним інструментом для складних інженерних задач, що вимагають високої точності і детального опису турбулентного потоку.

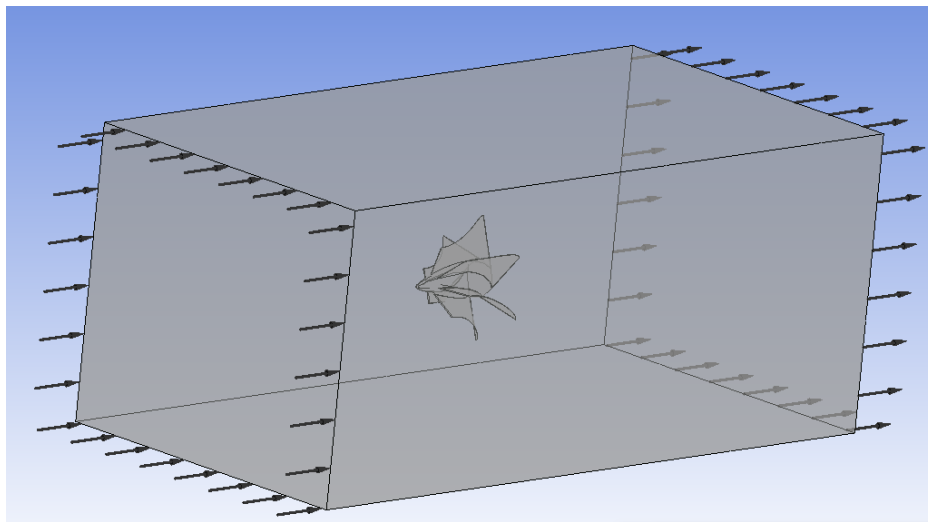


Рисунок 3.4 – Граничні умови робочого колеса гідрогенератора

Надалі проводиться сам розрахунок і отримано результати числового розрахунку робочого колеса. Фактично головним параметром всього розрахунку є значення крутного моменту який діє на робоче колесо. За допомогою цього числа можливо підібрати електрогенератор який даватиме затребувану кількість енергії. Тож саме колесо без допоміжних пристроїв отримало крутний момент у  $0,10 \text{ Н/м}$ , зі збільшенням швидкості до  $0,75 \text{ м/с}$ .

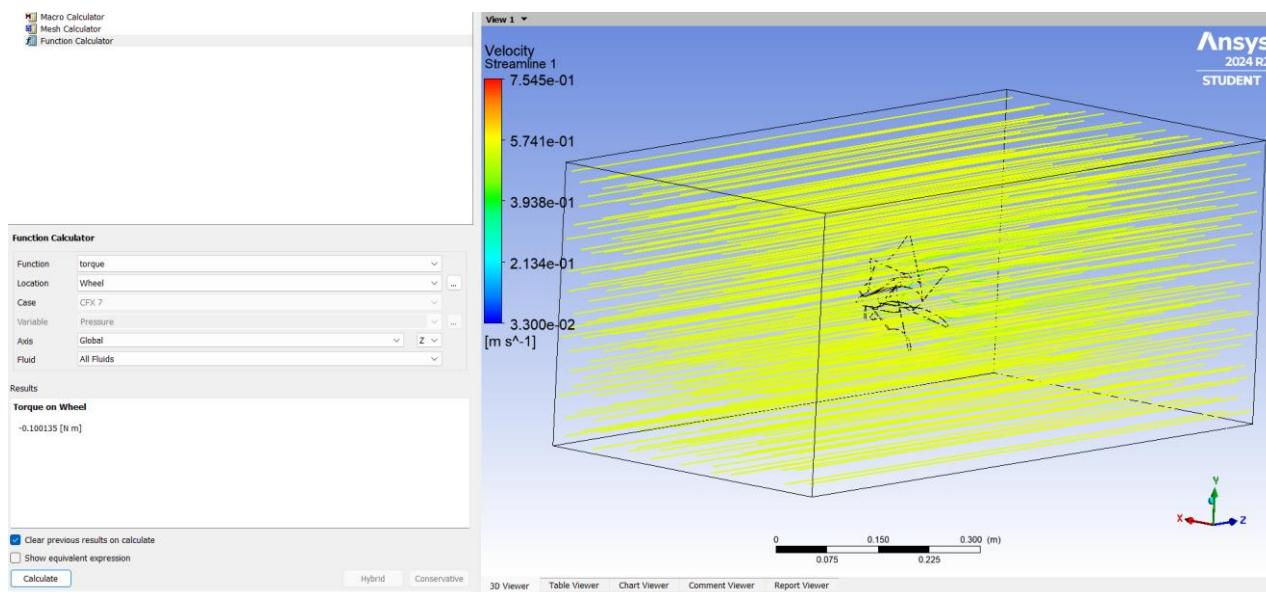
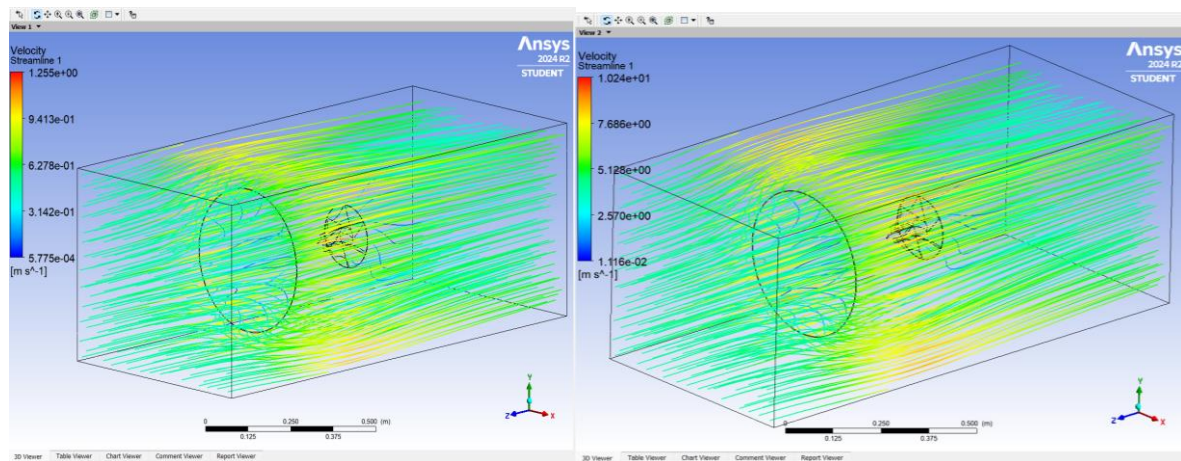


Рисунок 3.5 – Результати розрахунку робочого колеса гідрогенератора

### 3.3 Отримання результатів та їх порівняння

Після попередніх розрахунків, проведено ще ряд числових експериментів з різними варіантами конфузорів та отримано результати швидкості, тиску потоку та крутному моменту на колесі. Проведені були для двох середовищ, для визначення місця установки генератора. За отриманими результатами дана конструкція в середньому у 10 разів ефективніша у воді ніж у повітрі.

Спочатку було проведено розрахунок конфузора без лопаток і отримано результат крутного моменту в  $0,091 \text{ Н/м}$  у воді та  $0,007 \text{ Н/м}$  у повітрі. За отриманими значеннями можна визначити, що без напрямних лопаток конфузора значення майже не відрзняються і така конструкція не має сенсу у використанні.



а)

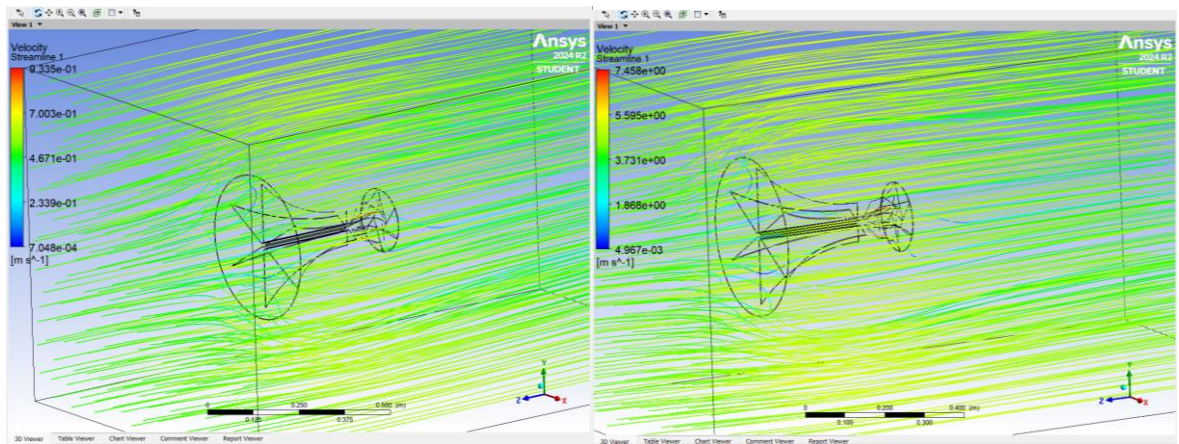
б)

Рисунок 3.5 – Результати розрахунку гідрогенератора без лопаток а) в воді; б) в повітрі

В подальшому було проведено розрахунок конструкції конфузора з прями напрямними лопатками, розділяючими потік річки на частини. В результаті було отримано значення крутного моменту в  $0,047 \text{ Н/м}$  у воді та  $0,004 \text{ Н/м}$  у повітрі. За результатами ця конструкція є гіршою за попередню через додаткове тертя, яке виникає на лопатках, але ніяк не прискорює потік та не підвищує тиск, тому



в порівнянні з даною конструкцією доцільно використовувати саме робоче колесо без конфузору.

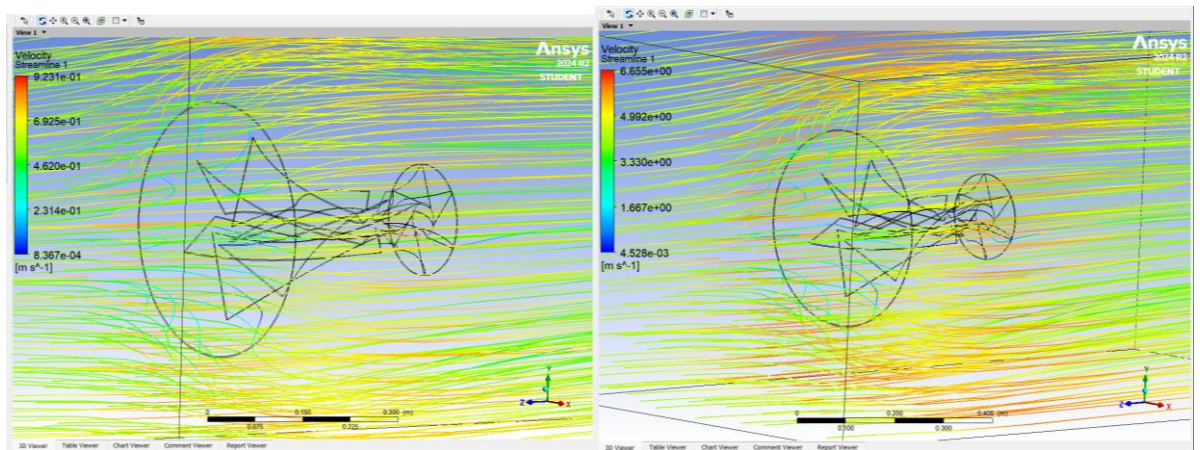


а)

б)

Рисунок 3.5 – Результати розрахунку гідрогенератора з прямими лопатками а) в воді; б) в повітрі

Після було проведено числове моделювання потоку з конфузуром та винтоподібними лопатками, які направляли потік перпендикулярніше до профілю лопатки. Отримані результати – це 0,087 Н/м у воді та 0,006 Н/м у повітрі. Дана розроблена конструкція теж не принесла потрібного приросту крутного моменту, хоча є ефективнішою за попередню. Серед трьох проаналізованих конструкцій жодна не принесла потрібного результату.



а)

б)

Рисунок 3.6 – Результати розрахунку гідрогенератора з винтоподібними лопатками а) в воді; б) в повітрі

Після отримання результатів та їхнього аналізу було зроблено висновок, що найефективніше використати саме робоче колесо, але його крутного моменту не вистачить для генерації електроенергії, тому конструкція конфузору та робочого колеса були доопрацьовані. Було змінено профіль напрямних лопаток, для направлення потоку більш перпендикулярно до лопатки робочого колеса. Воно теж було доопрацьовано. Профіль був спроектований для вловлювання більшої кількості енергії потоку, що йде від лопаток та збільшення площі контакту з рідиною.

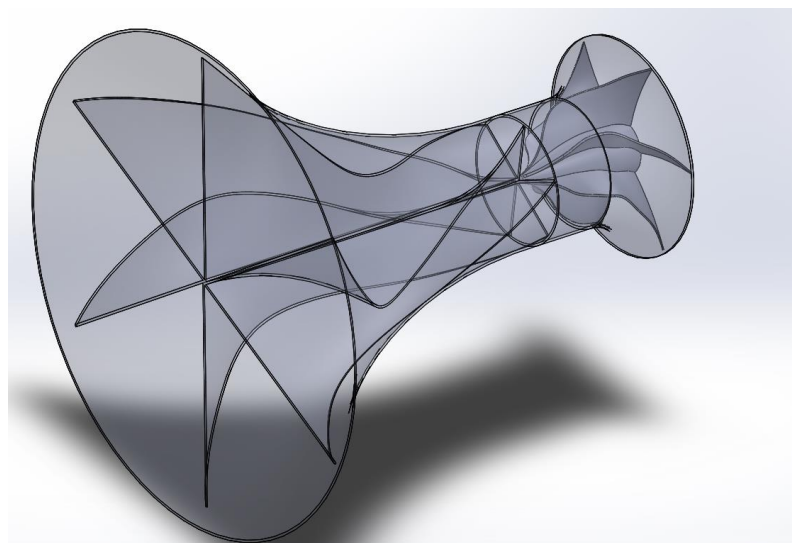


Рисунок 3.7 – Модель вдосконаленої конструкції гідрогенератора

Також для підвищення точності результатів була доопрацьована розрахункова сітка. Створено додаткове тіло у розрахунковій області навколо конструкції для кращої роботи інструменту Inflation та швидшого розв'язку задачі.

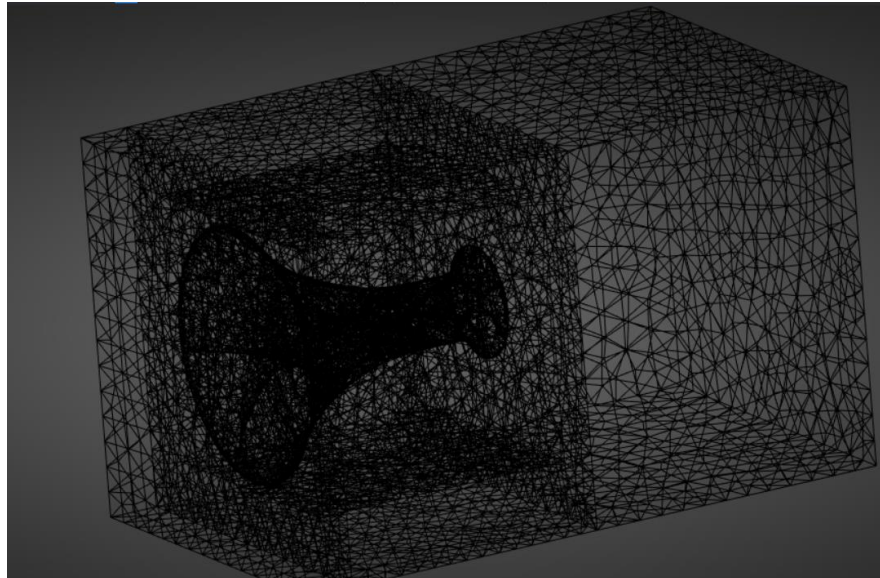
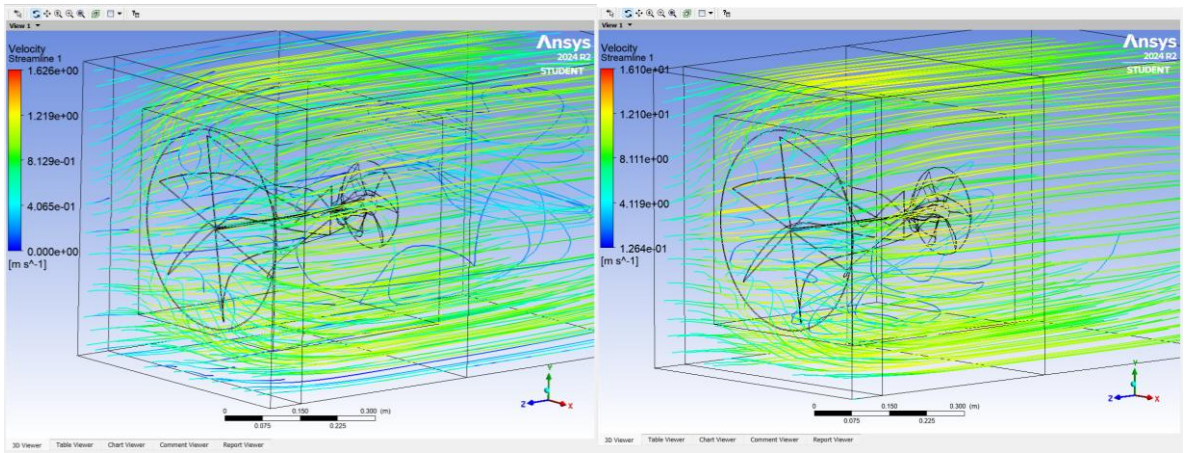


Рисунок 3.7 – Вдосконалена сітка розрахункової області

Для розрахунку використовувалася також модель SST та задавалися такі ж параметри, як і в попередніх експериментах. Згідно з отриманими даними покращення дало позитивний результат і нова конструкція є ефективнішою за попередні. Значення крутного моменту складають 0,42 Н/м у воді та 0,05 Н/м у повітрі. Тобто дана конструкція є майже у чотири рази ефективніше за найбільше попереднє значення.



а)

б)

Рисунок 3.6 – Результати розрахунку нової конструкції гідрогенератора а) в воді; б) в повітрі

### 3.4 Висновок

У розділі, присвяченому аналізу результатів чисельного моделювання конструкцій у програмному середовищі ANSYS CFX, було виконано детальне дослідження ефективності різних варіантів конструкцій гідрогенератора. Зокрема, оцінювалися робочі колеса з різними характеристиками напрямку потоку щодо профілю лопаток, а також три варіанти конструкцій із конфузором: без напрямних лопаток, із прямими напрямними лопатками та з винтоподібними лопатками.

Результати моделювання показали, що найбільш продуктивною є конструкція, в якій потік води максимально перпендикулярний до профілю лопаток робочого колеса. Такий напрямок потоку забезпечує найбільшу ефективність перетворення кінетичної енергії води в обертальний момент. Це підтверджує важливість оптимального проектування напрямних лопаток, які формують потік перед входом у робоче колесо.

Перший етап моделювання виявив, що конструкція без лопаток і з прямими напрямними лопатками має недостатній коефіцієнт корисної дії через нерівномірність розподілу швидкостей у потоці та значні енергетичні втрати. Навпаки, використання винтоподібних лопаток забезпечило краще формування потоку, хоча результати залишалися далекими від бажаних. Це вказало на необхідність удосконалення конструкції для зменшення втрат і підвищення продуктивності.

Після аналізу перших результатів конструкція була перероблена з урахуванням отриманих даних. Внесені зміни дозволили значно покращити ефективність системи, досягнувши обертального моменту в 0,42 Н·м. Цей результат є задовільним для встановлення потужності 100 Вт і підтверджує правильність обраного підходу до проектування та чисельного аналізу.

Таким чином, проведена робота продемонструвала значення моделювання для оптимізації гідрогенераторів і підтвердила, що використання програмних комплексів на етапі проектування дозволяє ефективно визначати слабкі місця

конструкції та вносити необхідні корективи для досягнення максимальних експлуатаційних характеристик. Отримані результати створюють надійну основу для подальших досліджень і впровадження подібних систем у практику малої гідроенергетики.

## 4. РОЗРАХУНОК КОНСТРУКЦІЇ В ANSYS FLUENT. ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РІЗНИХ ВИРІШУВАЧІВ

### 4.1 Огляд вирішувача Ansys Fluent. Області застосування.

#### Порівняння з Ansys CFX

ANSYS Fluent — це сучасний програмний продукт для моделювання обчислювальної гідродинаміки (CFD). Він входить до складу пакета ANSYS і є одним із найбільш потужних інструментів для аналізу течій рідини та газу. Ця програма дозволяє вирішувати широкий спектр завдань: від моделювання простих ламінарних потоків до складних багатофазних процесів, включаючи турбулентність, теплоперенос, хімічні реакції та взаємодію між різними фазами. Fluent є важливим інструментом у багатьох галузях, зокрема в енергетиці, авіаційній та автомобільній промисловості, хімічному машинобудуванні, біомедицині та інших секторах, де потрібне точне моделювання потоків [17].

ANSYS Fluent забезпечує розрахунок складних течій завдяки числовим методам, які реалізують системи рівнянь Нав'є–Стокса. Ці рівняння описують основні закони збереження маси, імпульсу та енергії для потоку рідини чи газу. Fluent особливо оптимізований для завдань з високими вимогами до точності, таких як аналіз турбулентних потоків, нестационарних явищ і складних геометрій. Програма підтримує як стаціонарний, так і нестационарний аналіз, що робить її універсальним інструментом для моделювання [18].

Основні області застосування ANSYS Fluent:

- Турбулентні потоки: Завдяки широкому вибору моделей турбулентності (к-ε, к-ω, SST) програма дозволяє проводити точний аналіз турбулентних явищ, таких як завихрення та перехідні режими.
- Теплоперенос: Fluent ефективно моделює охолодження, нагрівання та процеси теплової конвекції, що є критично важливими для багатьох галузей.

- Аеродинаміка: Програма дозволяє оцінювати підйомну силу, аеродинамічний опір і ефективність різних конструкцій.
- Хімічні реакції: Fluent здатний моделювати складні хімічні процеси, включаючи горіння та реакції в хімічних реакторах.
- Багатофазні потоки: Програма забезпечує аналіз взаємодії між рідинами й газами, а також фазових переходів, таких як випаровування або конденсація [19].

ANSYS Fluent базується на числових методах, серед яких:

- Метод кінцевих об'ємів (FVM): Основний підхід для дискретизації рівнянь потоку, що забезпечує баланс маси, імпульсу й енергії в кожному контрольному об'ємі.
- Адаптивні сітки: Fluent дозволяє використовувати адаптивні обчислювальні сітки, що підвищує точність у критичних зонах потоку.
- Методи апроксимації: Програма надає можливість вибору між схемами першого та другого порядку, що дозволяє налаштовувати баланс між швидкістю розрахунків і їхньою точністю.
- Різні моделі турбулентності: Fluent пропонує моделі для ламінарних, перехідних і турбулентних потоків, що забезпечує гнучкість у виборі методів для різних типів задач [17].

Порівняння Fluent і ANSYS CFX: Хоча обидва інструменти призначені для CFD-розрахунків, вони мають різну спеціалізацію. Fluent краще підходить для задач зі складними геометріями, неструктурованими сітками й багатофазними потоками. CFX, зі свого боку, орієнтований на високопродуктивні задачі в турбомашинах, де потрібна висока точність і ефективність при розрахунках на структурованих сітках. Крім того, Fluent має більший вибір моделей турбулентності, тоді як CFX спеціалізується на інтеграції специфічних моделей для аналізу турбомашин [18].

ANSYS Fluent — це потужний та універсальний інструмент для моделювання потоків у різних середовищах. Завдяки гнучкості в налаштуваннях,



підтримці складних фізичних моделей і високій точності розрахунків, цей програмний пакет є незамінним для інженерів і дослідників у сфері обчислювальної гідродинаміки [19].

#### 4.2 Проведення чисельного експерименту в Ansys Fluent

Числовий експеримент був виконаний з використання однакової геометрії разом з CFX та схожої обчислювальної сітки. Проведення розрахунків додатково в Fluent разом з CFX дає змогу впевнитися в правдивості отриманих результатів.

Для розрахунку була використана така ж геометрія, як і для Ansys CFX за винятком того, що було додано ще одне циліндричне тіло для позначення обертання робочого колеса генератора.

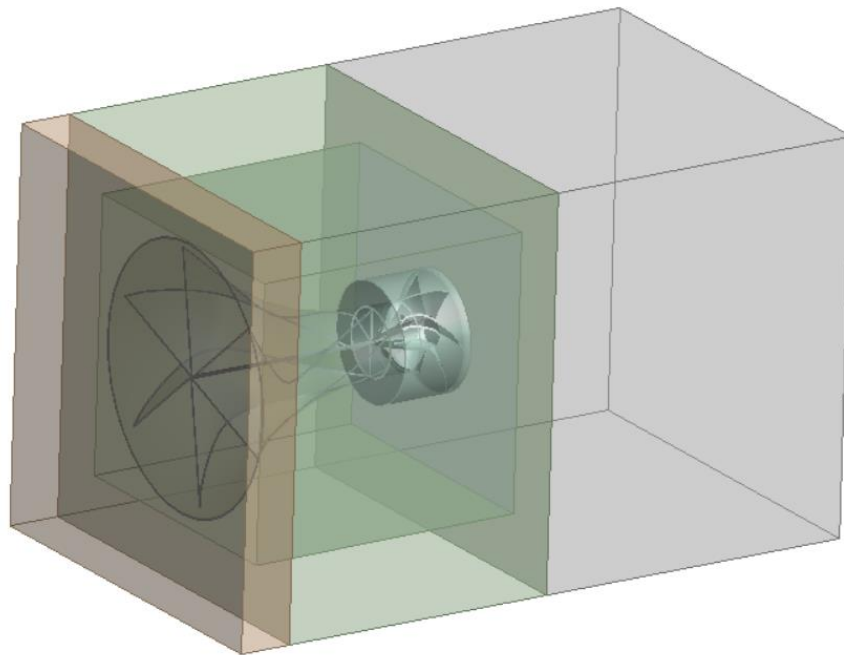


Рисунок 4.1 – Зображення геометрії розрахунку для Ansys Fluent

Далі була побудована сітка, максимально наближена до вже використовуваної обчислювальної сітки раніше з додаванням інструменту Inflation для обертового тіла та створення інтерфейсів контакту роторної частини конструкції зі статором. Параметри обчислювальної сітки були задані таким

чином, що елементи загального об'єму розрахункової області мали розмір 50мм, тіла навколо конструкції 20мм та спроектованої геометрії 10мм. Такі значення зумовлені обмеженнями студентської версії програмного забезпечення Ansys Fluent на роботу не більше, ніж 1048000 елементів. Згущення пристінкових слоїв було застосовано, в першу чергу, до поверхні робочого колеса, далі до поверхні конфузора та направляючих лопаток. Зовнішня частина конструкції та розрахункової області відіграють не значну роль в результатах розрахунків

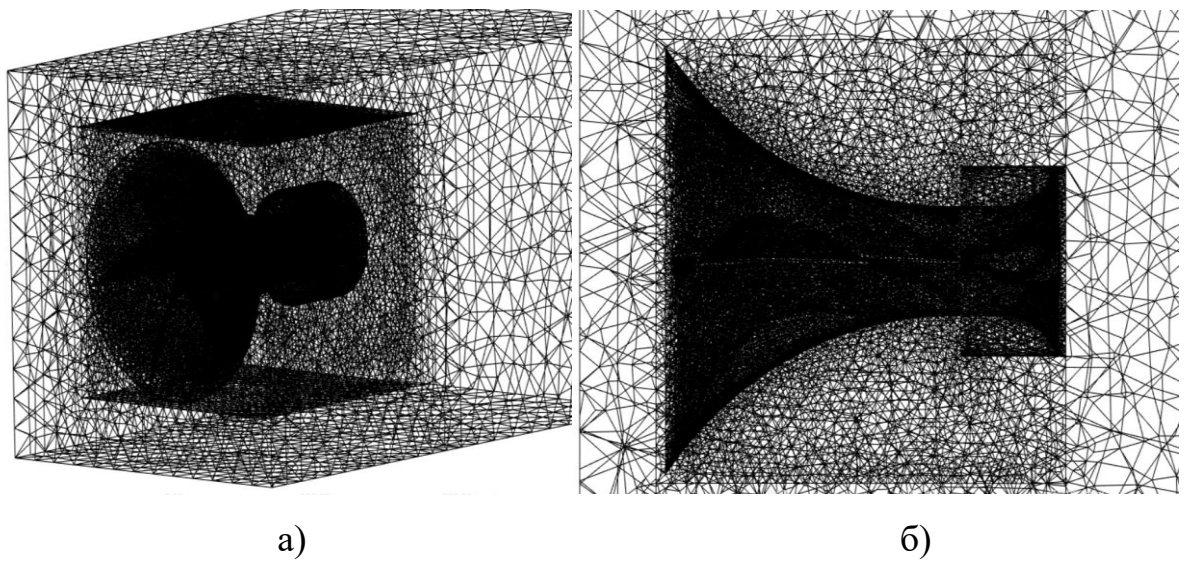


Рисунок 4.2 – Розрахункова сітка а) повна модель проточної частини, б) модель в розрізі

В ANSYS Fluent передбачено кілька методів вирішення задач обчислювальної гідродинаміки (CFD), кожен із яких оптимізований для певних типів задач і умов моделювання. До основних методів належать SIMPLE, SIMPLEC, Coupled, PISO та інші, кожен із яких має свої особливості.

Метод SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) є одним із найпоширеніших підходів у Fluent. Він використовується для розв'язання рівнянь Нав–Стокса, дозволяючи ефективно моделювати потоки рідин і газів. SIMPLE забезпечує точний зв'язок між тиском і швидкістю, що робить його придатним для стаціонарних задач із помірними вимогами до збіжності.

Модифікований метод SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) відрізняється покращеною збіжністю і використовується в задачах, де швидкість взаємодії між швидкістю і тиском менша, ніж у стандартному SIMPLE.

Coupled Solver є потужним методом для задач із високими вимогами до швидкості розрахунків і стабільності. Цей метод інтегрує рівняння для тиску і швидкості в одному розрахунковому процесі, що значно підвищує його ефективність. Coupled Solver рекомендується для високошвидкісних потоків, нестационарних явищ та задач зі складними взаємозалежностями.

Метод PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) є ідеальним для нестационарних потоків. Завдяки своїй багатокроковій структурі він забезпечує високу точність для динамічних процесів і дозволяє працювати з великими часовими кроками, зберігаючи стабільність обчислень.

Для задач із високими швидкостями, включаючи надзвукові і гіперзвукові потоки, використовується Density-Based Solver, який враховує зміну густини та дозволяє розраховувати компресійні ефекти. Цей метод є критично важливим для аналізу потоків у турбомашинах, компресорах і двигунах.

Крім того, ANSYS Fluent підтримує специфічні методи для багатофазних потоків, такі як VOF (Volume of Fluid), який дозволяє моделювати взаємодію між різними фазами, наприклад, вода і газ. Також програмне забезпечення включає як явні (explicit), так і неявні (implicit) схеми вирішення. Явні методи забезпечують швидкі розрахунки для простих задач, тоді як неявні гарантують стабільність і точність при великих часових кроках.

Вибір оптимального методу залежить від особливостей задачі, таких як складність геометрії, режим потоку (ламінарний чи турбулентний), компресійність і необхідна точність. Наприклад, для стаціонарного потоку з низькими швидкостями підходять SIMPLE або SIMPLEC, а для складних аеродинамічних задач із високими швидкостями краще використовувати Coupled Solver або Density-Based Solver.

ANSYS Fluent забезпечує гнучкість у налаштуваннях і широкий вибір числових методів, що робить його ефективним інструментом для моделювання потоків у різних середовищах та умовах.

В подальшому були задані граничні умови. Потік рідини в подібному середовищі є турбулентним, тому використання змішаної моделі турбулентності  $k$ - $\omega$ -SST є доцільним.

Моделювання турбулентності SST  $k$ - $\omega$  (Shear Stress Transport) була розроблена для покращення точності моделювання турбулентних потоків у зонах високих градієнтів і біля стінок. Ця модель об'єднує переваги моделей  $k$ - $\omega$  та  $k$ - $\epsilon$ , забезпечуючи точність у пристінних зонах і стабільність у зовнішніх областях.

Основними характеристиками моделі SST  $k$ - $\omega$  є комбінація моделей  $k$ - $\omega$  та  $k$ - $\epsilon$ : У пристінкових зонах застосовується модель  $k$ - $\omega$ , яка добре описує ефекти турбулентності, викликані в'язкістю. У зовнішніх областях модель автоматично переходить до  $k$ - $\epsilon$ , щоб зменшити чутливість до граничних умов та покращити стабільність обчислень. Обмеження турбулентної в'язкості: Це дозволяє уникнути переоцінки турбулентного перемішування в областях з потужними градієнтами, таких як вільні зони потоку або області завихрень. [19]

Адаптивність до складних потоків: Завдяки функції згладжування між двома базовими моделями, SST  $k$ - $\omega$  є універсальною для застосувань із різними геометріями та режимами потоків. Ця модель часто використовується в турбомашинах, аеродинаміці, теплообміні й інших задачах, які вимагають точного обліку пристінних ефектів. [15]

Середовищем є вода зі швидкістю потоку на вході 0,55 м/с. Метод розрахунку був визначений SIMPLE, який вже описаний вище.

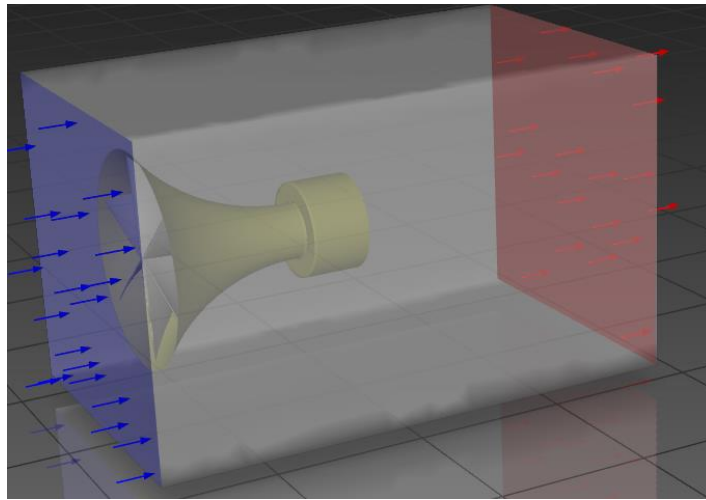


Рисунок 4.3 – Задання граничних умов

Після проведення розрахунку було отримано візуальне зображення руху рідини та закручень, а також визначений найголовніший параметр, який був розрахований, є крутний момент, діючий на робоче колесо.

Його значення дорівнює 0,46 Н/м. Дана змінна є важливою для підбору електродвигуна, який слугуватиме генератором електричної енергії.

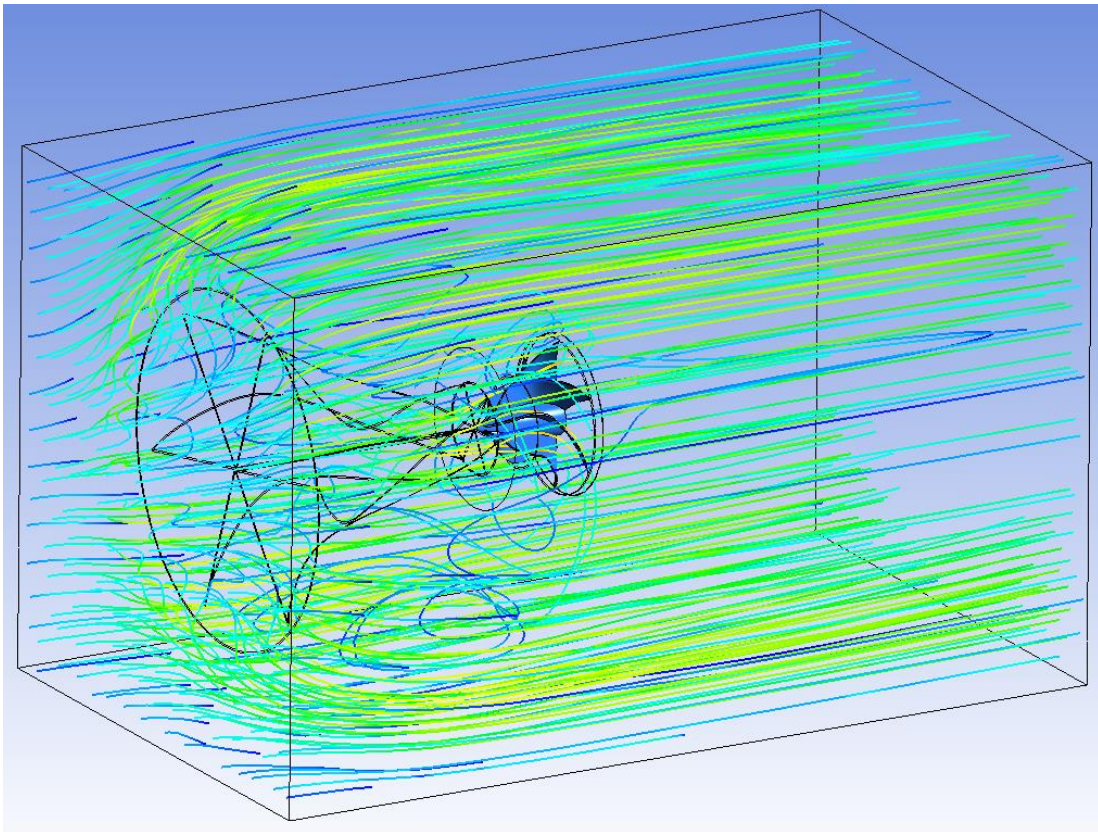
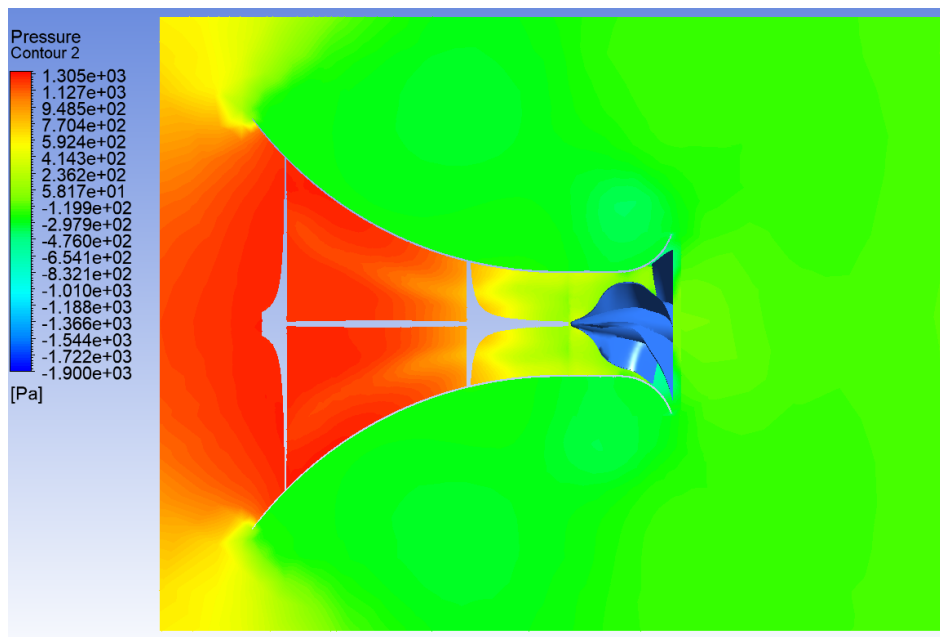


Рисунок 4.4 – Результат розрахунку руху потоку води

Також отримано значення розподілу швидкості та тиску в потоці. Значення швидкості потоку коливаються від мінімального 0,20 м/с до максимального 2 м/с, як зображено на рисунку 4.5 а). Розподіл тиску зображений на рисунку 4.5 б).



a)

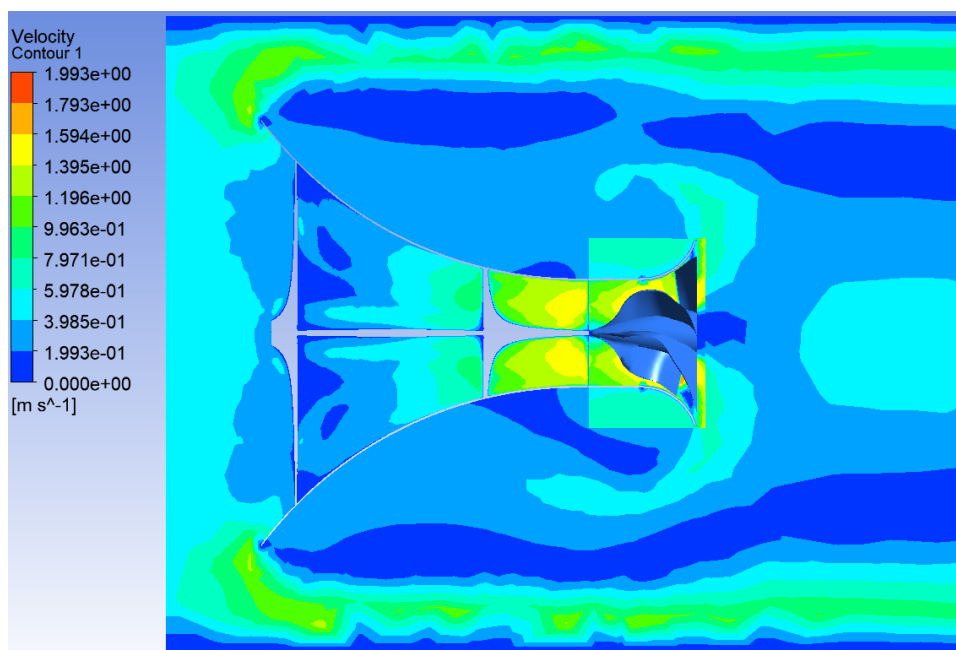


Рисунок 4.5 – а) Розподіл тиску в гідрогенераторі б) Розподіл швидкості в гідрогенераторі

### 4.3 Порівняння результатів розрахунків вирішувачів Ansys CFX та ANSYS Fluent

Ansys CFX та Ansys Fluent є різного роду вирішувачі, хоча і використовуються для розв'язання задач у однакових середовищах. CFX розроблений для проведення розрахунків відцентрових машин та подібних агрегатів, зокрема насосів. В свою чергу, Fluent є універсальним засобом розв'язку доволі широкого спектру інженерних задач зв'язаним з потоками рідин або газів. За результатами проведених числових експериментів було отримано значення крутного моменту в CFX та Fluent, які дорівнюють 0,42 Н/м та 0,46 Н/м відповідно.

За даними офіційного виробника електродвигунів-генераторів, значення потужності електрогенератора буде дорівнювати 20 Вт, чого буде достатнього для заряджання середньостатистичного смартфона. В подальшому можлива модифікація конструкції за рахунок збільшення габаритів, доопрацювання профіля лопатки робочого колеса, зміни геометричних параметрів конфузора та робочого колеса.

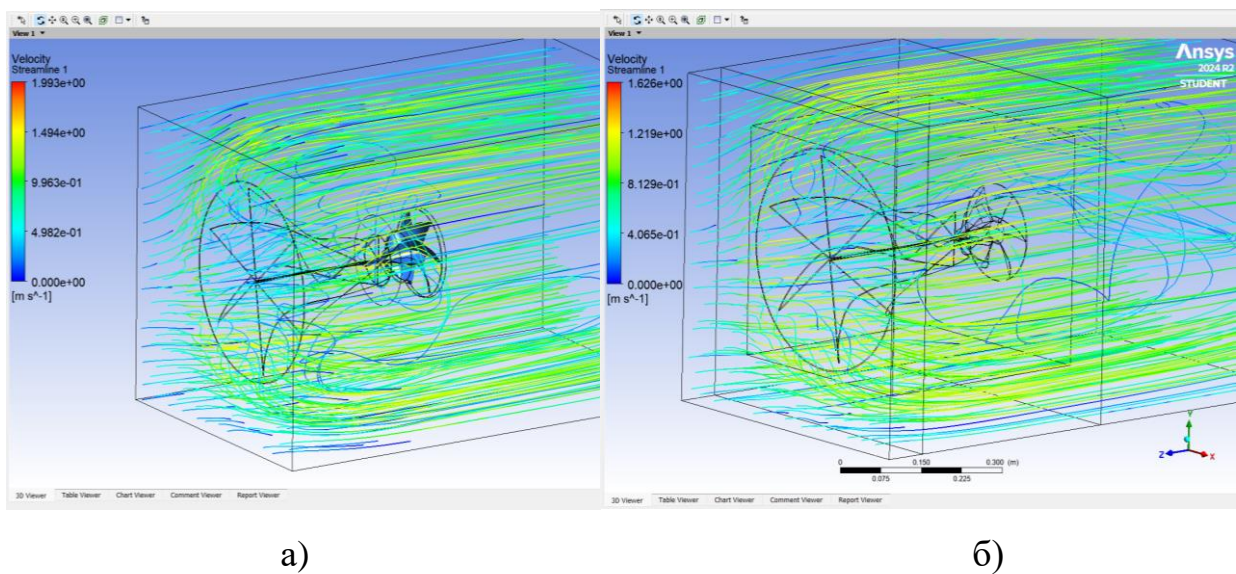


Рисунок 4.6– Результати розрахунку конструкції та крутного моменту

a) Ansys Fluent; б) Ansys CFX

## ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було проведено комплексне дослідження, спрямоване на підвищення ефективності гідрогенераторів шляхом оптимізації їх конструкції.

На першому етапі дослідження було розглянуто різні типи гідрогенераторних турбін, що дозволило проаналізувати їх особливості, сфери застосування та конструктивні відмінності. Отримані результати слугували основою для проектування експериментальної моделі гідрогенератора з використанням сучасного програмного забезпечення SolidWorks. Особливу увагу було приділено конструкції конфузора з напрямними лопатками, які відіграють ключову роль у формуванні потоку перед робочим колесом.

Було розроблено кілька варіантів конструкцій, кожна з яких пройшла чисельне моделювання в ANSYS CFX. На цьому етапі було проведено серію розрахунків, спрямованих на визначення обертового моменту та загальної ефективності. Результати початкових розрахунків виявилися незадовільними, що вказало на необхідність удосконалення як самої конструкції, так і якості обчислювальної сітки для чисельного аналізу.

Удосконалена модель передбачала внесення змін у геометрію лопаток, що дозволило поліпшити спрямованість потоку від конфузора до робочого колеса. Особливу увагу приділили підвищенню точності обчислень через використання більш щільної та якісної обчислювальної сітки. Крім того, було виконано порівняльні розрахунки для двох середовищ: води та повітря. Результати підтвердили, що вода забезпечує значно вищий крутний момент, що відповідає фізичній природі середовища з більшою щільністю.

Додатково було проведено розрахунок у вирішувачі Ansys Fluent. Порівняно результати обчислень двох вирішувачів, які показали схожі результати з розбіжністю менше 10% від більшого значення.



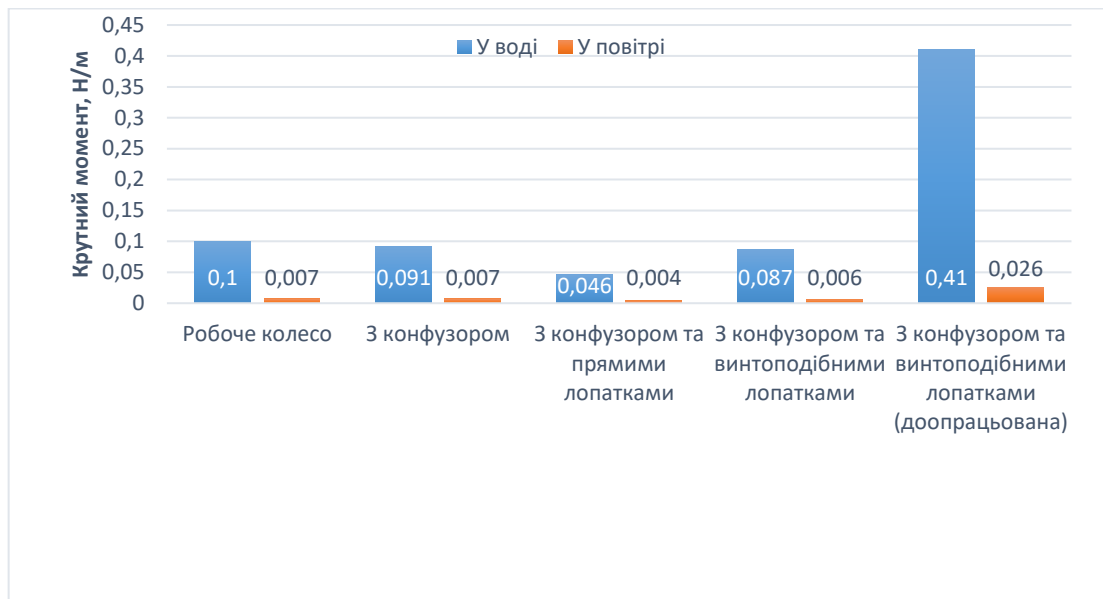


Рисунок 5– Результати розрахунку конструкції та крутного моменту

Заключний результат моделювання для водного середовища становив 0,42 Н/м крутного моменту, що є задовільним для експериментальної конструкції малої потужності. Це підтверджує правильність обраного підходу до проектування та аналізу. Удосконалення конструкції дозволило досягти необхідного рівня ефективності та стабільності роботи системи.

У підсумку, виконана робота доводить, що оптимізація геометричних параметрів лопаток у поєднанні з чисельним моделюванням є ефективним методом підвищення продуктивності турбомашин. Отримані результати можуть бути використані для подальших досліджень у сфері малої гідроенергетики, розробки компактних гідрогенераторів для локального енергозабезпечення, а також для вдосконалення методології проектування турбомашин із використанням сучасних програмних інструментів.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ПОСИЛАНЬ

1. Hammond, J., Pepper, N., Montomoli, F., & Michelassi, V. (2022). Machine learning methods in CFD for turbomachinery: A review. *International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power*, 7(2), 16.  
<https://doi.org/10.3390/ijtp7020016>
2. Smith, J. A., & Johnson, D. B. (2023). Advances in centrifugal pump design. *Journal of Fluid Mechanics*, 956, 1-20.  
[doi:10.55549/epstem.1176074](https://doi.org/10.55549/epstem.1176074)
3. Rogovyi, A., Khovanskyi, S., Hrechka, I., & Gaydamaka, A. (2020). Studies of the swirling submerged flow through a confuser. In *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange* (pp. 85-94). Cham: Springer International Publishing.
4. Quaranta, Emanuele, et al. "Hydropower case study collection: Innovative low head and ecologically improved turbines, hydropower in existing infrastructures, hydropeaking reduction, digitalization and governing systems." *Sustainability* 12.21 (2020): 8873.  
<https://doi.org/10.3390/su12218873>
5. Libert Sijabat, Farel H. Napitupulu, M. Sabri, Zulkifli Lubis, Andianto Pintoro, Himsar A. (2015). Uji performansi turbin angin tipe darrieus-h dengan profil sudu NACA 0018 dan analisa perbandingan efisiensi menggunakan variasi jumlah sudu dan sudut pitch. *Jurnal Dinamis*, Volume.3, No.1 Maret 2015 ISSN 0216-7492  
<https://doi.org/10.32734/dinamis.v3i1.6964>
6. Manzano-Agugliaro, F., Taher, M., Zapata-Sierra, A., Juaidi, A., & Montoya, F. G. (2017). An overview of research and energy evolution for small hydropower in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 476-489.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.013>

7. Sinagra, M., Picone, C., Aricò, C., Pantano, A., Tucciarelli, T., Hannachi, M., & Driss, Z. (2021). Impeller Optimization in crossflow hydraulic turbines. *Water*, 13(3), 313.  
<https://doi.org/10.3390/w13030313>
8. Sinagra, M.; Aricò, C.; Tucciarelli, T.; Morreale, G. Experimental and numerical analysis of a backpressure Banki inline turbine for pressure regulation and energy production. *Renew. Energy* 2020,149, 980–986  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.076>
9. Quaranta, E., & Trivedi, C. (2021). The state-of-art of design and research for Pelton turbine casing, weight estimation, counterpressure operation and scientific challenges. *Heliyon*, 7(12).
10. Fitriana, N., Yuniwati, E. D., Darmawan, A. A., & Firdaus, R. (2021). The use of a micro-hydro power plant for the educational park area around the reservoir. *AMCA Journal of Science and Technology*, 1(2), 39-45.  
<https://doi.org/10.51773/ajst.v1i2.100>
11. Nasir, B. A. (2014). Design considerations of micro-hydro-electric power plant. *Energy procedia*, 50, 19-29.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.003>
12. Carvajal, R., Dranka, G. G., Setti, D., & Ferreira, P. (2022). Reframing the selection of hydraulic turbines integrating analytical hierarchy process (AHP) and fuzzy VIKOR multi-criteria methods. *Energies*, 15(19), 7383.  
doi:10.3390/en15197383
13. Ansys CFX Overview.  
URL:[https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v242/en/cfx\\_intr/i1302231.html](https://ansyshelp.ansys.com/public/Views/Secured/corp/v242/en/cfx_intr/i1302231.html)
14. Rajendran, S., & Purushothaman, K. (2012). Analysis of a centrifugal pump impeller using ANSYS-CFX. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 1(3), 1-6.

- 15.** Liu, S., Ong, M. C., Obhrai, C., Gatin, I., & Vukčević, V. (2020). Influences of free surface jump conditions and different  $k-\omega$  SST turbulence models on breaking wave modelling. *Ocean engineering*, 217, 107746.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107746>
- 16.** Patill, C. R., Dandotiya, D., Pal, B., & Banker, N. (2021). Numerical Investigation of Heat Transfer in Aircraft Engine Blade Using  $k-\epsilon$  and SST  $k-\omega$  Model. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1013, No. 1, p. 012027). IOP Publishing.  
doi:10.1088/1757-899X/1013/1/012027
- 17.** Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education.
- 18.** Ferziger, J. H., & Perić, M. (2020). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56026-2>
- 19.** ANSYS Inc. (2023). *ANSYS Fluent User's Guide*.  
<https://www.ansys.com>