

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

Липовий Віталій Миколайович

УДК 62-854

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ
ОРТОГОНАЛЬНИХ ВІТРОДВИГУНІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ
ВІТРОВИХ ПОТОКІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ**

Спеціальність 05.05.17 – гідравлічні машини і гідропневмоагрегати

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник –
Папченко Андрій Анатолійович,
кандидат технічних наук, доцент

Суми – 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ІНДЕКСІВ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ВІДНОСНО ЗАСТОСУВАННЯ ВІТРОДВИГУНІВ ТА ДОЦІЛЬНІСТЬ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ АДАПТАЦІЇ ОРТОГОНАЛЬНИХ ВІТРОКОЛІС ДО ВІТРОВИХ ПОТОКІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ	
1.1 Енергія вітру	12
1.2 Типи вітроенергетичних установок. Переваги та недоліки	16
1.3 Аналіз конструкцій вітрових турбін	22
1.4 Методи дослідження аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів	33
1.4.1 Фізичне моделювання робочого процесу ортогонального рото	33
1.4.2 Одномірна імпульсна модель.....	39
1.4.3 Вихрова модель розрахунку.....	40
1.5 Постановка задач і методів дослідження.....	41
1.6 Висновки	43
РОЗДІЛ 2 САМОЗАПУСК ВІТРОКОЛЕСА. ГНУЧКІ ПРОФІЛІ КОМБІНОВАНОГО ПРИНЦИПУ ДІЇ.....	45
2.1 Покращення процесу самозапуску вітроколеса Н-Дар'є.....	45
2.2 Гнучкий профіль НАСА 0015 парусного типу.....	47
2.3 Висновки.....	49
РОЗДІЛ 3 Математична модель робочого процесу ортогонального вітродвигуна	51
3.1 Робочий процес ортогонального вітродвигуна з профільованими лопатями.....	51
3.2 Одноструминна імпульсна модель.....	53
3.3 Двоструминна імпульсна модель.....	55
3.4 Чисельне моделювання обтікання потоком повітря твердої стінки	66

3.5 Висновки	78
РОЗДІЛ 4 ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ОРТОГОНАЛЬНОГО ВІТРОДВИГУНА.....	80
4.1 Експериментальний стенд.....	80
4.2 Модель ортогональної вітротурбіни	88
4.3 Оцінка похибок результатів вимірювання	91
4.4 Дослідження методів підвищення енергетичних характеристик ортогональних витродвигунів фізичним експериментом.....	95
4.4.1 Дослідження гнучких лопатей.....	95
4.4.2 Дослідження впливу додаткового вектору швидкості на енергетичні показники вітроколеса.....	100
4.5 Висновки	109
ВИСНОВКИ.....	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	113
Додаток А.....	122
Додаток Б	126
Додаток В	127

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ІНДЕКСІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

Основні позначення

- V_0 – швидкість повітряного потоку
 ρ – густина середовища
 R – радіус вітроколеса
 H – висота вітроколеса
 $S=2RH$ – охоплена площа
 b – хорда профіля
 φ – кут установки лопаті
 α – кут атаки лопаті
 ω – частота обертання вітроколеса
 $\theta = \omega R / V_0$ – коефіцієнт швидкохідності вітроколеса
 M – крутний момент на валу вітроколеса
 X – сила лобового опору
 Y – підйомна сила
 C_x, C_y – аеродинамічні коефіцієнти профіля лопаті
 $C_x = 2X / \rho V_0^2 S$ – коефіцієнт сили лобового опору
 $C_y = 2Y / \rho V_0^2 S$ – коефіцієнт підйомної сили
 $C_m = 2M / \rho V_0^2 SR$ – відносний крутний момент
 $C_p = C_m \theta$ – коефіцієнт використання енергії вітру

Скорочення

- ВЕУ – вітроенергетична установка
 ВЕС – вітроенергетична станція
 ОВД – ортогональний вітродвигун
 АДХ – аеродинамічні характеристики

ВСТУП

За даними світового енергетичного агентства, протягом наступних десятиліть очікується значне збільшення енергоспоживання, пов'язане з розвитком економіки і приростом населення [1]. Це призведе до зростання тиску на систему енергопостачання та потребує підвищеної уваги до ефективності використання енергії. Основними джерелами енергії на сьогодні є вуглеводні та уранові руди. Їх світові запаси вже відомі, оскільки і відомий рівень їх споживання, то підрахований термін, після якого вони будуть повністю вичерпані.

Виходячи з цього, доцільне зміщення вектору світової енергетики в бік альтернативних джерел енергії та збільшення їх питомої ваги на ринку енергоносіїв [2]. Вітроенергетика, як найбільш розвинений сектор відновлюваних джерел енергії, стала основою енергетичних систем у багатьох країнах світу, признана надійним та доступним джерелом екологічно чистої енергії. Суттєвою стала частка вітроенергетики у світовому енергопостачанні [3]. Так, станом на 2013 рік, сумарна потужність всіх вітроустановок у світі становить більше 318000 МВт, що виробляють 580 ГВт електроенергії в рік, що відповідає більше ніж 3% від світового енергоспоживання [4].

На сьогоднішній день існує два основні типи вітроустановок: перші для створення тягового зусилля використовують різницю лобових опорів на робочій та тільній стороні лопаті; другі – підйомну силу профільованої лопаті. Вітроколеса першого типу тихохідні, характеризуються стабільним високим значенням стартового крутного моменту, але мають відносно невелике значення коефіцієнту використання енергії вітру. Другий тип вітродвигунів потребує механізмів примусового розгону до номінальних обертів, при яких виникає позитивна тягнуча сила на валу турбіни. При стабільних високих значеннях вітрового потоку дані вітроустановки характеризуються відносно великими показниками ефективності роботи, що наближаються до теоретично допустимого критерію Бетца [5].

Найбільшого розповсюдження у світі набули горизонтально-осьові вітроустановки, характеризуючись високими енергетичними показниками,

простотою робочого процесу та конструктивними особливостями, що дозволяють використовувати їх на вітроелектричних станціях мегаватного класу. Дані установки стабільно працюють при високих значеннях середньорічної швидкості вітру та якісній реакції системи орієнтування вітроколеса на зміну напрямку вітру. На більшості території України середня швидкість вітрового потоку не перевищує 3,5 м/с, що не дозволяє ефективно використовувати горизонтально-осьові вітротурбіни в її межах.

Більш доцільними для нашої місцевості є вертикально-осьові, ортогональні вітротурбіни. Існує ряд теоретичних робіт, в яких говориться про можливість роботи даних установок на ряду з горизонтально-осьовими і навіть вище [6]. Ефективність їх роботи не залежить від орієнтації вітроколеса відносно потоку повітря. Тому, для вирішення енергетичного питання України, існує потреба в більш детальному дослідженні робочого процесу ортогональних вітродвигунів з метою виявлення недоліків та розробки методів їх подолання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до плану науково-дослідних робіт кафедри прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету.

Наукові розробки реалізовані при виконанні держбюджетної НДР за темами:

№ 80.13.07.09-10 д/б «Дослідження робочого процесу теплогенеруючих агрегатів багатофункціонального призначення та розробка на їх основі енерго- та ресурсозберігаючого обладнання» (замовник – Міністерство освіти і науки України, номер державної реєстрації 0109U001381), внесок здобувача:

- у заключному звіті підрозділ «Розрахунок енергетичних параметрів модернізованої проточної частини» (2010 р.);

№ 80.13.08.11-12 д/б «Створення ефективних енергозберігаючих систем опалення та гарячого водопостачання на базі багатофункціональних теплогенеруючих агрегатів» (замовник – Міністерство освіти і науки України, номер державної реєстрації 0111U002153), внесок здобувача:

- у проміжному звіті підрозділ «Розробка теплогенеруючого агрегату»

(2011 р.);

- у заключному звіті розділ «Результати випробування пілотної системи опалення на базі ТГА» (2012 р.).

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – підвищення енергетичних характеристик ортогональних вітродвигунів.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі задачі дослідження:

- розробити новий тип лопатей для покращення самозапуску вітроколеса шляхом комбінованого використання в робочому процесі ортогональних вітродвигунів підйомної сили та сили лобового опору;

- розробити механізм підвищення енергетичних показників ортогональних вітроколес без зміни геометричних параметрів вітроколеса;

- розрахувати аналітичним методом кінематичні характеристики потоку повітря для виникнення максимальної тягової сили на валу вітроколеса;

- адаптувати програмний комплекс ANSYS CFX для визначення аеродинамічних характеристик профільованих лопатей та підтвердити адекватність розрахункових результатів;

- підтвердити експериментальним шляхом адекватність запропонованих методів підвищення ефективності роботи ортогональних вітродвигунів.

Об'єкт дослідження – робочий процес ортогонального вітродвигуна.

Предмет дослідження – самозапуск ротору та енергетичні характеристики вітрової турбіни.

Методи дослідження. При проведенні теоретичних досліджень використані методи математичного моделювання на основі імпульсної моделі вітроколеса. Математична модель має вигляд системи інтегральних виразів, що вирішується методом ітерацій. Вірогідність наукових результатів роботи обумовлена застосуванням апробованих методів дослідження, відповідністю прийнятих припущень характерові розв'язуваних задач, адекватністю математичних моделей. Фізичний експеримент проводився шляхом продувки вітроколеса в аеродинамічній трубі відкритого типу з закритою робочою частиною.

Проведення теоретичного розрахунку ґрунувалося на імпульсній моделі вітроколеса. Вплив корегування кінематичних характеристик потоку на роботу вітроколеса проводився шляхом порівняння даних однострумінної імпульсної моделі з двострумінної.

Алгоритм прогнозування АДХ ортогональних вітротурбін набув завершеного виду при практичному доведенні можливості використання ANSYS CFX для визначення аеродинамічних характеристик профільованих лопатей. Їх показники прямим чином впливають на процес формування тягового крутного моменту на валу вітроколеса. Знаючи показники профілю, виникає можливість підрахунку енергетичних характеристик вітроколеса та визначення методу впливу на них.

Фізичний експеримент ґрунувався на моделюванні робочого процесу ортогонального вітроколеса шляхом обдування в аеродинамічній трубі. Процес енергетичної взаємодії потоку повітря з лопатями відстежувався за допомогою новітньої електронної мікропроцесорної техніки. Використання експериментального стенду дозволило зробити перевірку теоретичних розрахунків АДХ ортогональних вітроколес та провести детальне дослідження процесу самозапуску з метою збільшення тягового зусилля при старті з місця.

Про достовірність отриманих експериментальних результатів свідчать обґрунтоване використання загальноновизнаної методики проведення відповідних випробувань, а також задовільна похибка вимірювання фізичних величин при виконанні експериментальної частини дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблено двострумінну імпульсну математичну модель ортогонального вітроколеса для визначення кінематичних характеристик потоку повітря перед лопаттю, які дозволяють розширити сектор виникнення позитивного тягового зусилля на валу вітроколеса;
- вперше розроблено механізм підвищення енергетичних показників вітроколеса шляхом введення допоміжного вектору швидкості;

- удосконалено метод розрахункового визначення аеродинамічних характеристик профільованих лопатей, який дозволяє проводити аналітичний прогноз енергетичних характеристик ортогональних вітродвигунів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- розроблені рекомендації щодо використання статорного елемента для підвищення потужності вітроколеса;

- визначено конструкцію та геометричні параметри гнучкої лопаті, що дозволяє забезпечити самозапуск вітроколеса;

- створено експериментальний стенд для фізичного моделювання робочого процесу вітротурбіни, що дозволяє визначати величину стартового крутного моменту вітроколеса та досліджувати вплив статорних елементів на енергетичні характеристики;

- результати дисертаційної роботи впроваджені на промислових підприємствах України (ТОВ «Турбомаш», ТОВ «СП «Профіпласт», ТОВ «Боско») і в навчальному процесі СумДУ, що підтверджується відповідними актами впровадження (Додаток А).

Особистий внесок здобувача

У написаних у співавторстві та особистій наукових публікаціях, що розкривають результати досліджень, проведених за темою дисертації, здобувачу належать:

[7] – розроблено експериментальний стенд. На основі чисельного експерименту визначено геометричні параметри конструктивних елементів аеродинамічної труби. Виконано монтаж експериментальної установки та проведено зондування характеристик потоку повітря в робочій зоні.

[8] – розроблено алгоритм визначення енергетичних характеристик ортогональних вітрових турбін чисельним експериментом. Приведено порівняльний аналіз інтегральних залежностей отриманих з використанням різних моделей турбулентності.

[9] – визначено геометричні параметри розрахункової області та необхідні показники якості розрахункової сітки для чисельного моделювання обтікання потоком повітря сферичного тіла типу куля.

[10] – приведено алгоритм синхронізації робочих процесів ортогонального вітродвигуна та теплогенеруючого агрегату гідродинамічного принципу дії для створення теплових вітроустановок.

[11] – викладено опис проведення фізичного експерименту для визначення енергетичних показників ортогональних вітродвигунів. Проведено порівняльний аналіз чисельних характеристик із експериментальними.

Постановка задач, вибір методів дослідження та аналіз отриманих результатів проводилися разом із науковим керівником канд. техн. наук, доц. Папченком А.А.

Апробація результатів дисертації

Основні положення і результати дисертації доповідалися й обговорювалися на:

1. Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2012, 2014рр.);
2. XIII Міжнародній науково-технічній конференції “ Промислова гідравліка та пневматика ” (м. Чернігів, 2012 р.);
3. XIX Міжнародній науково-технічній конференції “ Гідроаеромеханіка в інженерній практиці ” (м. Кіровоград, 2014 р.);
4. Міжнародній науково-технічній конференції «ГЕРВІКОН+НАСОСИ-2014» (м. Суми, 2014р.).

Публікації

За матеріалами дисертації здобувачем опубліковано 5 наукових праць, з яких 4 наукових праць у виданнях, що входять до переліку, затвердженого МОН України (в тому числі 1 особиста публікація) та 1 публікація у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus, та 5 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура й обсяг дисертації

Робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації становить 127 сторінок, у тому числі 79 рисунки, 1 таблиця, бібліографія з 88 джерел на 8 сторінках, 3 додатки на 6 сторінках.

РОЗДІЛ 1

РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ОРТОГОНАЛЬНОГО ВІТРОДВИГУНА. КОНСТРУКЦІЇ

1.1 Енергія вітру

Вітер – переміщення повітряних мас із більш холодної зони в більш теплу за рахунок нерівномірного прогріву сонцем поверхні Землі та повітря над нею. Нагрітий об'єм повітря має меншу щільність і підіймається вгору. Його заміщує менш прогрітий об'єм. Таким чином повітряні маси постійно перемішуються та переміщуються, як у вертикальному напрямку, так і в напрямку паралельному земній поверхні. Рух повітряних мас має складний характер та залежить від багатьох причин.

Вітер має певний запас кінетичної енергії, яку з використанням спеціальних двигунів, що отримали назву вітряних, можна перетворити в механічну роботу. Швидкість є однією з найважливіших характеристик повітряного потоку, чим більша швидкість тим більша потужність в потоці.

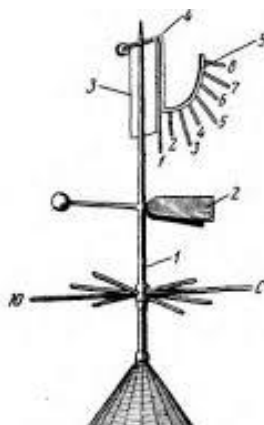


Рисунок 1 – Флюгер Вільда

Для визначення швидкості вітру використовуються спеціальні прибори: флюгера, анемометри та інше. Найпростішим прибором є флюгер Вільда (рис. 1). Він складається з штоку 1 до якого закріплено флюгер 2, яка при зміні швидкості вітру встановлює площину пластини 3 перпендикулярно до потоку повітря. Відносно горизонтальної осі пластини коливається на шарнірі 4. Кут відхилення пластини залежить від величини вітрового тиску на неї. За шкалою 5 визначають

швидкість вітрового потоку [12].

Більш точно швидкість вітру визначається за допомогою анемометра (рис. 2).

Вітроприймачем у пристрої МС-13 є чотириох чашкова вертушка, насаджена на вісь і обертається в опорах. На нижньому кінці осі нарізаний черв'як, пов'язаний з редуктором, який передає рух трьом стрілкам. Циферблат має шкалу одиниць, сотень і тисяч. Черв'як через черв'ячне колесо і триб передає рух центральному колесу, на осі якого встановлена стрілка шкали одиниць. Триб центрального колеса через проміжне колесо приводить в обертання мале колесо, на осі якого встановлена стрілка шкали сотень. Від малого колеса через друге проміжне колесо обертання передається другому малому колесу, вісь якого несе на собі стрілку шкали тисяч. Включити і вимкнути механізм можна за допомогою аретира, один кінець якого перебуває під зігнутої пластинчастої пружинкою, що є підп'ятником черв'ячного колеса. Для того щоб вимкнути рахунковий механізм аретир необхідно повернути за годинниковою стрілкою [13].

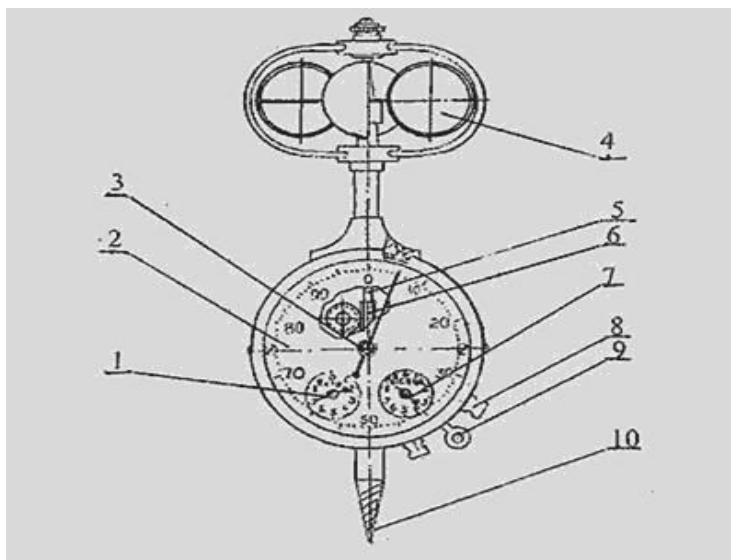


Рисунок 2 – Чашковий анемометр

Кінетична енергія вітру залежить від швидкості потоку V та його маси m і може бути визначена за формулою:

$$E_k = \frac{mV^2}{2}. \quad (1.1)$$

Підставляючи в цю формулу значення маса повітря, що проходить через одиницю часу отримаємо залежність для визначення потужності вітрового

потокі:

$$N = \frac{\rho V^3}{2} S, \quad (1.2)$$

де ρ – щільність повітря;

S – площа, через яку проходить потік повітря.

З даної формули видно, що енергія потоку прямо пропорційна кубу швидкості вітру.

Проте в механічну роботу можна перетворити тільки частину енергії потоку, що проходить через вітроколесо. Інша частина енергії витрачається на тертя частинок повітря між собою та з лопатями вітроколеса. Крім того значна частина енергії міститься в потоці поза вітроколесом. Це пояснюється тим, що за вітрової турбіною повітря продовжує рухатися і має певну швидкість.

Якщо кожної секунди через вітродвигун проходить маса повітря m і якщо швидкість потоку зменшується від V_1 до V_2 , то, генерована потужність вітродвигуна:

$$N = \frac{m}{2} (V_1^2 - V_2^2). \quad (1.3)$$

На перший погляд здається, що максимальна потужність турбіни бути при умові максимально малого значення V_2 , але це так. Оскільки зменшенню швидкості потоку за вітроколесом передують зменшення маси повітря, що проходить через нього. При цьому повітря обминає перегородку – вітроколесо та протікає по сторонам не взаємодіючи з лопатями.

Величина швидкості потоку повітря V в об'ємі вітроколеса лежить між значеннями швидкості V_1 та V_2 . На перший погляд здається, що V представляє собою середнє арифметичне між швидкостями потоку перед вітроколесом та за ним. На справді, коли через турбіну щосекунди протікає маса повітря m , і зменшується енергія вітрового потоку, то вітроколесо при цьому отримує потужність, що можна визначити виходячи з сили опору F_o вітродвигуна на потік:

$$N = F_o V. \quad (1.4)$$

Прирівнявши два вирази, отримуємо:

$$\frac{m}{2} (V_1^2 - V_2^2) = F_o V. \quad (1.5)$$

Оскільки сила опору вітроколеса приводе до зменшення швидкості вітру від V_1 до V_2 , то по закону імпульсу сили та кількості руху:

$$F_o = m(V_1 - V_2). \quad (1.6)$$

Підставивши отримуємо:

$$\frac{m}{2}(V_1 - V_2)(V_1 + V_2) = m(V_1 - V_2)V \quad (1.7)$$

або

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}. \quad (1.8)$$

Виходячи з цього, маємо можливість визначити потужність вітроколеса по початковій V_1 та кінцевій V_2 швидкостям вітру:

$$N = \frac{m}{2}(V_1^2 - V_2^2) = \frac{\rho S}{4}(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) = \frac{\rho S V_1^3}{4} \left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right). \quad (1.9)$$

Максимальну потужність отримуємо, якщо досягти відношення між швидкостями перед колесом та за ним:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3}. \quad (1.10)$$

Величина максимальною потужності [14]:

$$N_{max} = \frac{16 \rho V^3}{27} S. \quad (1.11)$$

Показник кількості кінетичної енергії перетвореної на механічну енергію вітроколесом – коефіцієнт використання енергії вітру C_p . Представляє собою відношення потужності вітроколеса N до повної потужності вітрового потоку, що пройшов через нього:

$$C_p = \frac{2N}{\rho V^3 S}. \quad (1.12)$$

Теоретичні дослідження вітроколеса ґрунтуються на тому, що швидкість потоку за ним не може дорівнювати нулю. А оптимальний режим роботи вітрогенератора спостерігається у випадку, коли швидкість безпосередньо за вітроколесом складає приблизно $2/3$ від початкової швидкості потоку, що набігає на вітроколесо. Оскільки частина енергії втрачається в момент силової взаємодії потоку з лопатями. Корисна потужність вітроколеса досягає дещо нижчих величин. Тому теоретичною максимальною межею коефіцієнту використання енергії вітру для ідеального вітроколеса є:

$$C_p = \frac{N}{N_{max}} = \frac{16}{27} \approx 0,593. \quad (1.13)$$

Величина коефіцієнту використання енергії вітру залежить від типу вітроколеса, його геометричних показників, якості виготовлення основних робочих органів та від ряду інших факторів [15].

Для швидкохідних вітрових турбін з профільованими аеродинамічними лопатями C_p лежить в межах 0,42-0,46. У тихохідних вітроколіс коефіцієнт використання енергії вітру має менші значення та знаходиться в межах 0,25-0,3.

Чим менша кількість лопатей вітроколеса, при всіх інших рівних умовах, тим більшої кількості обертів воно досягає. Тому малолопасні установки називаються швидкохідними.

Швидкохідність один із основних показників ефективності роботи вітродвигуна. Чим вона більша, тим легше реалізувати передачу потужності від вітротурбіни до електричного генератора, насосу та інших. Крім того швидкохідні вітроколеса більш легкі та мають вищий коефіцієнт використання енергії вітру. Але характеризуються поганими показниками самозапуску, оскільки стартовий крутний момент в декілька разів нижчий ніж у тихохідних коліс [16].

Швидкохідність визначається відношенням колової швидкості кінця лопаті ωR до швидкості потоку, що на неї набігає V :

$$\theta = \frac{\omega R}{V}. \quad (1.14)$$

1.2 Типи вітроенергетичних установок. Переваги та недоліки

Сучасна вітроенергетика базується на використанні вітродвигунів двох основних видів – горизонтально-осьові пропелерні ВД з горизонтальною віссю обертання та вертикально-осьові ВД (або ортогональні) з вертикальною віссю обертання. Ротори останніх виконуються на зразок вертикально розташованих лопатей або в спеціальному виконанні – ротори Дар'є [17].

В горизонтально-осьових ВД вітроколесо має криловидну форму та обертається в вертикальній площині, перпендикулярній напрямку вітру. А вісь вітроколеа

паралельна потоку. Основною обертовою силою у коліс даного типу являється підйомна сила лопатей.

Відносно вітру вітроколесо може розташовуватися перед опорною мачтою або за нею. При передньому розташуванні вітроколесо повинно мати аеродинамічний стабілізатор або який-небудь пристрій, який буде утримувати його в робочому положенні. При задньому розташуванні щогла частково затінює вітроколесо та турбулізує набігаючий потік.

При роботі колеса в таких умовах виникають циклічні навантаження, підвищений шум та пульсації вихідних параметрів вітроустановки. Напрямок вітру може змінюватися доволі швидко і вітроколесо повинно чітко відслідкувати ці зміни, повертатися на крилі за рахунок віндрози або серводвигуна.

В таких ВЕУ зазвичай використовуються дво-, трьолопатеві вітроколеса, причому останні відрізняються дуже плавним ходом. Електрогенератор та редуктор, який з'єднує його з вітроколесом, зазвичай розташовані на верху опорної щогли в поворотній голівці. З точки зору експлуатації зручно розташовувати їх знизу, але складності, які при цьому виникають, з передачею крутного моменту знижують переваги такого розміщення.

Горизонтально-осьова вітроустановка складається з трьолопатевого вітродвигуна 1, трансмісії-мультиплікатора 2, віндрози 3, валу відбіру потужності 5 та електрогенератора 6. Щогла установлена на фермовій зварній вищці 4.

Головка вітродвигуна має пристрої ручного керування і автоматичної стабілізації швидкості обертання вітроколеса у випадку зміни швидкості вітру [18, 19]. Для орієнтування вітродвигуна по напрямку вітру в задній частині щогли установлена віндроза 3, яка приводить в рух механізм поворота при зміні напрямку вітру. До вихідного валу трансмісії редуктора прикріплений вертикальний вал відбору потужності 5 з електрогенератором 6.

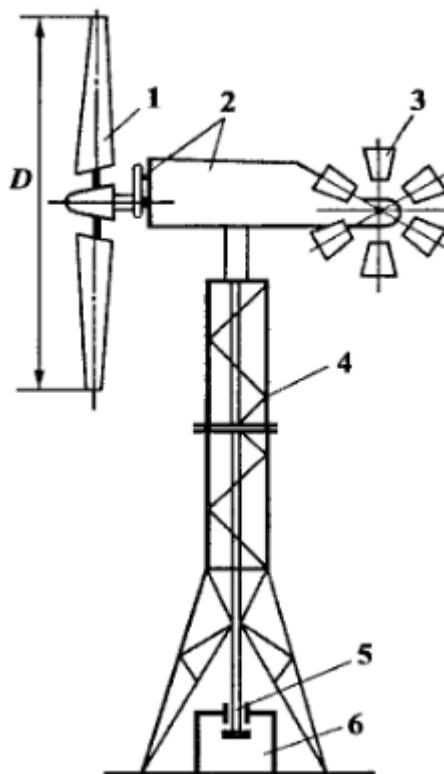


Рисунок 3 – Конструктивна схема ВЕУ з горизонтальною віссю обертання: 1- робоча лопасть; 2- трансмісія (мультиплікатор); 3- віндроза; 4 – вишка; 5- вал відбора потужності; 6- електрогенератор.

Вітроколесо ВЕУ з вертикальною віссю обертання внаслідок своєї геометрії незалежно від напрямку вітру знаходиться в горизонтальному положенні. Крім того, така схема дозволяє за рахунок тільки подовження вала встановити редуктор з генератором в основі башти.

До найбільш розповсюджених типів вертикально-осьових установок відноситься ротор Дар'є. В ньому обертовий момент створюється підйомною силою, яка виникає на двох або трьох тонких вигнутих поверхнях, які мають аеродинамічний профіль. Підйомна сила максимальна в той момент, коли лопасть з великою швидкістю пересікає набігаючий потік [20, 21].

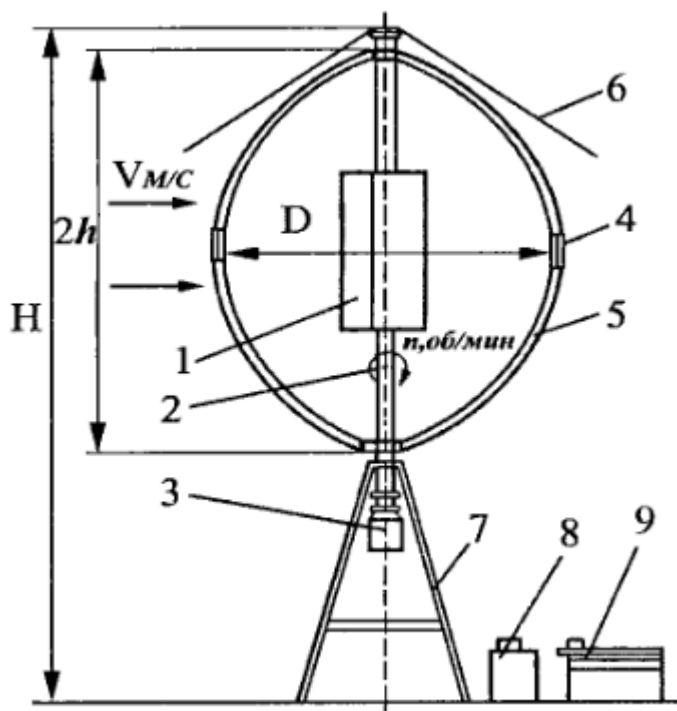


Рисунок 4 – Конструктивна схема ВЕУ з вертикальною віссю обертання: 1 – стартер (ротор Савоніуса); 2 – вал; 3 – електрогенератор; 4 – тормозний пристрій; 5 – робоча лопать; 6 – розтяжки; 7 – рама; 8 – перетворювач енергії; 9 – акумулятор.

Даний вітродвигун самозапускається, як правило, не може, тому для його пуску використовують генератор, який працює в режимі двигуна, або ротора Савоніуса. Це вітроколесо також обертається силою опору. Його лопаті виконані з тонких вигнутих листів прямокутної форми, відрізняються простотою та низькою вартістю. Крутний момент створюється завдяки різному опору вогнутої та випуклої частин ротора. Із-за великого геометричного заповнення це вітроколесо характеризується високим значенням крутного моменту.

В даний час у світовому парку вітроенергетичних установок експлуатується горизонтально-осьові або так звані пропелерні установки, а їх серійним випуском займаються кілька тисяч підприємств. Відставання в освоєнні вертикально-осьових ВЕУ викликано декількома причинами. Вертикально-осьові ВЕУ були винайдені пізніше горизонтально-осьових пропелерних (ротор Савоніуса - в 1929 р., ротор Дар'є - в 1931 р., ротор Масгроува - в 1975 р.). Крім цього, до недавнього часу головним недоліком вертикально-осьових ВЕУ помилково вважалося, що для них неможливо отримати відношення максимальної лінійної швидкості робочих органів

(лопате́й) до швидкості вітру більше одиниці (для горизонтально-осьових пропелерних ВЕУ цей показник сягає більше 5:1). Ця передумова, вірна тільки для тихохідних роторів типу ротора Савоніуса, що використовують різність опору лопате́й при їх русі за вітром і проти вітру, призвела до неправильних теоретичних висновків про те, що граничний коефіцієнт використання енергії вітру у вертикально-осьових ВЕУ нижче, ніж у горизонтально-осьових пропелерних, через що цей тип ВЕУ майже 40 років взагалі не розроблявся. І тільки в 60-х - 70-х роках спочатку канадськими, а потім американськими та англійськими фахівцями було експериментально доведено, що ці висновки не стосуються ротора Дар'є, що використовують підйомну силу лопате́й. Для цих роторів вказане максимальне відношення лінійної швидкості робочих органів до швидкості вітру досягає 6:1 і вище, а коефіцієнт використання енергії вітру не нижче, ніж у горизонтально-осьових пропелерних ВЕУ. Грає певну роль і те обставина, що обсяг теоретичних досліджень принципово нових питань аеродинаміки ротора і досвід розробки, відпрацювання та експлуатації вертикально-осьових ВЕУ набагато менше, ніж горизонтально-осьових пропелерних. Вертикально-осьові ВЕУ стали інтенсивно освоювати з початку 80-х років, причому діапазон їхніх потужностей безперервно розширюється. Сьогодні практично всі країни експлуатують вертикально-осьові ВЕУ типу Дар'є, причому в Канаді, США, Нідерландах перевага віддається класичній схемі з криволінійними лопатами, а у Великобританії і Румунії в якості основної схеми прийняті Н-Дар'є ротори з прямими лопатями, паралельними осі обертання. Найбільших успіхів досягла фірма VAWT (Великобританія). З 1986 р. на острові Сардинія була випробувана ВЕУ цієї фірми з ротором діаметром 14 м і потужністю 40 кВт. У тому ж році була введена в промислову експлуатацію ВЕУ VAWT-450 з ротором діаметром 25 м потужністю 130кВт. Зараз фірма працює над створенням установки VAWT-850 потужністю 500 кВт. Фірма приступила до розробки більш великої установки VAWT -2400 з ротором діаметром 67 м потужністю 1.7 МВт [22].

Теоретично доведено, що коефіцієнт використання енергії вітру ідеального вітроколеса горизонтальних, пропелерних і вертикально-осьових установок

дорівнює, 0.593. Це пояснюється тим, що ротори ВЕУ обох типів використовують один і той же ефект підйомної сили, що виникає при обтіканні вітровим потоком профільованої лопаті. До теперішнього часу досягнутий на горизонтальних пропелерних ВЕУ коефіцієнт використання енергії вітру становить 0.4. На даний момент цей коефіцієнт у вітрогенераторів (вітроустановок) ГРЦ-Вертикаль становить 0.38. Проведені експериментальні дослідження російських вертикально-осьових установок показали, що досягнення значення 0,4-0,45 - цілком реальне завдання. Таким чином, можна зазначити, що коефіцієнти використання енергії вітру горизонтально-осьових пропелерних і вертикально-осьових ВЕУ близькі [23, 24].

Вважається, що момент рушання горизонтально-осьових пропелерних ВЕУ не дорівнює 0, тому для їх запуску не потрібні зовнішні джерела енергії. Однак на практиці вітроколесо цього типу самозапускається тільки в тому випадку, якщо воно з тією або іншою точністю направлено на вітер. При бічному ж вітрі потужне вітроколесо може і не само запуснитися. При цьому необхідне зовнішнє джерело енергії для розвороту гондоли з вітроколесом на вітер. Довгий час вважалося, що момент рушання вертикально-осьових ВЕУ дорівнює 0, тобто вважалося, що вони не самозапускаються. Проте вчені «ГРЦ-Вертикаль» розробили ВД Дар'є, який самозапускається при швидкості вітру 3.5-4 м/с залежно від потужності (маси) вітротурбіни. Момент рушання цих вітроустановок набагато більше 0, а для саморозкрутки досить лише невеликого пориву вітру. Тим не менш, великі вітроенергетичні установки зазвичай оснащують додатковими турбінами типу Савоніуса для гарантованого старту. Ускладнення конструкції ВЕУ призводить до зниження надійності, а введення додаткових аеродинамічних пристроїв - до зниження потужності вітрової турбіни, що гірше, ніж наявність джерела потужності для запуску. Це враховується на сучасному етапі і при проектуванні нових конструкцій горизонтально-осьових пропелерних ВЕУ.

Розрахункова швидкість вітру горизонтально-осьових пропелерних ВЕУ звичайно знаходиться в межах 12-15 м/с за умовою міцності лопатей на інерційне навантаження. Так, при зміні початкової швидкості вітру від 4.5 до 7.5 м/с

вироблення електроенергії збільшується менше ніж на 2%. Вплив розрахунковою швидкості вітру на вироблення електроенергії дуже великий. Наприклад, збільшення розрахункової швидкості вітру з 10 до 20 м/с призводить до збільшення вироблення енергії більш ніж в 4 рази. Це свідчить про те, що для районів з високим вітровим потенціалом значення розрахункової швидкості вітру, що приймаються для звичайних ВЕУ, виявляються недостатніми, тому що при цьому виявляються недовикористані занадто великі вітроенергетичні ресурси. Як було зазначено вище, робочий діапазон швидкостей вітру для тихохідних вертикально-осьових ВЕУ підвищується до 20-25 м/с, у зв'язку з чим в районах з високим вітровим потенціалом без всякого сумніву вертикально-осьові ВЕУ завідомо переважні.

Вітроустановки типу Н-Дар'є починають працювати при швидкостях вітру 2,5-3 м/с [25, 26], що робить їх більш раціональними для використання у зонах з низьким вітровим потенціалом. А високий коефіцієнт використання енергії вітру дозволяє отримати очікуваний економічний ефект від їх впровадження. Тому для території України доцільно використовувати саме даний тип вітроколес, але для цього необхідно вирішити питання самозапуску та змістити оптимум інтегральних характеристик вітроколеса в зону низьких швидкостей потоку повітря.

1.3 Аналіз конструкцій ортогональних вітродвигунів

Вітряки з вертикальною віссю обертання відомі людству з давніх часів. Найбільш давній документ в якому є згадки про подібний пристрій датується 500-900 роками н.е. В ньому ведеться опис персидського механізму, що використовувався для перекачування води та перемелювання зерна. Пізніше даний вітродвигун отримав латинську назву «рапетоне», що значить: обертається при любому напрямку вітру. Ми можемо і зараз побачити руїни древніх перських

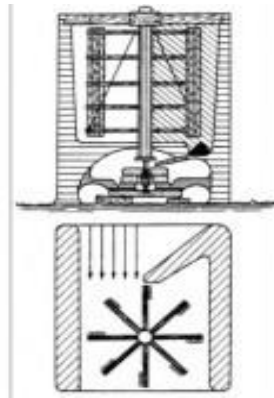


Рисунок 5 – Персидська ортогональна установка

вітряних млинів. Ці установки використовували силу опору шляхом огороження половини вітряного колеса. Стіна захищала половину ротора. Вітер проходив через відкриту половину і приводив ротор в обертання.

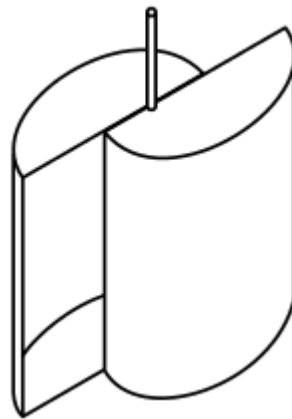


Рисунок 6 – Вітроколесо Савоніуса

Вітрова турбіна Савоніуса була винайдена фінським інженером Сігурдом Йоханнесом Савоніусом в 1922 році [27], проте, європейці проводили експерименти з вигнутими лопатями на вертикальних вітроколесах протягом багатьох десятиліть до цього. Перша згадка про даний тип вітроустановок належить італійському єпископу Вранчічу Фаусту, який також був інженером. У 1616 він описав у своїй книзі «Machinae» декілька типів можливих вітроустановок з випуклими або V-подібними лопатями. Жодна з цих конструкцій не досягла рівня розвитку, досягнутого Савоніусом. Дані вітротурбіни використовуються всякий раз, коли вартість або надійність набагато важливіше, ніж ефективність [28].

З даної причини більшість анемометрів основані на вітроколесах Савоніуса, так

як ефективність роботи не має відношення до вимірювання швидкості вітру. Більші турбіни були використані для вироблення електроенергії на глибоководних буях, які потребували невелику кількість потужності та повністю автономної роботи. Вітроколеса Савоніуса раціонально використовувати для перекачування води, оскільки характеризуються високим значенням крутного моменту. Для згладжування пульсацій на валу виконавчого механізму часто використовують спіральні лопаті, закручені відносно осі обертання вітроколеса.

Найбільшого поширення вітроколесо Савоніуса набуло в якості приводу системи вентиляції на дахах фургонів та автобусів. Вентилятор був розроблений німецьким авіаційним інженером Антоном Флетнером в 1920 році [29].

Лопаті Савоніуса виконані у вигляді напівциліндрів, повітряний потік використовується більш раціонально ніж у вітроколесах з плоскими лопатями, тому коефіцієнт використання енергії вітру у такого вітроколеса в 1,5 рази більше. При деяких перевагах (низький рівень шуму, широкий діапазон робочих вітрів, мала площа установки) дана конструкція має істотний недолік - низькі обороти (не більше 400 об / хв), тому поступається крильчатим вітроустановкам.

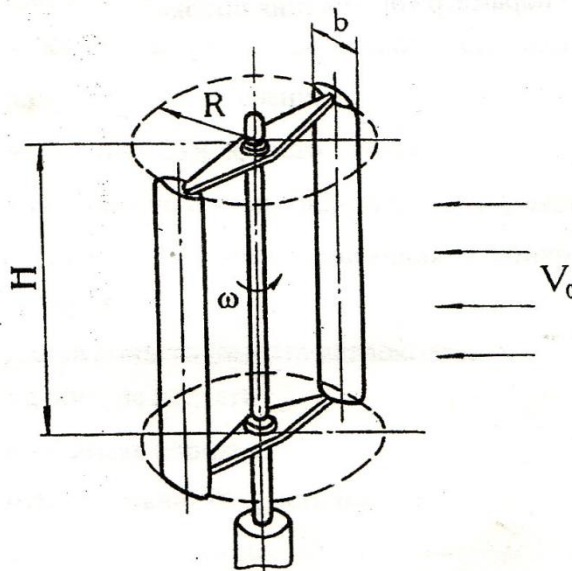


Рисунок 7 - Ротор Дар'є

У своєму первісному вигляді ротор Дар'є представляє собою вал із паралельними йому лопатями, закріпленими через радіальні штанги [30, 31]. Лопаті

встановлюються при нульових кутах відносно коловій траєкторії руху. Енергетична взаємодія потоку з лопаттю відбувається за рахунок формування на її поверхні результуючої відносної швидкості, що є векторною сумою швидкості потоку повітря та колової швидкості лопаті. В залежності від азимутального кута положення лопаті на круговій траєкторії формується різна по величині та куту набігання на лопать відносна швидкість. Використання профільованих лопатей дозволяє продукувати підйомну силу на її поверхні. Компонента підйомної сили направлена в напрямок обертання лопаті визначає величину тягового зусилля та, як наслідок, крутного моменту на валу вітроколеса [32, 33].

При нерухомому положенні ротора і високих значеннях швидкостей потоку повітря підйомна сила не виникає, по причині відсутності колової швидкості. Таким чином вітроустановки типу Дар'є характеризуються поганим самозапуском.

Одним з основних недоліків даного типу вітротурбіни є перемінність в часі кутів атаки відносної швидкості. В двох точках на круговій траєкторії вони досягають свого максимуму, в зонах перпендикулярності вектору колової швидкості лопаті та вектору швидкості вітру. Завдяки цьому на ротор вітроколеса діють синусоїдально пульсуючі сили, що потребує зміцнення та ускладнення конструкції.

Тому вітроколеса типу Дар'є необхідно досліджувати на особисті частоти коливань. При досягненні критичного значення пульсацій при обертанні вітроколеса можливе його руйнування за рахунок входу у резонансну зону.

Навіть при досягненні вітровими потоками значних значень швидкості ротор Дар'є може не запуснитися. У рідкісних випадках, вітроколеса можуть самостійно почати обертатися, якщо лопаті мають певну вигнуту форму [34, 35, 36].

Також недоліком такої компоновки вітряних турбін є те, що основна обертова маса знаходиться на периферії. Під час роботи лопаті перебувають під дією значних відцентрових навантажень. Для міцності конструкції необхідне посилення основних вузлів та механізмів. Тому за масоенергетичними показниками дані установки в програші в порівнянні з горизонтально-осьовими вітроколесами [37].

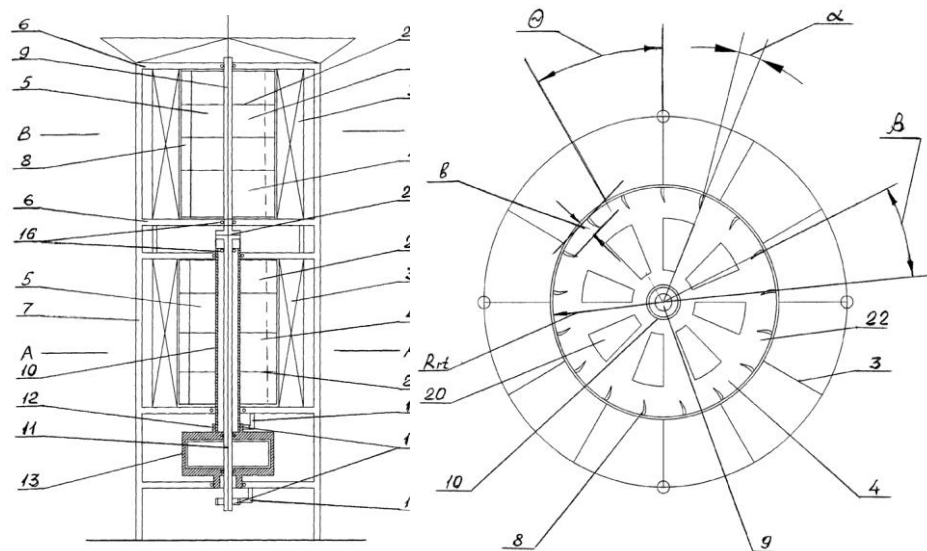


Рисунок 8 - Ротор Болотова

У роторної турбіні Болотова коефіцієнт використання енергії вітру збільшується на 25-30% в діапазоні швидкостей 6-20 м/с і залишається на рівні 30-40% при швидкостях вітру вище 20 м/с (до випробуваних 50 м/с), коли ВЕУ іншого типу не працює. В результаті утилізації енергії поривчастого вітру і збільшеного коефіцієнта використання вітру річна вироблення енергії стає в 1,5-3 рази вище, в порівнянні з пропелерними ВЕС [38, 39].

Достовірність цих даних підтверджується збігом отриманих результатів з експериментальними даними і експертними оцінками фахівців, що займаються питаннями розвитку, впровадження та використання вітрової турбіни Болотова.

Турбіни виготовляються на основі надійної наукової платформи і технічних рішень, які дозволили наблизитися до оптимального погодження механічних та електричних компонентів турбіни і значного спрощення конструктивної системи.

Завданням винаходу є створення вітроенергетичного агрегату з вертикальною віссю обертання, що забезпечує збільшення коефіцієнта використання енергії вітру, питомої вироблення електроенергії на 1 кВт встановленої потужності електрогенератора, спрощення конструкції направляючого апарату і складання блоків в колону при спорудженні багатомодульних ВЕУ, а також зменшення ваги і розмірів електрогенераторів з одночасним підвищенням їх питомої потужності при прямому (без редуктора) з'єднання вала генератора з валами блоків.

Технічний результат досягається тим, що у вітроенергетичному агрегаті, що включає раму, вітрову турбину, яка містить два циліндричних блоки, розташованих вертикально на одній геометричній осі і розділених кришками рами, кожен з яких має направляючий апарат для вступника повітря, який є статором турбіни з пластинами, електричний багатополосний вентильний генератор з ротором, мають щітковий вузол, зі статором і системами автоматичного керування виконаний з можливістю обертання статора в напрямку, протилежному напрямку обертання ротора, забезпечений центральним трубчастим валом, а ротор має центральний вал, що проходить всередині трубчастого вала статора, кожен блок вітрової турбіни складається з ярусів, розділених поперечними дисками, кожен ярус має направляючий апарат - статор, пластини якого виконані плоскими і встановлені радіально, і ротор, лопаті якого з'єднані з валом блоку, яруси складають нижню і верхню групи, об'єднані спільними валами, встановленими коаксіально, вал нижньої групи ярусів виконаний трубчастим і з'єднаний з валом статора вентильного генератора, а вал верхньої групи ярусів проходить всередині трубчастого валу нижньої групи блоків і з'єднаний з валом ротора вентильного генератора, лопатки роторів ярусів нижньої і верхньої груп встановлені з протилежно спрямованими кутами нахилу до радіуса ротора для забезпечення взаємно протилежного напрямку обертання роторів зазначених блоків.

Технічний результат досягається тим, що пластини статорів всіх ярусів блоків встановлені рівномірно по діаметру статора з відстанню між ними в межах кута $\theta=0,6-60^\circ$, а лопатки роторів ярусів виконані з поперечними перерізами у вигляді аеродинамічних профілів з хордами, що мають довжину $b=(0,01-0,7)R_{\text{рт}}$, де $R_{\text{рт}}$ - радіус ротора, встановлені рівномірно по діаметру ротора з відстанню між лопатками в межах кута $\beta=0,5-72^\circ$ і повернені від радіального напрямку на кут $\pm\alpha=0,1-89^\circ$ для обертання ротора однієї з груп ярусів за годинниковою стрілкою, а іншого - проти годинникової стрілки.

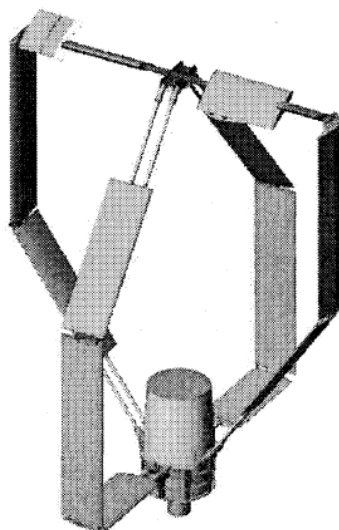


Рисунок 9 – ВЕУ-1 ГРЦ-Вертикаль

На основі побудови і аналізу математичних моделей, інженерних методів і оптимізаційних розрахунків силами вчених кафедри електротехніки Південно-Уральського державного університету (м Челябінськ) і ТОВ «ГРЦ-Вертикаль» виготовлена вітроенергетична установка з вертикальною віссю обертання потужністю 1 кВт ВЕУ-1(рис. 9). Процес розробки завершився створенням зразка ВЕУ, що повністю задовольняє початковим пропонованим високим технічним вимогам і підлягає монтажу на одному з корпусів ЮУрГУ з метою проведення всебічних натурних випробувань [40].

Історія розвитку досліджуваної теми пов'язана зі зростаючим інтересом розробників до вертикально-осьових конструкцій, незважаючи на те, що серед застосовуваних у світі вітрових турбін переважають горизонтально-осьові. Вони мають дещо більший коефіцієнт використання енергії вітру: 40-45% проти 35-40% у вертикально-осьових турбін. У той же час вертикально-осьові ВЕУ мають ряд переваг: це відсутність необхідності орієнтації на вітер, більш проста технологія виготовлення, малий шум і менша вартість.

Завдання науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи полягала в проектуванні малогабаритної, легкопереміщуваної вертикально-осьової ВЕУ потужністю не менше 1 кВт, в тому числі і для роботи в районах Півночі. Турбіна

ВЕУ повинна самозапускатися при швидкості вітру 2-3 м/с і забезпечувати робочий режим, починаючи з швидкості вітру 4 м/с. Розрахункова потужність в 1 кВт повинна реалізуватися при швидкості вітру 11 м/с. У конструкції використовується тихохідний генератор змінного струму на постійних магнітах, встановлений безпосередньо на валу турбіни. ВЕУ повинна безперервно робити при будь-якій швидкості вітру аж до 45 м / с зі стійкістю до 60 м / с. У зв'язку з цим для забезпечення міцності ВЕУ її обороти обмежуються аеродинамічними гальмами. Для аварійної ситуації передбачається гальмо повної зупинки [41].

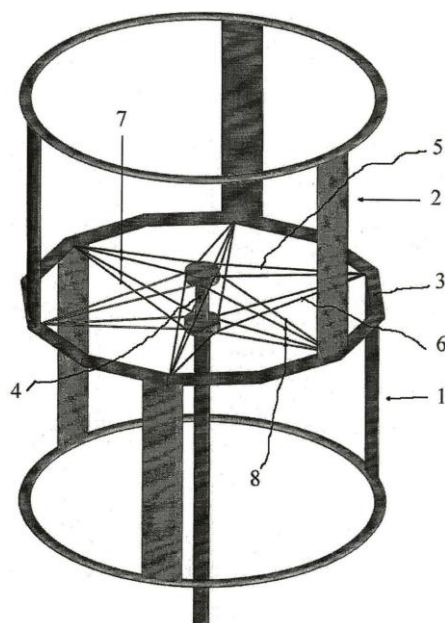


Рисунок 10 – Двоярусний ортогональний двигун

Інженерами «ГРЦ-Вертикаль» запатентовано вітроколесо [42], що містить кілька забезпечених лопатями ярусів, пов'язаних між собою несучими кільцевими елементами, які з'єднані з валом тросами, що виконують роль компенсуючих елементів. Троси утворюють одну або декілька періодичних структур, в кожній з яких частина тросів, що виходять від вищевказаних кільцевих елементів до маточини, має нахил по відношенню до горизонту вгору, а частина, що залишилася має нахил вниз. При цьому нахили тросів до горизонту в різних періодичних структурах різні, щоб забезпечити рознесення тросів різних структур у просторі. Для забезпечення стійкості вітроколеса крутильним коливанням і одночасного їх демпфірування продовження ліній половини тросів кожної періодичної структури

проходять з одного боку від осі обертання вітроколеса, а продовження ліній іншої половини - з іншого боку від осі обертання. Всі троси під час роботи вітроколеса і стоянки залишаються в розтягнутому стані. Винахід забезпечує зменшення впливу на маточину коливальної складової, що діє на лопаті вітроколеса з боку аеродинамічних сил і моментів вітроколеса, а через неї на підшипникові вузли, опору і щоглу при всіх вітрових режимах.

В результаті вивчення аеродинамічних характеристик різних профілів лопатей для ВЕУ малої потужності обрано профіль GAW-1, розроблений групою американських вчених [43], що відрізняється високими аеродинамічними характеристиками. Відносні координати профілю показані на рисунку 11.

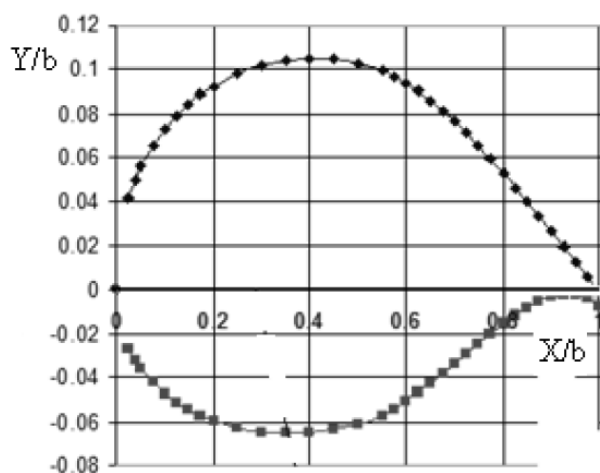


Рисунок 11 – Відносні координати профілю GAW-1

Для вітроагрегатів малої потужності хорда лопаті була прийнята рівною 160 мм, виходячи з технологічних обмежень, пов'язаних з використанням найбільш продуктивного і економічного методу екструзії при виробництві лопатей.

Звичайні профілі NASA, що широко застосовуються у вітроенергетиці, мають коефіцієнт тягового зусилля, при безвідривному обтіканні не вище 0,25 при коефіцієнті нормального тиску до 1,1. Коефіцієнт тягового зусилля C_t , розрахований для профілю GAW-1 майже у всьому діапазоні кутів атаки більше, ніж у профілів NASA 0015, 0020 [44].

Профіль GAW-1 характеризується більшим тяговим зусиллям при позитивному або негативному куті атаки, хоча при куті атаки, меншому за модулем 12° , сила у

профілю GAW-1 в будь-якому варіанті не менше, аніж у профілів НАСА.

При зниженні чисел Рейнольдса якість профілю GAW-1 різко знижується. Це проявилось при продувці моделі крила даного профілю, для якої при числах $Re = 2,8 \cdot 10^5$; $4,2 \cdot 10^5$ та $5,6 \cdot 10^5$ коефіцієнти підйомної сили C_y не перевищили 1,1, хоча при високих значеннях числа Рейнольдса вони досягали 2 і більше.

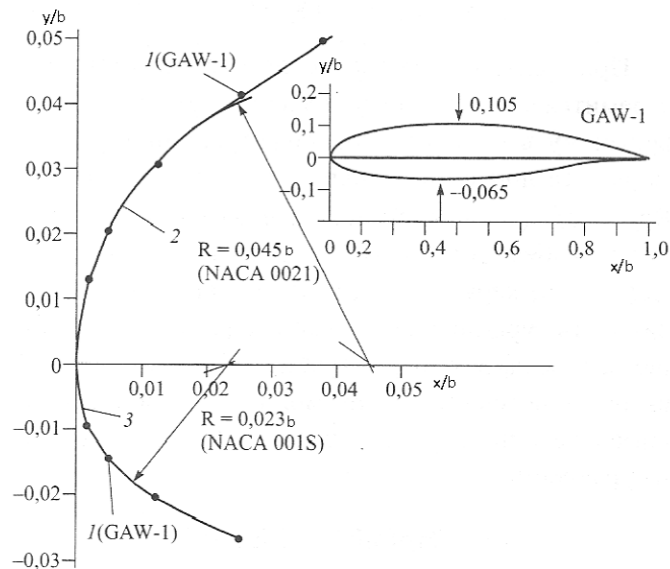


Рисунок 12 – Порівняльна характеристика АДХ профілю GAW-1 з профілем НАСА 0021.



Ротор Горлова або гелікоїдний ротор - модифікація ортогонального ротора. Обертання цього ротора більш рівномірне за рахунок закрутки лопатей, що значним чином знижує на опорні вузли динамічні навантаження і, тим самим, збільшується термін їх служби у порівнянні з опорними вузлами у ортогональних роторів. Але технологія випуску закручених лопатей значно ускладнена, що позначається на збільшенні їх ціни.

Рисунок 13 – Ротор Горлова

Гелікоїдна турбіна Горлова - це найбільш ефективний пристрій для отримання енергії на гідроелектростанціях, приливних станціях і навіть - у перспективі - на вертикальних вітрогенераторах вітряних ферм.

Патент на свій винахід Олександр Горлов, професор Північно-Східного університету Бостона, США, отримав ще в далекому 1995 році [45], але продовжував удосконалити свій пристрій. Розробки завершилися зовсім недавно. А в травні 2011 року Горлов отримав престижну європейську премію «Винахідник року».

Турбіна Горлова - це більш досконала модель ротора Дар'є. За допомогою гелікоїдної турбіни можна отримувати до 35% кінетичної енергії з води. Мінімальна швидкість потоку – 1,5 м/с, а мінімальний обсяг води – 1 м³. А значить, невеликі пристрої можна буде встановлювати навіть на неглибоких і спокійних річках.

Гелікоїдна турбіна Горлова працює так. Її вісь розташована перпендикулярно потоку води або повітря, а лопаті турбіни - по спіралі уздовж осі. Самі лопаті за формою нагадують крило літака - таким чином, ротор обертається тільки в одному напрямку. Потоки води або повітря, за рахунок спіралевидної форми турбіни, з максимальною ефективністю обертають лопаті. Швидкість їх обертання в два рази вище, ніж швидкість потоку.

1.4 Методи дослідження аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів.

1.4.1 Фізичне моделювання робочого процесу ортогональних роторів

Аеродинамічний розрахунок будь-якого об'єкту, насамперед пов'язаний з визначенням діючих на нього аеродинамічних сил і моментів, а також з визначенням величини і напрямку швидкості відносного потоку повітря. Це завдання в ряді випадків може бути вирішено теоретичним шляхом, проте зважаючи на велику складність розглянутих в аеродинаміці явищ теоретична схема не завжди достатньо точно їх описує і експериментальний шлях виявляється в більшості випадків більш надійним. Звідси ясно, чому в аеродинаміці експеримент отримав настільки великий розвиток. Експеримент завжди буде меншим за обсягом і успішнішим, якщо він буде вестися по шляху, заздалегідь освітленому і обстеженому теорією. Отже, методика проведення експерименту повинна бути ретельно продумана і уточнена за допомогою тих теоретичних моделей робочого процесу, які повинні передувати всякому достовірному дослідженню [46].

На сьогодні, аеродинамічний експеримент набув широкого розвитку. Методи, що застосовуються для його здійснення, дуже різноманітні. В основі багатьох досліджень лежить принцип звернення руху. Цей принцип полягає в тому, що силова картина взаємодії твердого тіла і потоку не змінюється від того, набігає потік на нерухоме тіло, чи тіло рухається в нерухомому середовищі. Важливо лише, щоб швидкість руху тіла і швидкість незбуреного потоку в разі звернення руху були рівні одна одній. Цей принцип звернення постійно застосовується в аеродинамічних дослідах. Відповідно до принципу звернення руху всі методи дослідження можуть бути розділені на дві групи [47]:

- методи дослідження, при яких середовище нерухоме, а тіло рухається;
- методи дослідження, при яких тіло нерухоме, а середовище рухається.

Кожна група з перерахованих вище включає ряд експериментальних шляхів отримання відносного руху тіла і середовища, розроблених і ретельно перевірених за час їх багаторічного застосування.

До першої групи належать такі основні способи отримання відносного руху тіла і середовища:

1) прямолінійний рух тіла:

- а) падіння тіла;
- б) аеродинамічний візок;
- в) льотні випробування;

2) криволінійний рух тіла:

- а) ротативна машина;
- б) льотні випробування.

До другої групи належать:

- 1) використання природного вітру;
- 2) випробування в аеродинамічних трубах.

Зауважимо, що в більшості випадків досліди ведуться в повітряному середовищі; інші гази і вода застосовуються дуже рідко.

Зважаючи на істотні недоліки методу термодинамічного дослідження з використанням природного вітру виникла думка про використання штучного вітру або штучного потоку повітря створюваного, наприклад, за допомогою вентилятора. Цей спосіб вимірювання аеродинамічних сил виявляється найбільш зручним і в той же час найбільш точним. Нерухомість (в межах дуже маленьких переміщень, необхідних для вимірювання сил) випробуваного об'єкта зручна для застосування точних динамометричних пристроїв, вимірюючи аеродинамічні сили. Точність вимірювання такими нерухомими динамометрами більше, ніж точність вимірювання приладами з менш зручними записом і розташуванням, що зазвичай має місце в дослідах, де тіло рухається відносно нерухомої середовища. Крім того, створюючи штучно повітряний потік, можна підібрати такі умови експерименту, які б найближче відповідали поставленій задачі.

Найпростіший спосіб отримання штучного потоку полягає у використанні вентилятора, що направляє повітряний струмінь на досліджуваний об'єкт. Такий вентилятор, як показує досвід, створює звужуючу струмінь, в якій можна встановити випробуваний об'єкт. Однак цей спосіб мало відрізняється від способу,

що використовує природний вітер. Справа в тому, що хоча вентилятор і створює більш менш фіксовану струмінь, але швидкість в цій струмені доволі непостійна і за величиною і за напрямком - потік сильно закручений за вентилятором і характеризується сильними пульсаціями.

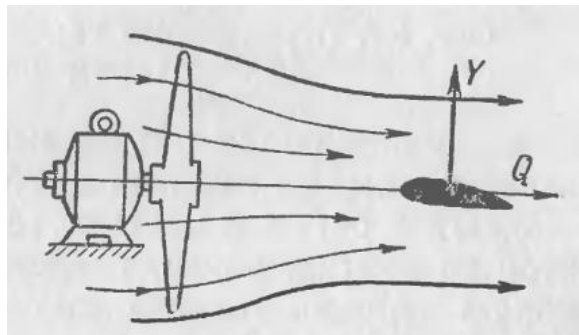


Рисунок 17 – Найпростіший спосіб отримання штучного потоку шляхом нагнітання повітря осьовим вентилятором

Деякого поліпшення якості потоку можна досягти застосуванням жорстких стінок, що визначають межі потоку, і спрямляючої решітки, що вирівнює потік і зменшує його закручування.

Подальший розвиток подібної схеми полягає в обмеженні стінками так званої робочої частини труби, тобто місця де встановлюється об'єкт випробування. Така схема може бути названа схемою відкритої труби, що працює на нагнітання, із закритою робочою частиною, так як робоча частина труби знаходиться за вентилятором, що нагнітає в неї повітря. Вперше подібну трубу виконав відомий російський вчений К. Е. Цюлковський.

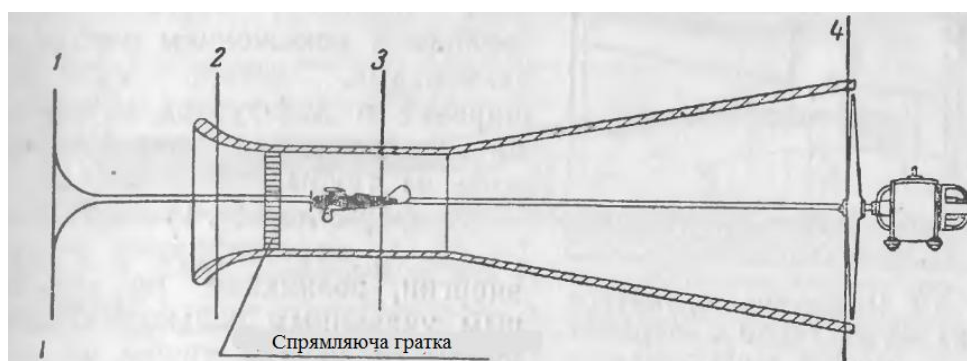


Рисунок 18 – Схема відкритої аеродинамічної труби з закритою робочою частиною

Надалі було з'ясовано, що при установці всмоктуючого, а не нагнітаючого вентилятора потік стає рівномірнішим, пульсації значно слабшають і зменшується закручування потоку. Тому в трубах подібного типу перейшли до схеми відкритої труби, що працює на всмоктування із закритою робочою частиною. Далі було встановлено, що в трубі, в якій площа вихідного перетину дорівнює площі вхідного перетину, дуже великі втрати енергії і потужність мотора, що обертає вентилятор, використовується нерационально. Причина цього полягає у відомому з гідравліки законі, який формулюється таким чином: втрачений при раптовому розширенні напір дорівнює напору втрачених при розширенні швидкостей. Інакше кажучи, якщо потік виходить з аеродинамічної труби в приміщення з нерухомим повітрям, то напір, втрачений на гідравлічний удар, дорівнює швидкісному напору потоку на виході з труби. При великих швидкостях на виході буде велика втрата напору, а отже, і втрата енергії. Зважаючи на це було запропоновано знижувати швидкість на виході з труби в порівнянні зі швидкістю в робочій частині. Для цього в схему труби ввели так звані дифузори - розширення труби з прямолінійними або криволінійними твірними.

Одночасно з розвитком аеродинамічних труб з закритою робочою частиною розвивався й інший тип труб - з відкритою робочою частиною. Ці труби мали ряд експлуатаційних переваг: по монтажу досліджуваних об'єктів, їх доступності під час проведення експерименту і наочності самого експерименту. Можливість здійснення експериментальних установок з відкритою робочою частиною ґрунтувалася на властивості повітряного потоку зберігати свою форму на вільній ділянці труби від виходу з сопла до приймального насадка. Довжина вільної ділянки, що не обмежена жорсткими стінками, пов'язана з розмірами сопла, з якого повітря виходить, і не може бути більше деякої певної величини, що встановлюється досвідом. Розмір приймального насадка теж лімітується певними межами, перехід яких викликає порушення правильної роботи труби.

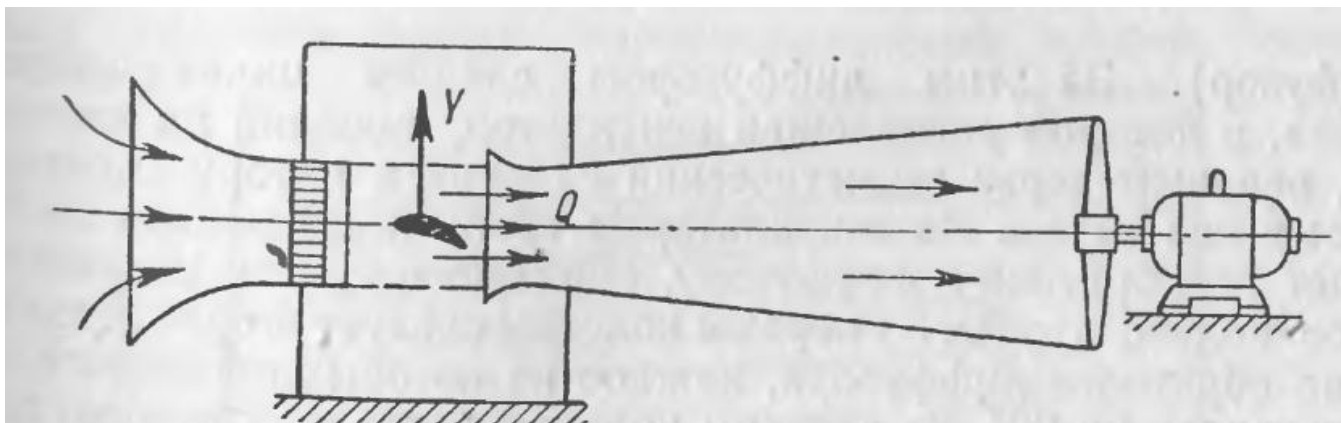


Рисунок 19 – Схема аеродинамічної труби з відкритою робочою частиною

Інший тип аеродинамічної труби з відкритою робочою частиною характеризується атмосферним тиском в робочій частині. Труби Т-5 ЦАГІ і Т-1 МАІ належать до цього типу. Як бачимо, труба являє собою замкнутий канал 7 з відкритою робочою частиною 4. Найвужчим перетином труби є перетин робочої частини, далі повітряний потік потрапляє в приймальний насадок 5, що розширюється.

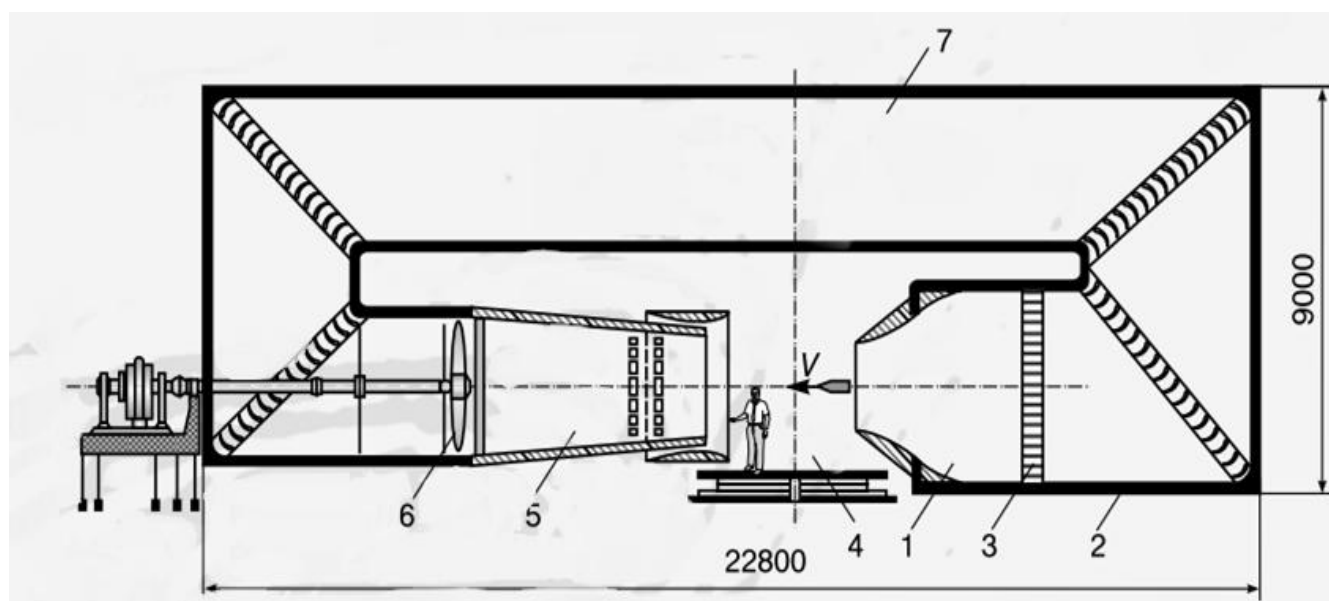


Рисунок 20 - Аеродинамічна труба Т-5 ЦАГІ.

За цим дифузором розміщена циліндрична вставка, в якій розташований вентилятор 6, який встановлено на довгому валу, проведеному через герметичний сальник до мотора змонтованого поза трубою. За вентилятором потік повертає на 90° і тече по зворотному дифузору, що утворює так зване перше коліно труби. За

першим коліном слід друге і третє коліна зворотного дифузора, кожне з яких утворюється шляхом повороту на 90° . За третім коліном повітря потрапляє в форкамеру 2, що представляє собою найбільш широке місце каналу труби. У форкамері звичайно міститься спрямлюється решітка 3 і насадок 1, що звужує потік і створює підвищену швидкість в робочій частині труби. На всіх поворотах потоку з метою зменшення втрат енергії встановлені поворотні лопатки, що мають плавну форму і розбивають потік на кілька еквідистантних струменів. Принципово труба описаного типу відрізняється від двох раніше описаних труб, так як у відкритій робочій частині створюється атмосферний тиск, який дещо падає по мірі наближення до вентилятора. За вентилятором тиск відразу зростає і далі по всій трубі тиск має значення більше атмосферного, у той час як в раніше описаних трубах тиск всюди був менше атмосферного [48].

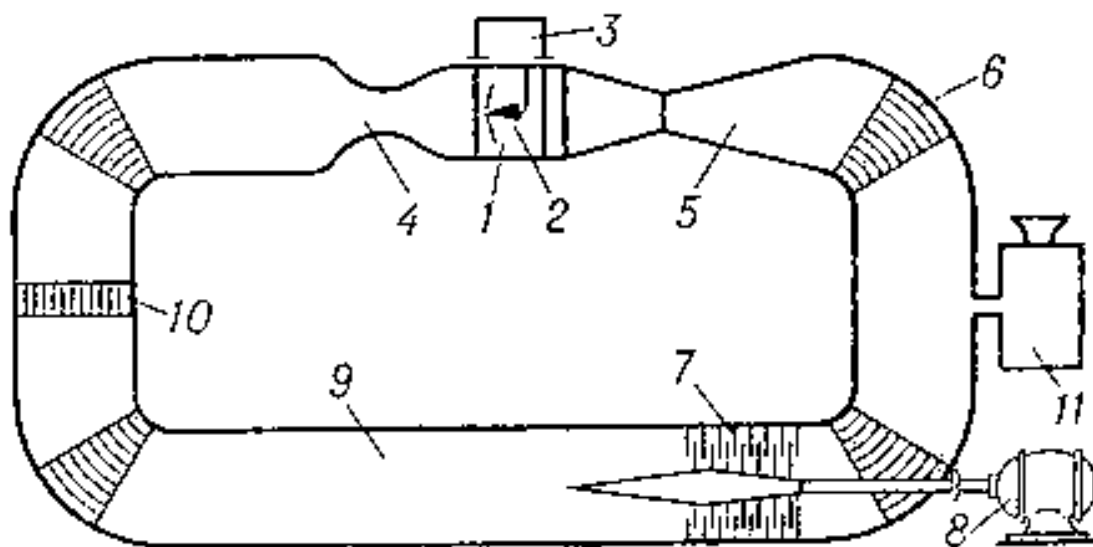


Рисунок 21 – Схема замкнутої аеродинамічної труби з закритою робочою зоною.

У зв'язку з ростом необхідних швидкостей потоку в робочій частині труби виникла потреба створення замкнутих аеродинамічних труб із закритою робочою зоною. Вперше подібна схема була запропонована видатним російським аеродинаміком Слесарєвим В.А. Вона складається з робочої частини 1, що зазвичай має вигляд циліндра з поперечним перерізом у формі кола або прямокутника (іноді

еліпса або багатокутника). Досліджувана модель 2 кріпиться державками до стінки робочої частини або до аеродинамічних ваг 3. Перед робочою частиною розташоване сопло 4, яке створює потік газу із заданою і постійною по перетину швидкістю, щільністю і температурою. Дифузор 5 зменшує швидкість і відповідно підвищує тиск струменя, що виходить з робочої частини. Спрямляюча решітка 6 вирівнює поле швидкостей. Вентилятор 7, що приводиться в дію силовою установкою 8, компенсує втрати енергії струменя. Радіатор 10 забезпечує сталість температури газу в робочій частині. Якщо в якому-небудь перетині каналу аеродинамічної труби статичний тиск повинен дорівнювати атмосферному, в ньому встановлюють клапан 11.

В даний час схема труби замкнутого типу з закритою робочою частиною є особливо цікавою для практичного використання, так як вона характеризується відсутністю пульсацій потоку, підвищеною економічністю і зменшеним шумом, виробленим вільною струминою.

1.4.1 Одномірна імпульсна модель

Розрахунок АДХ (потужності, крутного моменту, сили опору) вітродвигуна роторного типу з вертикальною віссю обертання початково проводиться на базі імпульсної моделі з однією трубкою току. Була поставлена задача відпрацювати механізм оцінки основних інтегральних характеристик вітроколеса, провести розрахунок аеродинамічних сил та моментів для окремих типових конструкцій роторів ортогональних установок, вивчити вплив геометричних розмірів ротора та параметрів лопатей на АДХ вітрових двигунів, узагальнити результати аналізу у виді деяких практичних рекомендацій [49]. Розрахунок АДХ та параметричних досліджень виконувався для вітроколес, схеми яких зображені на рисунку 22. Постановка вказаної стаціонарної задачі допускає, що лопать ротора ВД відчуває при русі таку ж силову взаємодію з боку потоку повітря як і ізольоване крило однакового подовження з тими ж значеннями кутів атаки. Набігаючий потік вважається постійним та рівномірно розподіленим по розмаху лопаті [50].

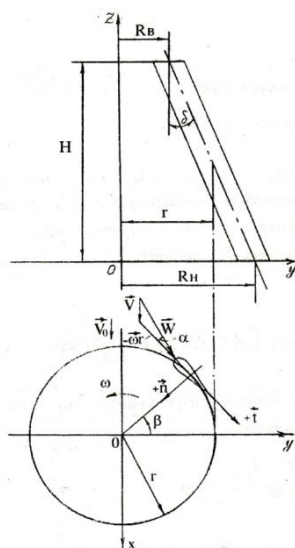


Рисунок 22 – Розрахункова схема ротора

1.4.2 Вихрова модель розрахунку

Імпульсні моделі розрахунку АДХ ортогональних ВД дозволяють с приблизною точністю оцінити інтегральні АДХ вітроколів - коефіцієнт використання енергії вітру, крутний момент, потужність, лобові та бокові сили. Сильно навантажені вітроколеса, взаємний вплив лопатей, нестационарні умови їх обтікання, проходження на тилівій ділянці траєкторії області вихрового сліду та виникаючі при цьому навантаження потрібно досліджувати на базі вихрових моделей.

Із-за суттєво різних процесів взаємодії вітрового потоку с лопатевою системою пропелерного та ортогонального вітроколів використання дискової вихрової теорії до аеродинамічного розрахунку ортогональних ВД недоцільне. Найбільш перспективним теоретичним методом дослідження картини обтікання роторів та визначення локальних навантажень на лопаті представляється метод дискретних вихрів [51, 52].

Зацікавленість представляє дослідження як полів швидкостей, так і аеродинамічних навантажень на лопаті та в цілому на вітроколесо, що обертається.

Для розрахунку АДХ роторів високої швидкохідності, діапазон зміни робочих кутів атаки лопатей котрих при русі по круговій трасі невеликий, оправданою в

першому приближенні можна вважати схему, яка включає безвідривне нестационарне обтікання лопатей вітроколеса.

Вітроколесо представляється складальним із декількох розміщених по колу прямих паралельних осі обертання лопатей нескінченного розмаху, які мають тонкий симетричний профіль. В такому випадку обтікання кожної лопаті рівнодійне обтіканню профілю, який обертається навкруги нерухомої системи координат. Будемо вважати задачу плоскою. Середовище нев'язке нестиснюване, обтікання профілів моделюють системою дискретних вихрів .

Сумарні дискретні вихрі та контрольні точки розмістимо вздовж хорди кожного профілю, вільні вихрі - за кромкою профілю на вільній хорді (рис.23). Дискретні вихрі розташовані на лініях на відстані x_A від кінця ділянок розбиття хорди. Інтенсивність сумарних вихрів визначається на профілі із умови не протікання в контрольних точках та гіпотези Жуковського-Чаплигіна на задній кромці. Вільні вихори в сліді рухаються разом з частинками середовища, а їх інтенсивності зберігаються незмінними в часі.

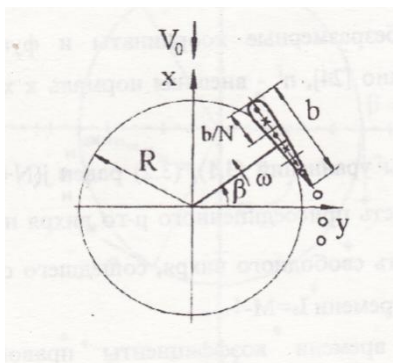


Рисунок 23 – Розположення вихрів та контрольних точках.

1.5 Постановка задач та методів дослідження.

Основною метою даного дослідження є виявлення механізму впливу на ортогональне вітроколесо типу Н-Дар'є з метою покращення основних аеродинамічних характеристик та збільшення енергетичних показників при незмінних геометричних параметрах вітрової турбіни. А також вирішення питання самозапуску, оскільки, на наш погляд, даний аспект робочого процесу ортогонального вітроколеса є не достатньо вивченим і, на сьогоднішній день, не є

конструктивно реалізованим.

Для продуктивної роботи за даними напрямками визначено наступні задачі дослідження:

- визначити фізичну природу підвищення аеродинамічних характеристик ортогональних вітроколiс;
- використати чисельний експеримент для визначення аеродинамічних характеристик профільованих лопатей;
- розрахувати аналітичним методом оптимальні характеристики потоку повітря для виникнення максимальної тягової сили на валу вітроколеса;
- визначити можливість практичного використання теорії про зміну вектору відносної швидкості для підвищення ефективності роботи ортогональної вітрової турбіни;
- експериментальним шляхом довести раціональність зміни вектору відносної швидкості для підвищення аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів;
- розробити новий тип лопатей для покращення процесу самозапуску вітроколеса шляхом комбiнування використання в робочому процесі ортогональних вітродвигунів підйомної сили та сили лобового опору;
- провести експериментальні дослідження запропонованих лопатей та обґрунтувати можливість їх використання в якості робочих органів ортогональних вітродвигунів.

Для аналітичного визначення інтегральних характеристик вітрової турбіни скористаємося одноструменевою імпульсною моделлю вітроколеса. Розрахуємо залежності $C_p=f(\theta)$ для вітроколеса з лопатями симетричного профілю NACA 0015. Отримані дані приймаємо за базові.

Для збільшення потужності вітрової турбіни пропонуємо розглянути модель ідеального робочого процесу основу на гіпотезі зміщення вектору відносної швидкості для створення в кожній точці кругової траєкторії руху оптимального кута атаки та величини сумарної швидкості потоку, що натікає на лопать. Для цього з кривої Лілієнталя, залежності $C_x=f(\alpha)$ та $C_y=f(\alpha)$, для заданого профілю обираємо кут

атаки α , що передуює виникненню максимальної результуючої аеродинамічної сили. В якості вхідних умов розрахунку визначаємо постійність відносної швидкості та кута атаки на всій траєкторії руху лопаті: $\bar{W} = const, \alpha = const$.

Аеродинамічні показники профільованої лопаті знаходимо з використанням числового експерименту в програмному комплексі ANSYS CFX [53]. Опираючись на експериментально отриману графічну залежність досягаємо максимальної подібності отриманих даних шляхом варіювання моделлю турбулентності та якістю розрахункової сітки на поверхні досліджуваного об'єкта.

Отримані дані по впливу зміни кінематичних показників потоку повітря в зоні вітроколеса на його енергетичні характеристики перевіряємо на експериментальному стенді – аеродинамічній трубі відкритого типу з закритою робочою зоною.

Також експериментальним шляхом проводимо дослідження процесу самозапуску вітроколеса. Випробовуємо різні типи лопатей та проводимо порівняльний аналіз отриманих результатів. Опираючись на нього доводимо доцільність використання певного типу профілів.

1.6 Висновки.

Беручи до уваги проведений літературний огляд, можна зробити висновок., що на сьогоднішній день вертикально-осьові вітроколеса є менш дослідженими в порівнянні з горизонтально-осьовими установками. Теоретично доведено можливість досягнення ефективної роботи даних установок в значних діапазонах швидкостей. Відсутність механізму орієнтації на вітер дозволяє отримувати енергетичні показники на промислових ВЕУ навіть вищі ніж для горизонтально-осьових вітроколес. Дані ВД доцільно використовувати для вітрових потоків малої потужності при швидкостях вітру 3-5 м/с.

Для аналітичного прогнозування енергетичних характеристик доцільно скористатися імпульсною моделлю вітроколеса. Адекватність аналітичних результатів перевірити на експериментальному стенді – аеродинамічній трубі. А також провести порівняльний аналіз отриманих даних з дослідженнями. Що

проводилися раніше.

2. САМОЗАПУСК ВІТРОКОЛЕСА. ГНУЧКІ ПРОФІЛІ КОМБІНОВАНОГО ПРИНЦИПУ ДІЇ

2.1 Покращення процесу самозапуску вітроколеса Н-Дар'є

Як вже було зазначено ортогональні вітродвигуни зазвичай генерують дуже малий пусковий момент і що навіть тоді, коли вони починають рухатися вони можуть не прискоритися за межі "мертвої зони" в діапазоні $0,7 < \theta < 2,7$, де енергія вітроколеса має від'ємні значення.

В більшості випадках наукові дослідження спрямовані на потужні вітроелектричні установки. У цьому контексті проблема самозапуску вітроколес типу Дар'є має менше значення, ніж для установок малої та середньої потужності: Потужні турбіни зазвичай мають лопаті більшого потовщення, ніж менші турбіни, і відповідно більше значення числа Рейнольдса. Ця різниця має велике значення, особливо коли лопаті є нерухомими або повільно обертаються і число Рейнольдса є мінімальним. Більшість відомих профільованих лопатей погано працюють при невеликих значеннях числа Рейнольдса. Продуктивність різко поліпшується зі збільшенням відносної товщини [54].

Якщо до ВЕУ підходе ззовні електрична енергія, то питання виходу на робочі режими вирішується шляхом примусового розгону від асинхронного електродвигуна. З цих причин, заходи щодо поліпшення самозапуску ортогональних вітроколес з профільованими лопатями, як правило, згадується в літературі лише поверхнево і значною мірою не привертають увагу науковців. Тому даний аспект не дозволяє використовувати ВЕУ даного типу для систем з необхідним надійним самозапуском.

На сьогоднішній день існує велика кількість аналітичних і числових методів прогнозування АДХ вертикально-осьових установок. Порівняльний аналіз отриманих розрахункових даних з експериментальними говорить про чітку подібність енергетичних характеристик отриманих різним методами. Це говорить про можливість розрахунку інтегральних характеристик на робочих режимах вітроколеса. Але момент старту та низьких обертів не до кінця досліджений і потребує глибшого аналізу.

У роботі [55] зазначається, що ротор Дар'є може запуститись за певних умов, посилаючись на вітроустановку Магдалену в Канаді, як приклад ВЕУ з задовільними характеристиками самозапуску. В даній установці використано оригінальний профіль НАСА, який при $Re = 300000$ показав, що турбіна може самостійно розкручуватися. Однак, $Re = 300000$ може бути реалістичний тільки для великих вітроколосів зі значною швидкістю потоку повітря. Це значення не можливо досягнути для невеликого вітродвигуна при малих швидкостях вітру. При низьких Re продуктивність вітроустановки сильно падає, оскільки генерованої тягової сили не достатньо для виходу лопатей з зони від'ємного крутного моменту. Тому не дивно, що більшість ортогональних турбін не можуть вийти з «мертвої зони» без зовнішньої сили, в якості якої може бути використаний додатково встановлений на валу основного вітроколоса ротор Савоніуса

У роботі [56] використано невелике вітроколоса Савоніуса, як допоміжний ротор, встановлений на валу ротора Дар'є, для підвищення пускового моменту. Як правило його розміри становлять 10% від розмірів основного ВД. Але в ряді практичних робіт доведено, що більший пусковий момент може бути отриманий шляхом відповідного вибору аеродинамічних профілів.

Опублікували дані, основані на теоретичному моделюванні, які свідчать про те, що збільшення коефіцієнту підйомної сили C_y збільшує величину безрозмірного пускового моменту коефіцієнт C_Q [57]. Але в кожному з розглянутих випадків підвищення відбувалося за рахунок збільшення відносної товщини профілю, що приводе до зростання числа Рейнольдса на поверхні лопаті та виникнення необхідної силової взаємодії потоку повітря з вітроколосом.

Порівнюючи теоретичну продуктивність помірно вигнутого крила Геттінген 420 з симетричним профілем НАСА 0012 з аналогічною товщиною [58] можна зробити висновок, що вигнута лопать буде виробляти більший крутний момент в більш широкому діапазоні кутів положення на круговій траєкторії, а значить і зросте сумарна аеродинамічна сила на один оберт вітроколоса. Використання вигнутих профілів покращує процес самозапуску вітроколоса в порівняння з

такими ж вітродвигунами, основанийими на симетричних профілях.

Передбачено [59], що турбіна з вигнутою лопаттю НАСА 4415 повинна самозапущатися без зовнішнього впливу при швидкості вітру 10 м/с ($Re = 200000$).

У роботі [60, 61] досліджено підйомну силу і силу опору на крилах утворених шляхом обгортання тканиною круглого циліндра і з'єднанням двох сторін разом з утворенням гострої кромки. використання таких лопатей на ортогональних вітродвигунах дозволило вирішити питання самозапуску та отримати відносно високі показники ефективності.

Проведено випробування ОВД з гнучкими лопатями, встановленими на жорсткій рамі з різними коефіцієнтами заповнення ротора σ в діапазоні від 0,38 до 2,6 [62]. Виявлено, що дані лопаті генерують значний пусковий момент. Значення $C_p \max$ від 0,1 до 0,3 отримані в діапазоні $\theta=1$. Виготовлене вітроколесо площею $3,5 \text{ м}^2$ з 5 вітрил, яке виробляє крутний момент 30 Нм.

2.2 Гнучкий профіль НАСА 0015 парусного типу.

Опираючись на досвід проведених робіт по покращенню процесу самозапуску ортогонального вітродвигуна типу Н-Дар'є, запропоновано використати профільовані лопаті парусного типу.

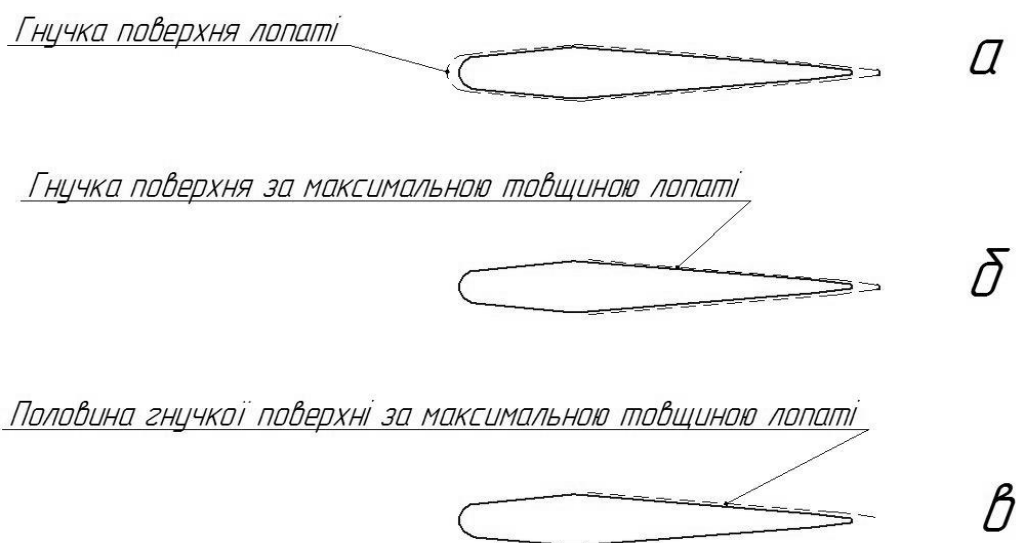


Рисунок 24 – Запропоновані конструкції парусних лопатей профілю НАСА 0015.

В основу даної ідеї покладено комбінування робочих процесів вітроустановок, що працюють на різниці лобових опорів з вітроколесами основаними на виникненні підйомної сили.

Прогнозується, що при низьких швидкостях на гнучкій поверхні лопаті буде формуватися карман, що дозволить збільшити силу лобового опору при русі лопаті «від вітру». Даний ефект приведе до збільшення тягової сили та, як наслідок, підвищення крутного моменту на валу вітроколеса. Формування карману повинне покращити процес самозапуску та зменшити, а то і повністю ліквідувати, мертву зону в енергетичній характеристиці турбіни.

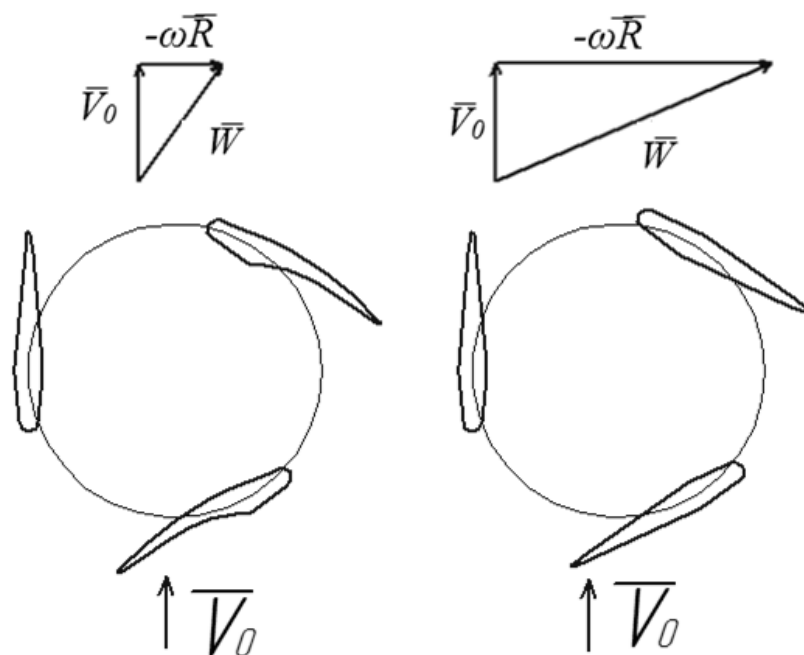


Рисунок 25 – Прогнозована поведінка парусних лопатей

При досягненні лопаттю середніх значень колової швидкості в межах $\theta=0,5-1$ гнучка частина випрямляється і починає працювати як стандартний симетричний профіль. Випрямлення відбувається за рахунок зменшення діапазону кутів атаки відносно швидкості, що приводе до повторення гнучким елементом напрямку дії відносно швидкості.

Технологія виготовлення такого типу лопатей полягає у наступному:

- обирається базовий профіль. В даному випадку обрано профіль НАСА 0015. З атласу профілів беремо координати точок зовнішнього контуру та, для

визначеної довжини хорди лопаті, в графічному редакторі зображаємо контур.

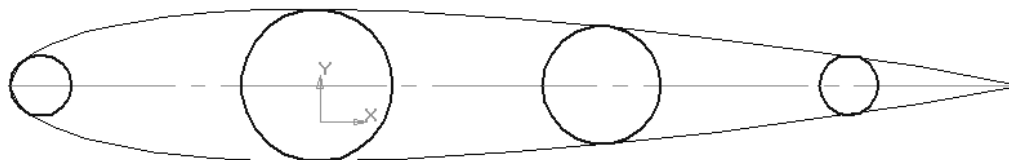


Рисунок 26 – Контур профільованої лопаті NACA 0015 з вписаними колами на критичних точках

- для створення каркасу профілю на ескізі визначаємо критичні перерізи та вписуємо в них кола відповідного до ширини лопаті діаметру. Критичними точками контуру профілю є вхідна, вихідна кромка; максимальна ширина профілю та деякі проміжні точки, для зменшення прогину гнучкого елемента.

- за визначеними координатами та діаметрами вписаних кіл виготовлюємо пластиковий каркас, що складається з двох планок та закріпленими між ними циліндричними стержнями заданого діаметру.

- каркас обтягуємо цупкою тканиною таким чином, щоб на вихідній кромці лопаті сформувалася вільна частина. Довжина вільно звисаючої частини тканини становить 10% від хорди лопаті. Тканина повинна бути щільною і водночас податливою для швидкої реакції на зміну напрямку вектору швидкості та ефективною взаємодією з потоком повітря.

2.3 Висновки

З проведеного огляду робіт, спрямованих на покращення сапозапуску вертикально-осьових вітроколів можна зробити висновок, що для вітроустановок малих та середніх розмірів питання самозапуску становить більш складну задачу, ніж для вітроустановок великих розмірів розрахованих для високих потужностей. Покращення самозапуску можливе при підвищенні числа Рейнольдса шляхом

збільшення відносної товщини профілю лопаті. Даний метод має один негативний наслідок – збільшення товщини лопаті призведе до зниження швидкості вітроколеса.

Найширшого розповсюдження набув метод встановлення допоміжного стартеру на валу вітроколеса. В основному в якості пускового механізму використовують ротор Савоніуса. Його виконують приблизно в межах 10% від розмірів основного вітроколеса. Недоліком даної компоновки є зниження ефективності роботи комбінованої вітроустановки при виході на розрахункові режими роботи, за рахунок створення стартером додаткового аеродинамічного опору на більших колових швидкостях.

Зацікавленість у питанні покращення самозапуску викликає використання гнучких лопатей. Дані робочі органи мають можливість автоматичного підстроювання геометрії профілю лопаті під режими роботи вітроколеса. Така функція лопатей дозволяє ліквідувати «мертву зону» в енергетичній характеристиці ортогональної вітротурбіни та отримувати високі показники ефективності роботи при розрахункових режимах.

Виходячи з вище сказаного, можна зробити висновок, що дослідження впливу гнучких лопатей на аеродинамічні характеристики ортогональних вітродвигунів типу Н-Дар'є потребує детальнішого вивчення.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ОРТОГОНАЛЬНОГО ВІТРОДВИГУНА

3.1 Робочий процес ортогонального вітродвигуна з профільованими лопатями.

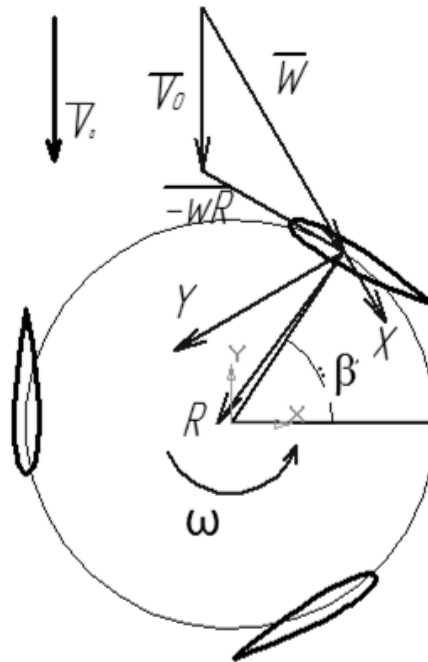


Рисунок 27 – Вектори швидкостей та сил, що діють на лопать при обертанні

Розглянемо робочий процес вертикально-осьової вітрової турбіни з профільованими лопатями розташованими паралельно осі обертання вітроколеса. Він характеризується складністю фізичних процесів та перемінністю сил, що діють на лопать при енергетичній взаємодії з потоком повітря. Рухаючись по круговій траєкторії лопать колеса постійно змінює орієнтацію відносно вектору швидкості вітру \bar{V}_0 . Силова взаємодія лопаті з потоком відбувається за рахунок сформованої на поверхні відносної швидкості \bar{W} , що визначається векторною сумою швидкості потоку \bar{V}_0 та миттєвої колової швидкості лопаті $\omega\bar{R}$ [63]. Тому кінематичні характеристики потоку на поверхні лопаті перемінні у часі та мають пульсуючий вид. Відносна швидкість \bar{W} , в залежності від азимутального кута положення лопаті на круговій траєкторії, змінюється за величиною та напрямком натікання на профіль [64].

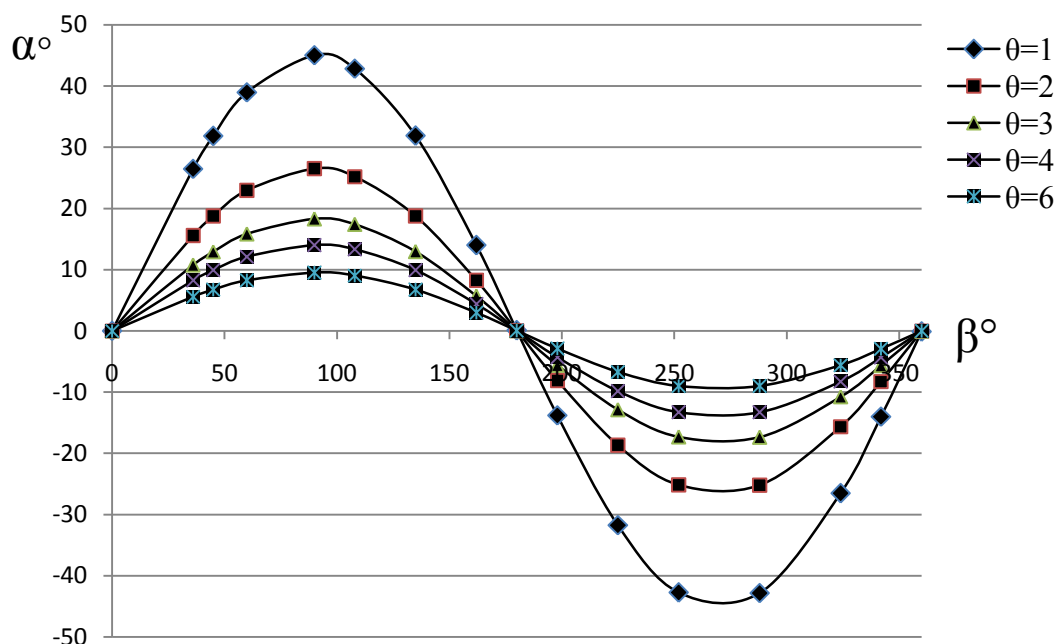


Рисунок 15 – Зміна кутів атаки для різних швидкохідностей ротора в залежності від азимутального кута положення лопаті на коловій траєкторії

Завдяки специфічній геометрії на поверхні профілю формуються зони високого та низького тиску. Різниця тисків приводе до виникнення результуючої сили, що розкладається на компоненти: перпендикулярна вектору відносної швидкості \vec{W} - підйомна сила Y , паралельна – сила лобового опору X . При зміні кутів атаки потоку змінюються величини сил. Закон залежності аеродинамічних сил певного профілю від кутів атаки потоку повітря визначається експериментальним методом шляхом продувки в аеродинамічних трубах [65].

Проекція результуючої аеродинамічної сили на дотичну до колової траєкторії руху лопаті визначає напрямок та величину тягового зусилля F_t . Чим менший діапазон кутів атаки на один оберт вітроколеса, тим ширший сектор виникнення позитивної тягнутої сили, тим стабільніша робота установки. Пульсації сил, що діють на лопать, приводе до змінного крутного моменту на валу вітроколеса.

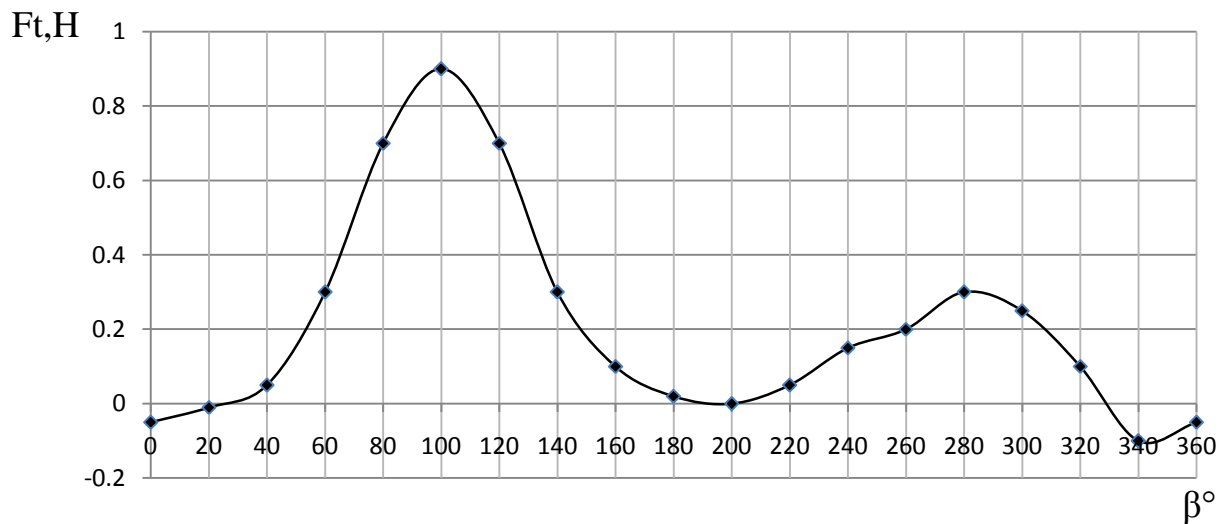


Рисунок 16 – Зміна тягової сили на коловій траєкторії руху лопаті $F_t = f(\beta)$

Тягове зусилля досягає свого максимуму при перпендикулярному пересіканні лопаттю навітряного потоку. Цей процес залежить від кута установки лопаті у вітроколесі та спостерігається в зоні азимутального кута $\beta=80^\circ \dots 120^\circ$ на навітряній стороні та $\beta=260^\circ \dots 300^\circ$ на підвітряній стороні. Протікання повітря через об'єм вітроколеса супроводжується втратою енергії на тертя частинок повітря між собою та з лопатями, вихроутворення та інше, що приведе до зменшення тягового зусилля на підвітряній стороні колеса [66].

Частина траєкторії руху лопаті «на вітер», в зоні нульового кута β , характеризується максимальним значенням відносної швидкості \bar{W} та близькими до нуля кутами атаки. Завдяки цьому в даному секторі виникає від'ємне тягове зусилля і лопать працює в режимі аеродинамічного гальма.

3.1 Одноструминна імпульсна модель вітроколеса.

Розрахунок аеродинамічних характеристик вітродвигуна з вертикальною віссю обертання спершу проводимо на базі імпульсної моделі з однією трубкою току. Встановлена задача відпрацювання механізму оцінки аеродинамічних сил та енергетичних показників конструкції вітроколеса з паралельними осі обертання профільованими лопатями.

Постановка стаціонарної задачі обтікання ВД основана на тому, що лопать

ротора відчуває при русі таку ж силову взаємодію від потоку повітря як ізольована лопать однакового подовження з такими ж кутами атаки. Набігаючий потік вважається постійним та рівномірно розподіленим по висоті лопаті. Гальмування потоку в роторі ВД визначається наступним відношенням швидкостей:

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} = V_0 \frac{1 + \bar{V}_2}{2}, \quad (3.1)$$

де V – швидкість незбуреного потоку перед вітроколесом;

V_1 – швидкість потоку в об'ємі ротора;

V_2 – швидкість далеко за ротором.

Відносна швидкість повітряного потоку:

$$\bar{W} = \bar{V} - \omega R. \quad (3.2)$$

$$W = \sqrt{(\omega R + V_0 \cos \beta)^2 + (V_0 \sin \beta)^2} \quad (3.3)$$

Компоненти аеродинамічних сил приведені до динамічного напору $H = \frac{\rho W^2}{2}$ відносного потоку, що діють перпендикулярно та паралельно хорді лопаті:

$$C_n = C_y \cos(\alpha) + C_x \sin(\alpha), \quad (3.4)$$

$$C_t = C_x \cos(\alpha) - C_y \sin(\alpha). \quad (3.5)$$

де α – кут атаки лопаті;

C_y - аеродинамічний коефіцієнт підйомної сили;

C_x - аеродинамічний коефіцієнт сили лобового опору.

Загальна середня аеродинамічна сила, що діє на ротор з певною кількістю лопатей i постійної ширини b :

$$F = \frac{ib}{2\pi} \int_0^H dz \int_0^{2\pi} q (C_n \sin \beta + C_t \cos \beta) d\beta. \quad (3.6)$$

Крутний момент на валу ВД:

$$M = \frac{ib}{2\pi} \int_0^H dz \int_0^{2\pi} q r C_t d\beta. \quad (3.7)$$

Потужність вітроколеса, що обертається з кутовою швидкістю ω :

$$P = M\omega = \frac{ib}{2\pi} \int_0^H dz \int_0^{2\pi} q \omega r C_t d\beta. \quad (3.8)$$

З урахуванням рівняння переносу імпульсу в потоці:

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V^2 - V_2^2) = 4 \rho R H V_1 \frac{1 - \bar{V}_2}{1 + \bar{V}_2}, \quad (3.9)$$

де S - площа перерізу вітроколеса, що перпендикулярний потоку повітря;

R – радіус вітроколеса;

H – висота вітроколеса. α

Прирівнюючи (2.9) та (2.6), отримуємо:

$$\frac{1 - \bar{V}_2}{1 + \bar{V}_2} = \frac{ib}{8\pi S} \int_0^H dz \int_0^{2\pi} \frac{W^2}{V_1^2} (C_n \sin\beta + C_t \cos\beta) d\beta. \quad (3.10)$$

Кут атаки лопаті:

$$tg\alpha = \frac{V_1 \sin\beta}{\omega R + V_1 \cos\beta} \quad (3.11)$$

Методом ітерацій вирішуємо рівняння (2.10) та визначаємо \bar{V}_2 . Виходячи з цього швидкохідність вітроколеса:

$$\theta = \frac{\omega R}{V_1} \left(\frac{1 + \bar{V}_2}{2} \right). \quad (3.12)$$

Коефіцієнт використання енергії вітру:

$$C_p = \frac{2P}{\rho S V^3} = \frac{ib(1 + \bar{V}_2)^3}{16\pi S} \int_0^H dz \int_0^{2\pi} \left(\frac{W}{V_1} \right)^2 \frac{\omega r}{V_1} C_t d\beta. \quad (3.13)$$

3.2 Двострумнна імпульсна модель вітроколеса.

В основу двострумної імпульсної моделі покладено гіпотезу про створення необхідних кінематичних характеристик потоку повітря в кожній точці колової траєкторії руху лопаті для продукування максимального тягового зусилля.

Робочий процес ортогонального вітроколеса характеризується пульсуючою зміною аеродинамічних сил на поверхні лопатей при взаємодії з потоком повітря. Це призводить до виникнення перемінного значення тягового зусилля на валу вітроколеса в залежності від його положення відносно вітру. Максимального значення тягова сила досягає при перпендикулярному пересіканні лопаттю потоку повітря. Цей процес відбувається на навітряній стороні при $\beta=90^\circ$ та підвітряній стороні в межах $\beta=270^\circ$.

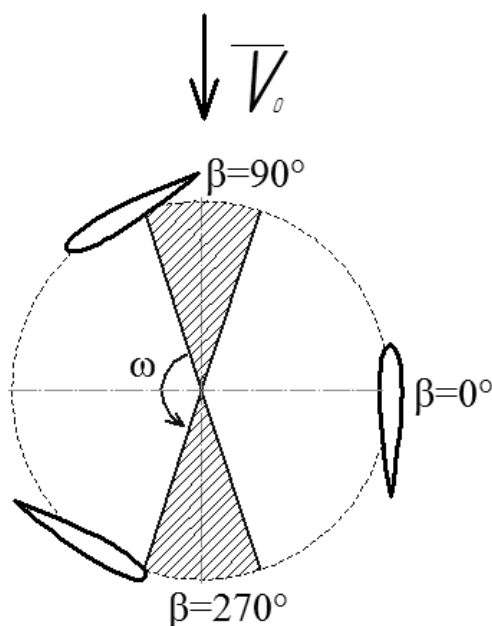


Рисунок 27 – Зона виникнення максимального тягового зусилля на валу вітроколеса

Гіпотеза зміни кінематичних характеристик потоку перед вітроколесом передбачає, що кути атаки α відносної швидкості \bar{W} на колівій траєкторії є незмінними величинами. З даної умови випливає, що в кожній точці колівій траєкторії величина тягового зусилля однакова.

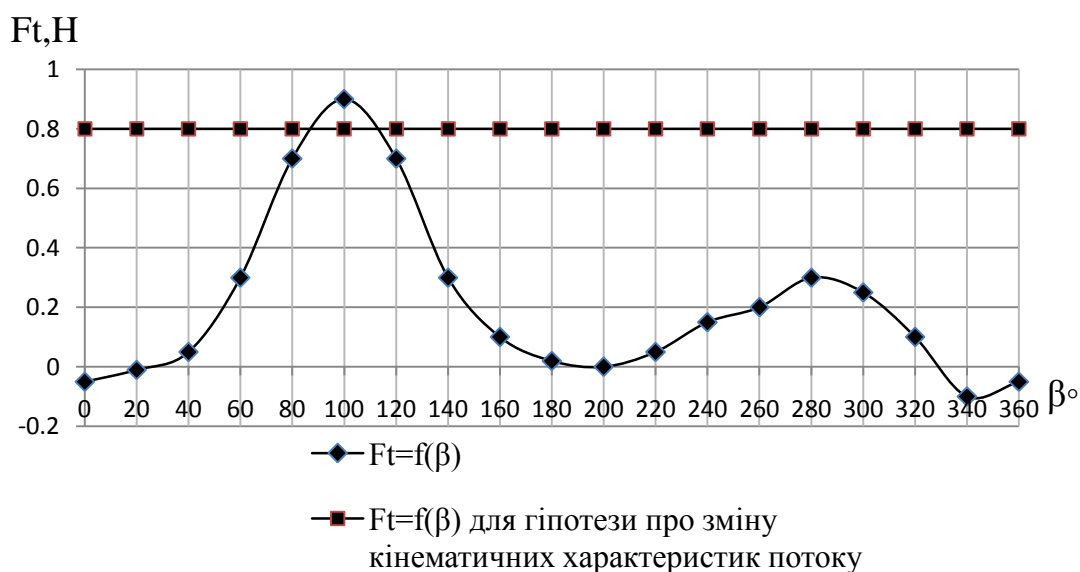


Рисунок 28 – Порівняння залежності $F_t=f(\beta)$ для стандартного робочого процесу ОВД та робочого процесу основаного на гіпотезі про зміну кінематичних характеристик потоку перед вітроколесом

Для реалізації постійного кута атаки необхідно змістити трикутник швидкостей шляхом введення допоміжного вектора швидкості \bar{W} .

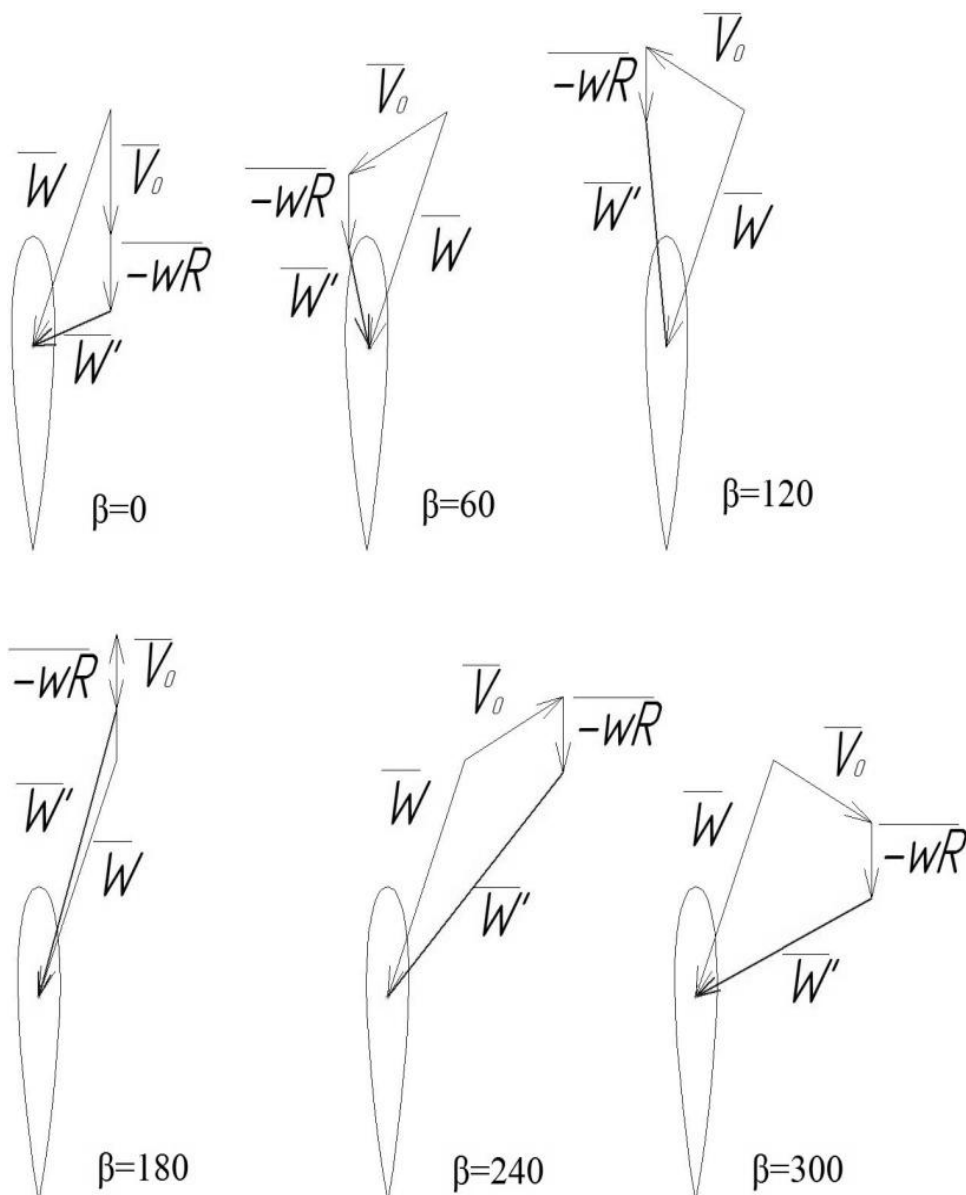


Рисунок 29 – Трикутники швидкостей з урахуванням допоміжного вектору швидкості \bar{W} в залежності від положення лопаті на колівій траєкторії.

Використання даної гіпотези на практиці дозволить згладити характеристику пульсуючих аеродинамічних сил на поверхні лопаті та підвищити сумарний крутний момент на валу вітроколеса, що призведе до збільшення генерованої потужності вітровою турбіною.

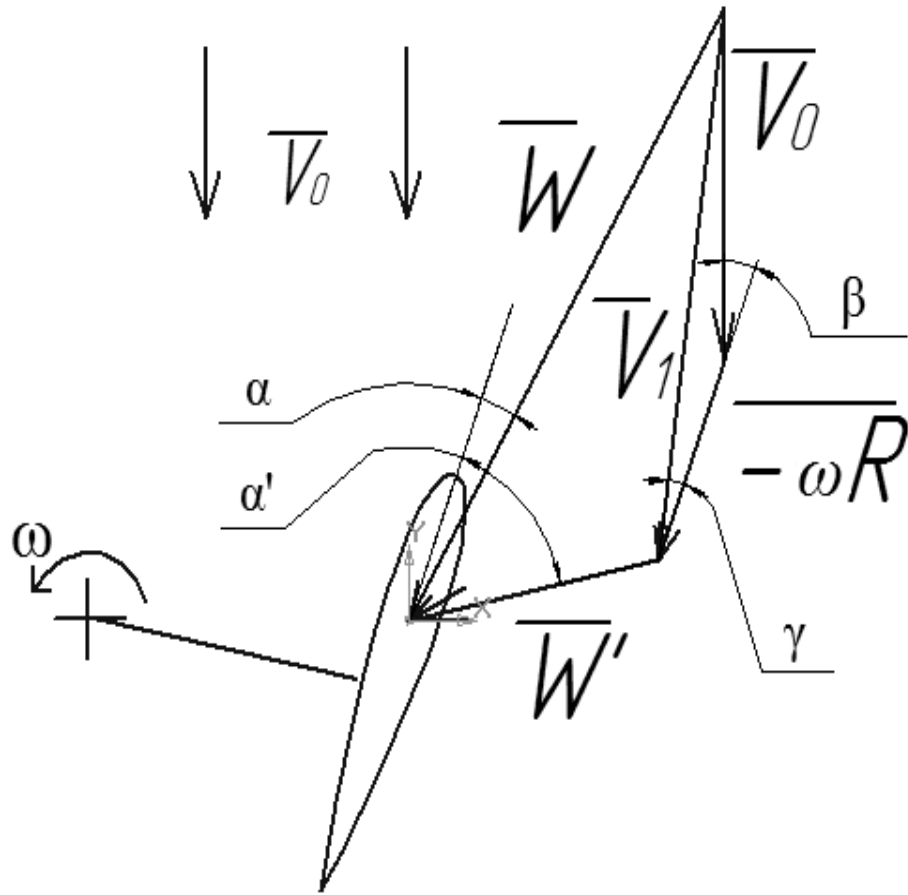


Рисунок 30 – Схема для аналітичного розрахунку

Величина та кут атаки допоміжного вектора швидкості визначається за допомогою аналітичних залежностей:

$$W' = \sqrt{\left(V' \sin \tan^{-1} \left(\frac{V_0 \sin \beta}{\omega R + V_0 \cos \beta}\right) - W \sin \alpha\right)^2 + \left(W \cos \alpha - V' \cos \tan^{-1} \left(\frac{V_0 \sin \beta}{\omega R + V_0 \cos \beta}\right)\right)^2} \quad (3.14)$$

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{V' \sin \tan^{-1} \left(\frac{V_0 \sin \beta}{\omega R + V_0 \cos \beta}\right) - W \sin \alpha}{W \cos \alpha - V' \cos \tan^{-1} \left(\frac{V_0 \sin \beta}{\omega R + V_0 \cos \beta}\right)} \quad (3.15)$$

\vec{V}_1 – результуючий вектор швидкості потоку \vec{V}_0 та колової швидкості лопаті $\omega \vec{R}$:

$$V' = \sqrt{(\omega R + V_0 \cos \beta)^2 + (V_0 \sin \beta)^2} \quad (3.16)$$

γ – кут між вектором \vec{V}_1 та вектором колової швидкості лопаті $\omega \vec{R}$:

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{V_0 \sin \beta}{\omega R + V_0 \cos \beta} \quad (3.17)$$

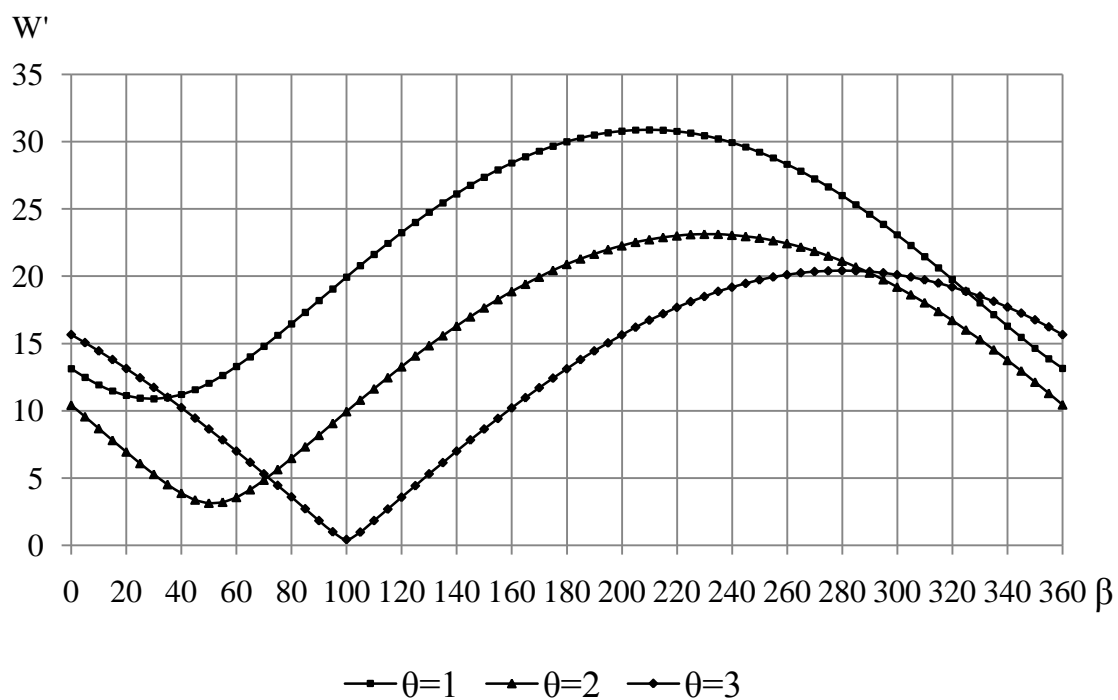


Рисунок 31 – Залежність $W'=f(\beta)$ в залежності від початкової швидкості вітроколеса θ при вхідній умові $\bar{W}=30$ м/с, $\alpha=20^\circ$, $\bar{V}_0=10$ м/с.

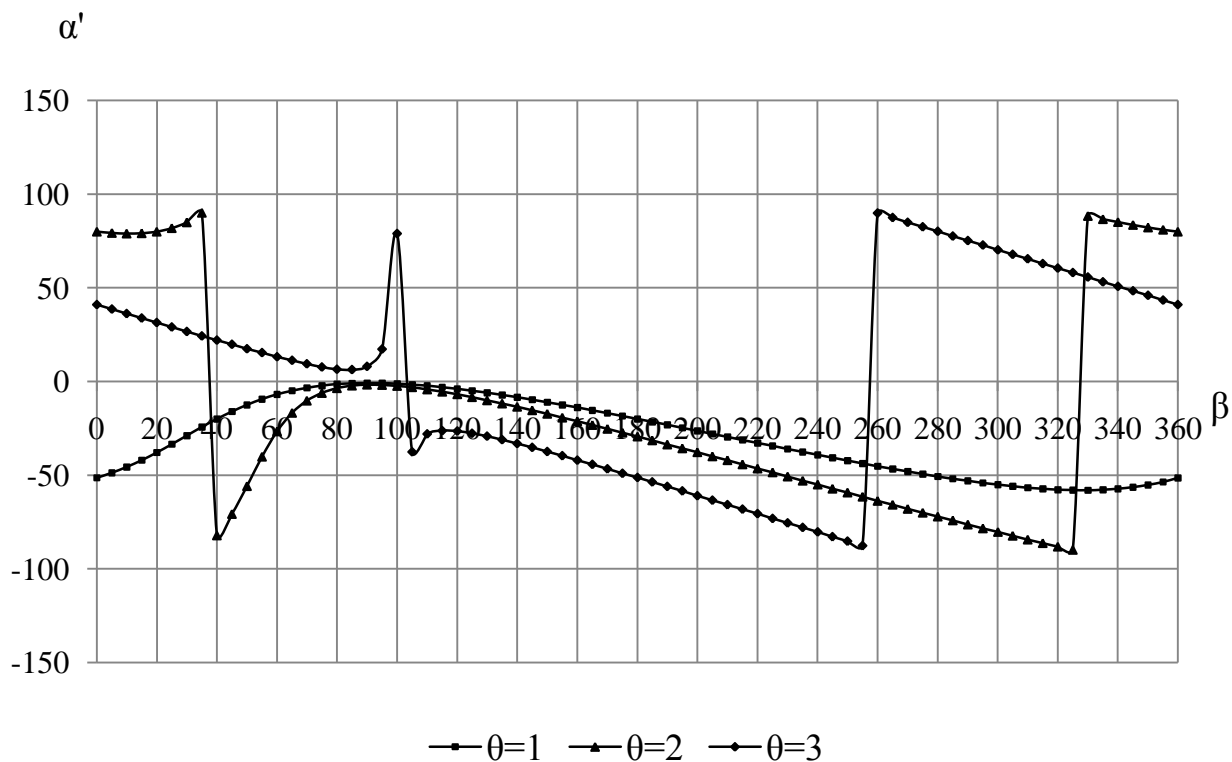


Рисунок 32 – Залежність $\alpha'=f(\beta)$ в залежності від початкової швидкості вітроколеса θ при вхідній умові $\bar{W}=30$ м/с, $\alpha=20^\circ$, $\bar{V}_0=10$ м/с.

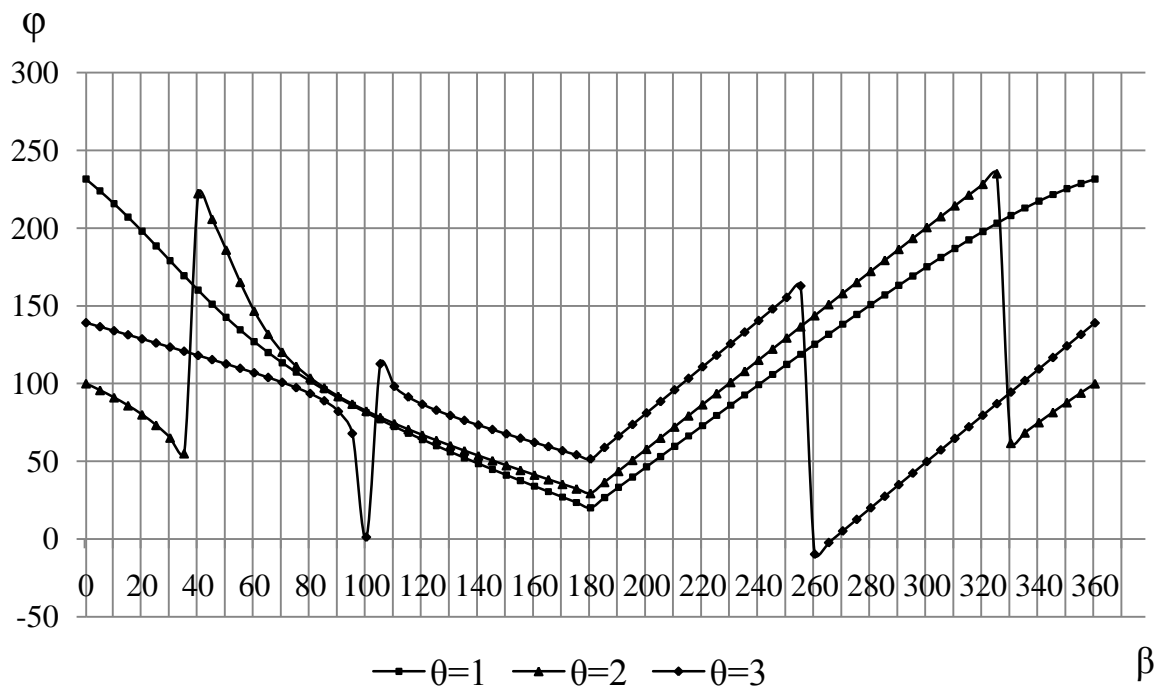


Рисунок 33 – Залежність $\varphi=f(\beta)$ в залежності від початкової швидкості вітроколеса θ при вхідній умові $\bar{W}=30$ м/с, $\alpha=20^\circ$, $\bar{V}_0=10$ м/с.

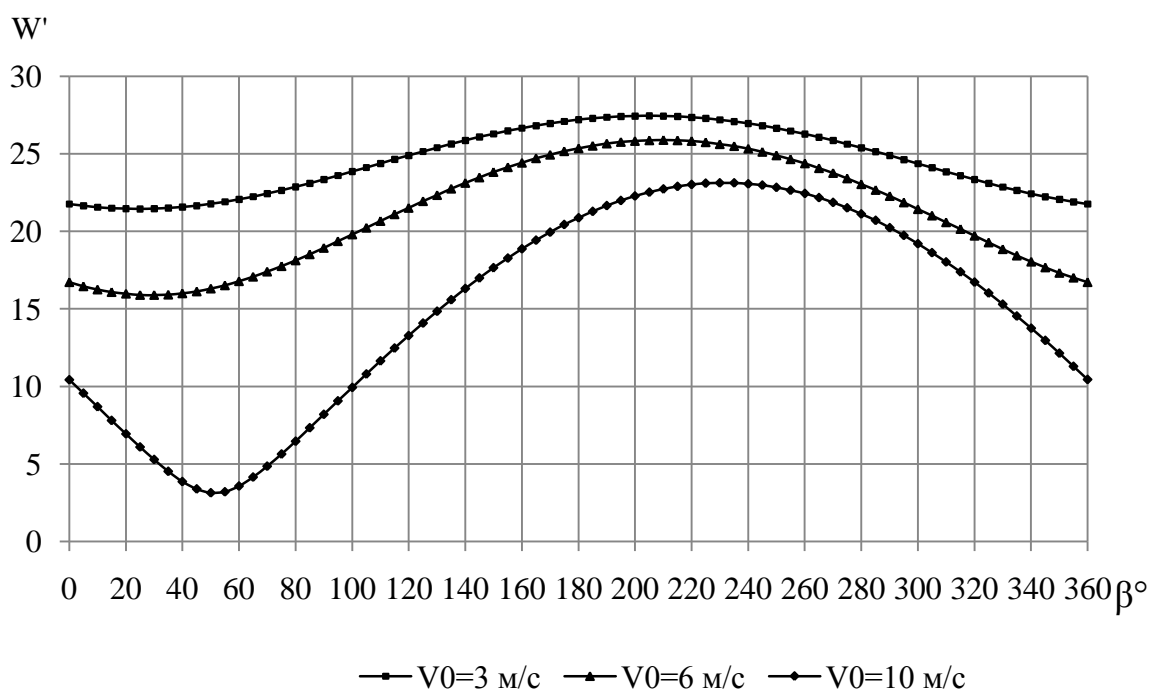


Рисунок 34 – Залежність $W'=f(\beta)$ в залежності від швидкості вітрового потоку V_0 при вхідній умові $\bar{W}=30$ м/с, $\alpha=20^\circ$, $\theta=2$.

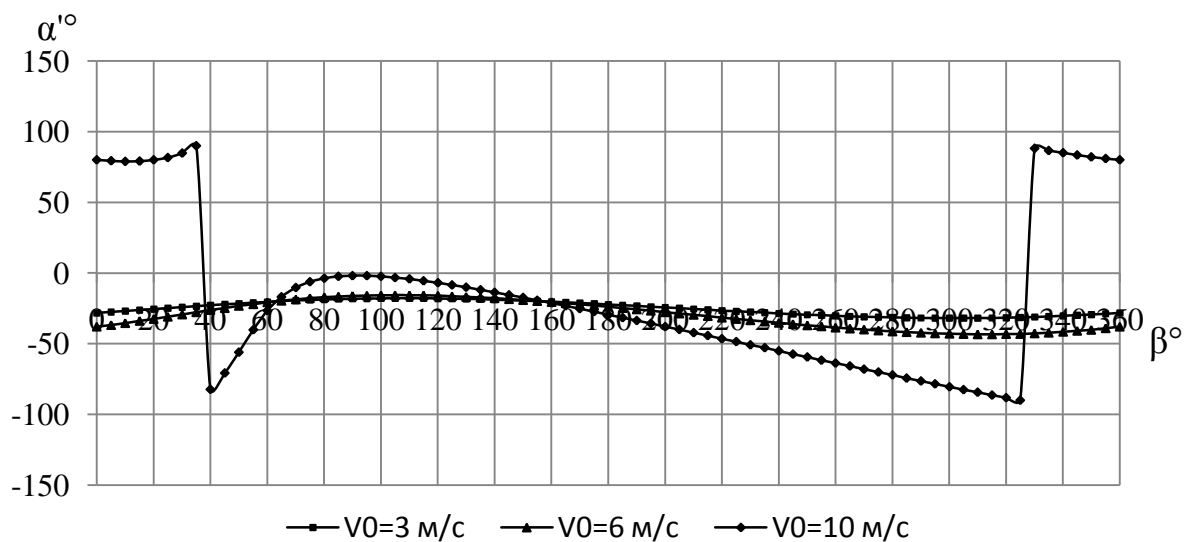


Рисунок 35 – Залежність $\alpha'=f(\beta)$ в залежності від швидкості вітрового потоку V_0 при вхідній умові $\bar{W}=30$ м/с, $\alpha=20^\circ$, $\theta=2$.

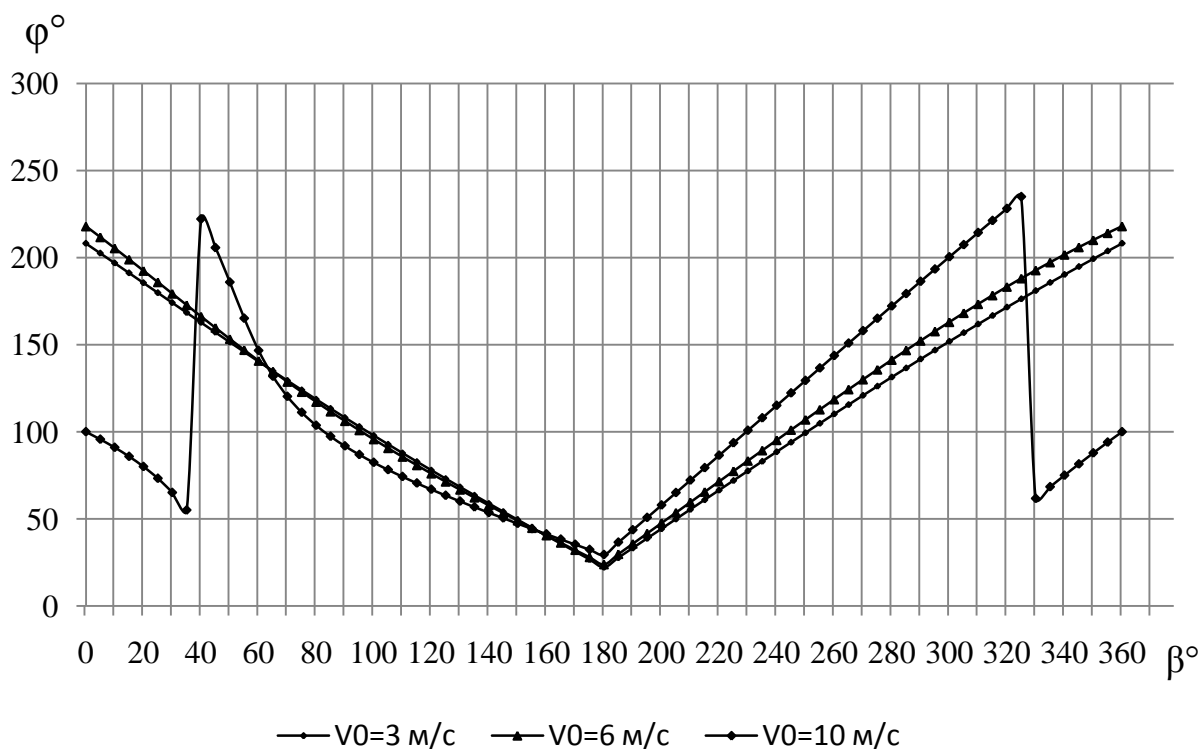


Рисунок 36 – Залежність $\varphi=f(\beta)$ в залежності від швидкості вітрового потоку V_0 при вхідній умові $\bar{W}=30$ м/с, $\alpha=20^\circ$, $\theta=2$.

Для аналізу можливості практичного застосування запропонованої гіпотези визначаємо кут φ між вектором швидкості \vec{V}_0 та допоміжним вектором швидкості \vec{W}' :

$$\varphi = 180^\circ - (\alpha' + \beta). \quad (3.18)$$

В діапазоні кутів $\varphi=0^\circ \dots 90^\circ$ для виконання вхідних умов показників відносної швидкості \vec{W} на поверхні лопаті необхідно створити зворотні потоки в зоні вітроколеса, що в реальних умовах виконати практично не можливо. Тому активною зоною для введення допоміжного вектора швидкості \vec{W}' є частини колової траєкторії руху лопаті, що визначаються кутами β при яких $\varphi > 90^\circ$. На рисунку 37 вказані зони знаходяться вище заштрихованого поля.

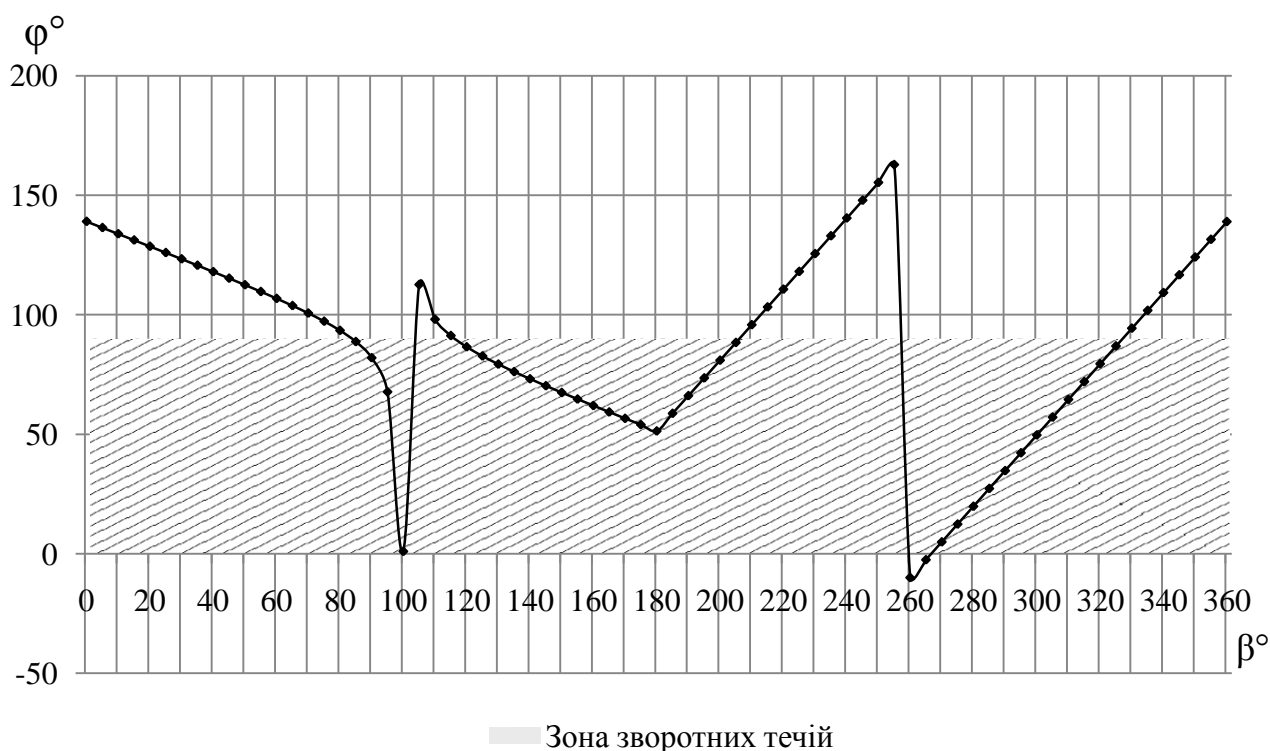


Рисунок 37 – Визначення зон для можливого введення вектору відносної швидкості \vec{W}' .

Найбільший інтерес для практичного застосування даної гіпотези представляє сектор в межах нульового азимутального кута $\beta=320^\circ \dots 0^\circ \dots 80^\circ$. В цьому діапазоні колової траєкторії лопаті спостерігається виникнення максимального моменту опору з боку потоку повітря.

Вплив допоміжного вектору швидкості на енергетичні показники вітроколеса визначаємо за допомогою двострумнинної імпульсної моделі.

Математична модель розроблена на основі імпульсної теорії, згідно якої потік повітря втрачає половину свого напору в об'ємі вітроколеса:

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2} = V_0 \frac{1 + \bar{V}_2}{2}, \quad (3.19)$$

де V_0 – швидкість набігаючого потоку;

V_1 – швидкість потоку в об'ємі ротора;

V_2 – швидкість далеко за ротором.

Розрахункова схема вітроколеса розділяється на підвітряну та навітряну зону. Граничні значення швидкостей потоку: V_0, W' – компоненти швидкості потоку далеко перед вітроколесом; V_1, W_1' – компоненти швидкості на навітряній стороні; V_e, W_e' – компоненти швидкості на навітряній стороні; V_2, W_2' – компоненти швидкості на підвітряній стороні; V_d, W_d' – компоненти швидкості далеко за вітроколесом. ω – частота обертання, α – кут атаки відносної швидкості W , α' – кут атаки допоміжної швидкості W' , β – кут азимутального положення лопаті.

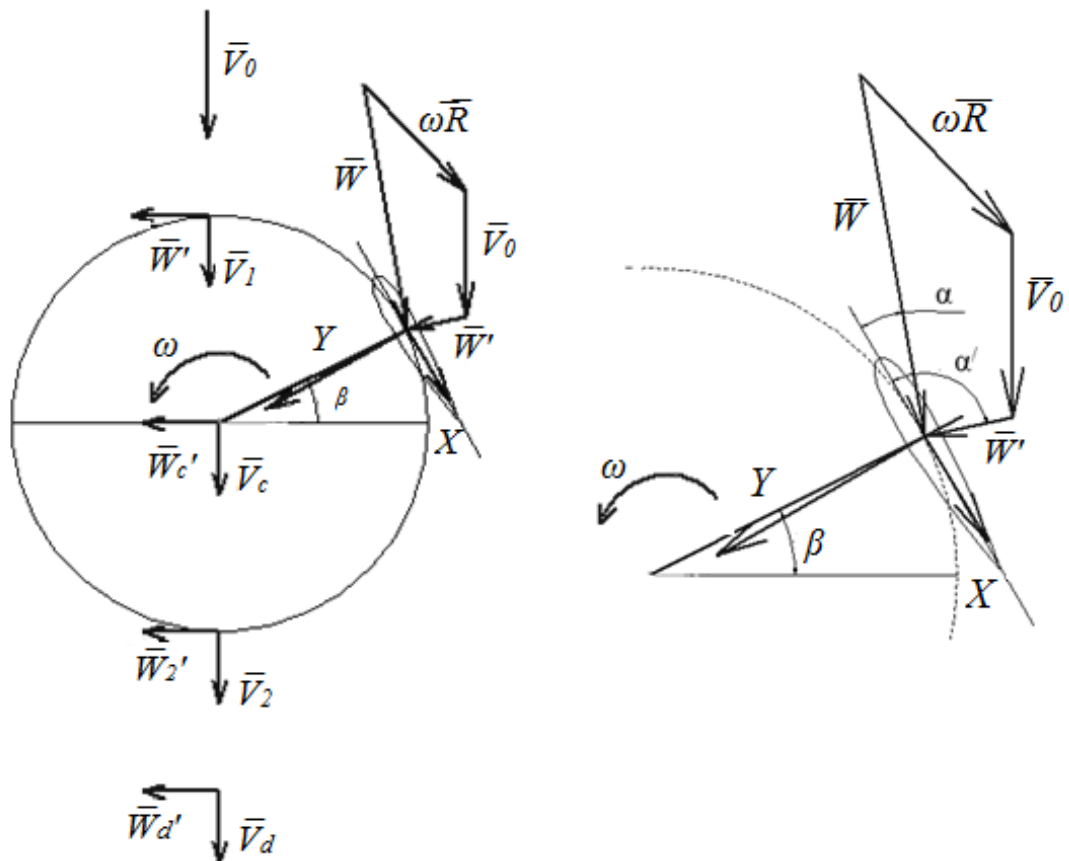


Рисунок 38 – Розрахункова схема двострумнинної імпульсної моделі вітроколеса

Коефіцієнти гальмування потоку представимо у наступному вигляді:

- для навітряної сторони:

$$A_1 = \frac{V_1}{V_0}, B_1 = \frac{W_1}{V_0}, \quad (3.20)$$

- для підвітряної сторони:

$$A_2 = \frac{V_2}{V_e}, B_2 = \frac{W_2}{V_e}. \quad (3.21)$$

Виходячи з імпульсної теорії, характерні швидкості зв'язані відношенням:

$$V_1 = \frac{V_0 + V_e}{2}, W_1' = W', V_2 = \frac{V_e + V_d}{2}, W_2' = \frac{W_e' + W_2'}{2}. \quad (3.22)$$

Виразимо швидкості через коефіцієнти гальмування потоку:

$$V_1 = A_1 V_0, W_1' = B_1 V_0 = W', \quad (3.23)$$

$$V_e = (A_1 - 1)V_0, W_e' = \frac{W_1'}{2}, \quad (3.24)$$

$$V_2 = A_2(2A_1 - 1)V_0, W_2' = B_2(2A_1 - 1)V_0, \quad (3.25)$$

$$V_d = (2A_2 - 1)(2A_1 - 1)V_0, W_d' = V_0 \left(2B_2(2A_1 - 1) - \frac{B_1}{2} \right). \quad (3.26)$$

Зміна кількості руху потоку:

- для навітряної сторони:

$$\Delta K_{1x} = m_1(V_0 - V_e), \Delta K_{1z} = -m_1(W' - W_e'), \quad (3.27)$$

- для підвітряної сторони:

$$\Delta K_{2x} = m_2(V_e - V_d), \Delta K_{2z} = -m_2(W_e' - W_d'). \quad (3.28)$$

Масова витрата повітря для навітряної та підвітряної сторони:

$$m_1 = \rho S(V_1 + W'), \quad (3.29)$$

$$m_2 = \rho S(V_2 + W_2'). \quad (3.30)$$

Де ρ – щільність повітря;

S – площа перерізу вітроколеса.

Допускаємо, що підйомну силу Y та силу лобового опору X можна визначати через аеродинамічні коефіцієнти профільованої лопаті C_y та C_x :

$$F_y = \frac{\rho W_2}{2} b H C_y(\alpha), \quad (3.31)$$

$$F_x = \frac{\rho W_2}{2} b H C_x(\alpha), \quad (3.32)$$

де b – хорда лопаті;

H – висота лопаті.

Середня значення сил, що діють вздовж осей x та z :

- для навітряної сторони:

$$P_{1x} = \frac{i}{2\pi} \int_0^\pi X d\beta, P_{1z} = \frac{i}{2\pi} \int_0^\pi Z d\beta, \quad (3.33)$$

- для підвітряної сторони:

$$P_{2x} = \frac{i}{2\pi} \int_\pi^{2\pi} X d\beta, P_{2z} = \frac{i}{2\pi} \int_\pi^{2\pi} Z d\beta, \quad (3.34)$$

$$\text{де } X = -F_y \sin(\beta) - F_x \cos(\beta), Z = -F_y \cos(\beta) + F_x \sin(\beta). \quad (3.35)$$

Допускаємо, що кінетична енергія втрачена потоком при протіканні через вітроколесо повністю перетворилась в механічну енергію турбіни, тоді для відповідних частин вітроколеса:

$$\Delta K_{1x} = -P_{1x}, \Delta K_{1z} = -P_{1z}, \quad (3.36)$$

$$\Delta K_{2x} = -P_{2x}, \Delta K_{2z} = -P_{2z}. \quad (3.37)$$

З урахуванням (5-14) рівняння енергетичної взаємодії вітроколеса з потоком повітря приймають вигляд:

$$\left(A_1 + \frac{W'}{V_0}\right) \left(1 - (2A_1 - 1)\right) = \frac{ib}{8\pi R} \int_0^\pi \frac{W^2}{V_0^2} (C_x \cos\beta + C_y \sin\beta) d\beta, \quad (3.38)$$

$$\left(A_1 + \frac{W'}{V_0}\right) \left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{2}\right) W' = \frac{ib}{8\pi R} \int_0^\pi \frac{W^2}{V_0^2} (C_y \cos(\beta) - C_x \sin(\beta)) d\beta, \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} (2A_1 - 1)^2 (A_2 + B_2) (1 - (2A_2 - 1)) = \\ = \frac{ib}{8\pi R} \int_\pi^{2\pi} \frac{W^2}{V_0^2} (C_x \cos\beta + C_y \sin\beta) d\beta, \end{aligned} \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} (A_2 - B_2) \left(\frac{W}{2V_0(2A_1 - 1)} - \left(2B_2 - \frac{W}{2(2A_1 - 1)} \right) \right) = \\ = \frac{ib}{8\pi R (2A_1 - 1)^2 V_0^2} \int_\pi^{2\pi} (C_y \cos(\beta) - C_x \sin(\beta)) d\beta \end{aligned} \quad (3.41)$$

Швидкохідність вітроколеса:

- для навітряної частини:

$$\theta = \frac{\omega R}{V_0}, \quad (3.42)$$

- для підвітряної частини:

$$\theta = \frac{\omega R}{V_e} = \frac{\omega R}{(2A_1 - 1)V_0}. \quad (3.43)$$

Аеродинамічний коефіцієнт крутного моменту, що діє на вітроколесо:

$$C_M = \frac{ib}{4\pi R} \int_0^\pi \frac{W^2}{V_0^2} (C_y(\alpha) \sin(\alpha) - C_x(\alpha) \cos(\alpha)) d\beta + \\ + \frac{ib}{4\pi R} (2A_1 - 1)^2 \int_\pi^{2\pi} \frac{W^2}{V_0^2} (C_y(\alpha) \sin(\alpha) - C_x(\alpha) \cos(\alpha)) d\beta \quad (3.44)$$

3.3 Чисельне моделювання обтікання твердої стінки потоком повітря

Алгоритм математичного моделювання робочого процесу вертикально-осьового вітроколеса та прогнозування його аеродинамічних характеристик оснований на імпульсній моделі вітроколеса передбачає наявність АДХ окремої ізольованої лопаті заданого профілю. Характеристику профілів отримують натурним експериментом, шляхом продувки крила в аеродинамічних трубах. На сьогоднішній день даний метод є єдиною можливістю отримання адекватних значень характеристик профілів. Його використання потребує наявності моделі досліджуваного об'єкта та значної матеріально-технічної бази, що робить даний метод дорогим та складним для реалізації.

Тому для визначення АДХ окремих профільованих лопатей запропоновано використати програмний комплекс ANSYS CFX для чисельного моделювання обтікання потоком повітря твердої стінки.

ANSYS - універсальна програмна система кінцево-елементного аналізу, що існує і розвивається протягом останніх 30 років. Комплекс є досить популярним у фахівців у сфері автоматизованих інженерних розрахунків для рішення лінійних і нелінійних, стаціонарних і нестаціонарних просторових задач механіки деформованого твердого тіла і механіки конструкцій (включаючи нестаціонарні

геометрично і фізично нелінійні задачі контактної взаємодії елементів конструкцій), завдань механіки рідини і газу, теплопередачі і теплообміну, електродинаміки, акустики, а також механіки зв'язаних полів. Моделювання та аналіз в деяких областях промисловості дозволяє уникнути дорогих і тривалих циклів розробки типу «проектування - виготовлення - випробування». Система працює на основі геометричного ядра Parasolid.

Проведення розрахунку включає такі основні етапи:

- **побудова просторової моделі розрахункової області** - створення твердотільної 3D моделі об'єму рідини (повітря), в якій ведеться розрахунок. На даному етапі розрахунку необхідно брати до уваги той момент, що геометрія просторової області впливає на точність розрахунку. Досліджуваний об'єкт повинен розташовуватися на значному віддаленні від границь області для зменшення впливу стиснення потоку повітря на характер процесів в зоні профілю. Важливе значення має точність побудови просторової моделі, так як навіть найменше відхилення від початкових геометричних розмірів профілю веде за собою значну зміну у подальшому розрахунку і, як наслідок, отримання не достовірних даних характеристик потоку. Побудова просторової моделі здійснюється за допомогою таких програм САПР як Компас3D, SolidWorks, AutoCAD.

- **створення розрахункової сітки з окремих дрібних елементів**. Так як дослідження проводиться методом поступового приближення вирішення рівнянь Нав'є-Стокса, то необхідно поділити розрахункову область на окремі елементи. Для кожного такого елемента будуть вирішуватися рівняння току рідини та визначатися поля швидкостей. При розбитті сітки головним фактором є якість їх взаємного розташування. В даній роботі на цей фактор звернуто особливу увагу, оскільки на аеродинамічні характеристики профілю значною мірою впливають процеси поблизу твердої стінки. Тому для точного моделювання об'єму рідини поблизу досліджуваного об'єкту розбивається щільної сіткою високої якості. Для полегшення аналізу кінцевих результатів, на даному етапі вказуються назви поверхонь (вхід, вихід потоку повітря; тверді стінки). Побудова сітки здійснюється за допомогою програмного продукту ANSYS WORKBENCH.

- **визначення граничних умов** - введення початкових даних розрахунку: моделі турбулентності, швидкості набігаючого потоку та тиску перед профільованою лопаттю. На основі цих даних буде проводитися розрахунок моделі. Одним із основних факторів, який впливає на якість розрахунку є вибір моделі турбулентності для замикання рівнянь Рейнольдса.

- **безпосередній розрахунок ЕОМ** - включає час, необхідний для розв'язання ЕОМ рівнянь Нав'є-Стокса в кожній елементарній області та визначення характеристик потоку в кожній точці розрахункової області. Швидкість проходження даного етапу повністю залежить від характеристики обчислювальної техніки, на якій проводиться розрахунок та розмірів розрахункової сітки. Необхідною і достатньою умовою для інженерного розрахунку є досягнення графіками сходження розрахунку області з $0,0001$ різницею між суміжними розрахунками.

- **аналіз отриманих результатів** - отримання кінцевих параметрів потоку рідини та визначення необхідних характеристик на основі цих параметрів. На даному етапі визначаються сили, що діють на профіль з боку потоку повітря та візуалізується картина протікання робочої рідини.

Оскільки основним робочим органом ОВД є лопать певного профілю, то для вдосконалення аеродинамічних характеристик (АДХ) вітрової турбіни виникла необхідність моделювання обтікання потоком повітря окремої лопаті з метою отримання картин течії та подальшої модернізації геометричних параметрів профілю. Вказану задачу не вдається вирішити з використанням раніше отриманої методики оскільки дослідження обтікання окремої лопаті представляє більш складний характер. На картину течії значною мірою впливає поведінка робочої рідини поблизу твердої стінки, що визначає вектори швидкості та, як наслідок, поля тисків на поверхні профілю.

Відсутність достатньої кількості досліджень пограничного шару не дозволяє провести аналітичний розрахунок аеродинамічних характеристик профілів складної форми. Тому виникла потреба створення робочої методики моделювання обтікання профілів складної форми потоком повітря. В якості початкової ступені для

вирішення цього питання встановлена задача числового розрахунку поперечного обтікання потоком повітря сферичного тіла типу куля [67, 68]. Наявність експериментальних залежностей коефіцієнту лобового опору C_x як функції числа Рейнольдса Re $C_x=f(Re)$ дають змогу провести порівняння цих даних зі значеннями отриманими числовим моделюванням.

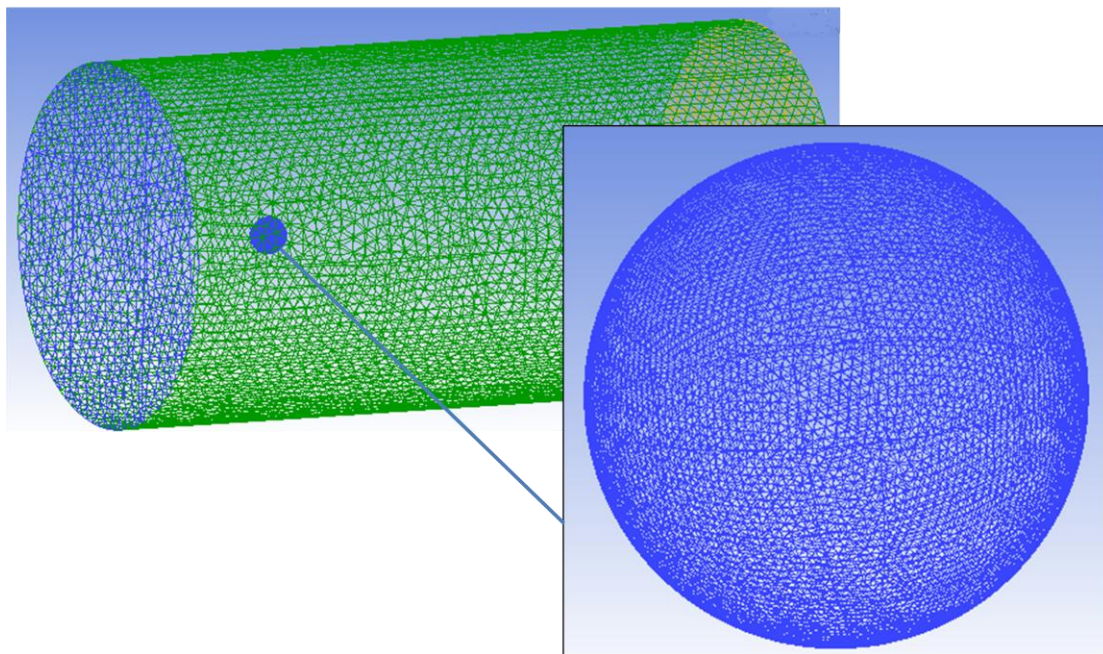


Рисунок 39 – Розрахункова область для моделювання обтікання потоком повітря сферичного тіла

Для вирішення встановленої задачі необхідно провести розрахунок рівнянь Нав'є-Стокса для розрахункової області, що представляє собою модель аеродинамічної труби в якій розміщується куля. Розрахунок проводиться з використанням методу кінцевих елементів [69]. Створена просторова модель розбивається на певну кількість комірок тетраїдної форми, кількість та взаємне розташування яких впливає на якість розрахунку, що в подальшому є визначальним для похибки між отриманими числовим шляхом та експериментальними даними.

Оскільки діапазон числа Рейнольдса лежить в межах $10^{-2} \div 10^7$, то використовується дві моделі турбулентності: ламінарна ($10^{-2} \leq Re \leq 10^3$) та Shear Stress Transport (SST) ($Re > 10^3$) [70].

Моделювання з використанням SST моделі турбулентності включає вирішення

наступних рівнянь [71]:

- кінематична турбулентна в'язкість:

$$\nu_T = \frac{\alpha_1 K}{\max\{\alpha_2 \omega, S F_2\}}, \quad (3.45)$$

де $\alpha_1 = \frac{5}{9}$; $\alpha_2 = 0,44$;

K - турбулентна кінетична енергія;

ω – питома швидкість дисипації;

S - швидкісна деформація;

F – вагова функція.

- турбулентна кінетична енергія:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \quad (3.46)$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10 \beta^* k \omega \right), \quad (3.47)$$

де $\sigma_k = 0,5$;

$\beta^* = 0,09$;

ν – кінематична в'язкість;

τ_{ij} – компонента тензора напруження здвигу.

- показник дисипації:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = & \alpha S_2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ & + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (3.48)$$

де $\sigma_\omega = 0,5$;

$\sigma_{\omega 2} = 0,856$.

При моделюванні процесу обтікання потоком повітря кулі отримано графічну залежність $C_x = f(Re)$. На рисунку 40 зображено взаємне розташування експериментальної залежності [72] та залежності отриманої числовим

МОДЕЛЮВАННЯМ.

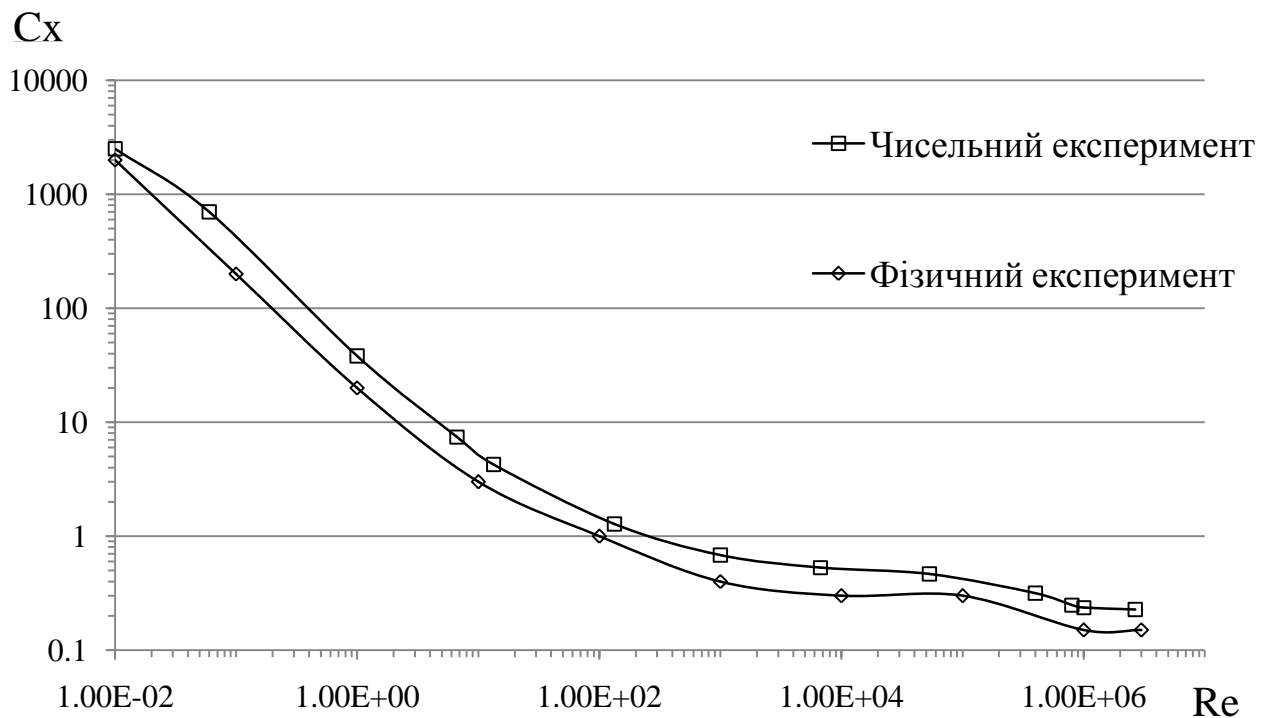
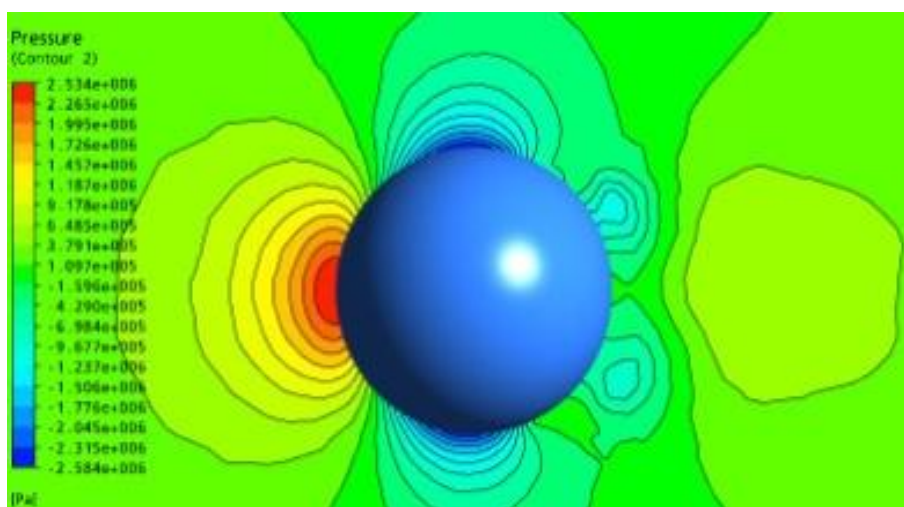
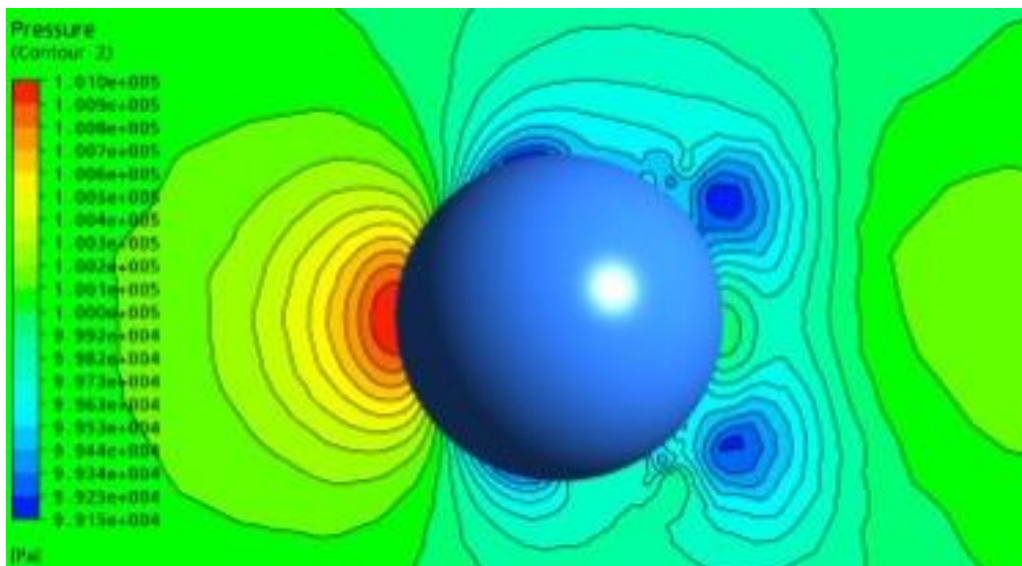


Рисунок 40 – Порівняльна характеристика експериментальної та отриманої чисельним моделюванням залежностей $C_x=f(Re)$

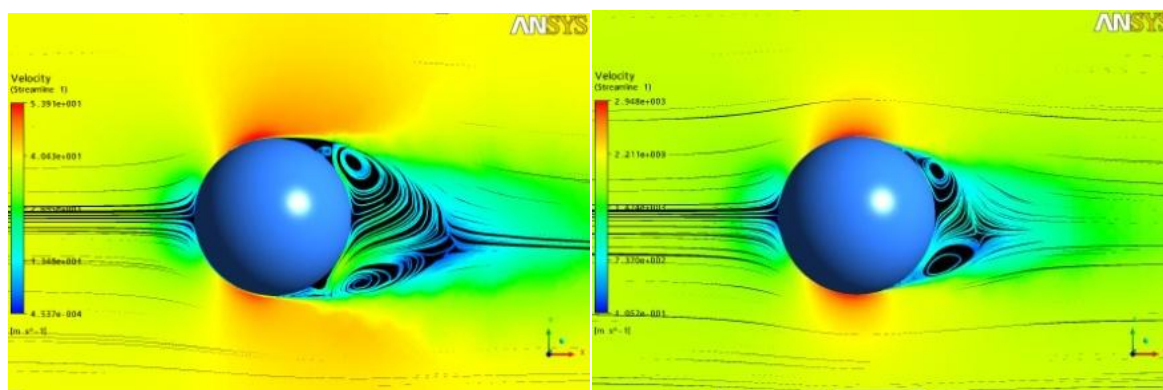
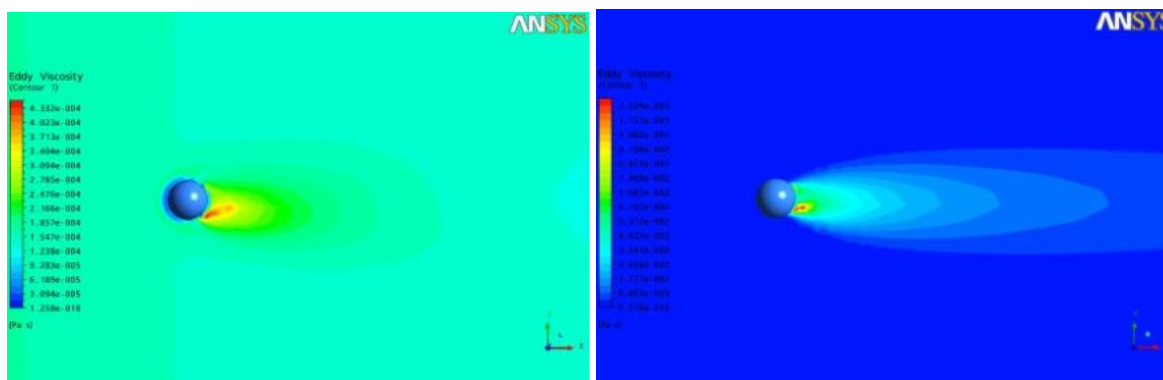
Отримані картини течії в розрахунковій області та в зоні пограничного шару, що дає змогу визначити зони відриву потоку від твердої стінки та проаналізувати характер вихроутворень при різних числах Рейнольдса.



a)



б)

Рисунок 41 – Поля тиску: *a*– $Re=53300$; *б* – $Re=2670000$.*a**б*Рисунок 42– Лінії току: *a* – $Re=53300$; *б* – $Re=2670000$.*a**б*Рисунок 43 – Кінематична в'язкість: *a* – $Re=53300$; *б* – $Re=2670000$.

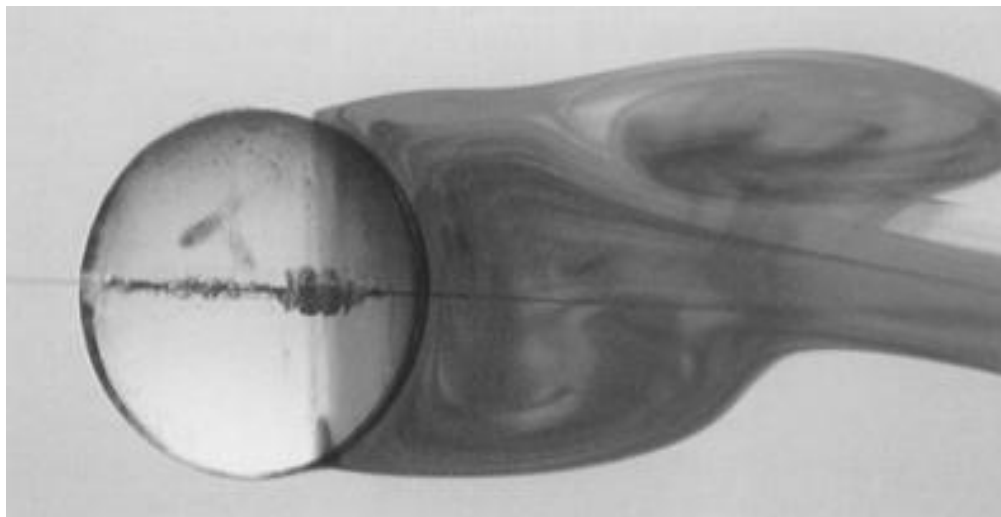


Рис. 44 – Експериментально отримана картина відриву вихору поверхні кулі [73].

На рисунках 41, 42 видно збільшення тиску в лобовій частині та зменшення вихрової зони на тильній стороні сфери (причиною того є зміщення точки відриву в сторону протилежну набігаючому потоку) при збільшенні числа Re , що відповідає реальним умовам обтікання. Стаціонарне вирішення задачі не дає змогу отримати цілісний вихровий слід за досліджуваним об'єктом та показати формування доріжки Кармана але на зображенні ліній току просліджується чітке формування двох вихрових зон у місцях відриву потоку від твердої стінки. Сходження вихорів не є симетричним, що є підтвердженням парадоксу симетрії [74]. При збільшенні числа Рейнольдса вплив сил в'язкості на потік зменшується і, як наслідок, відбувається збільшення турбулізації потоку за досліджуваним об'єктом.

При числовому моделюванні обтікання сфери визначено показники розрахункової сітки на поверхні, що дозволяють провести доволі точно прогнозування аеродинамічних сил. Практичні дані переносимо на моделювання обтікання повітрям профільованої лопаті.

Отримані практичні знання переносимо на моделювання обтікання потоком повітря симетричного профілю NACA 0015 [75]. Даний профіль лопаті часто використовується в якості робочого органу ортогональних вітро двигунів.

Він характеризується високими показниками коефіцієнту підйомної сили на широкому діапазоні кутів атаки та відносно низькими значеннями коефіцієнту лобового опору.

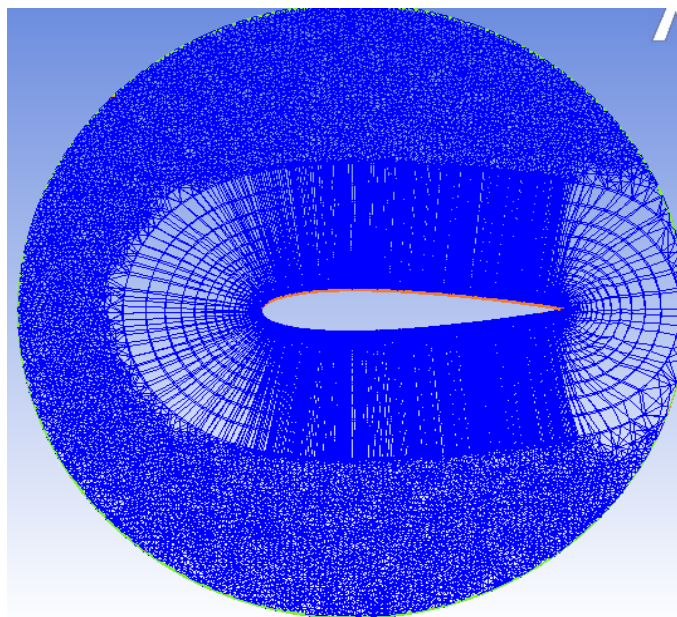


Рисунок 45– Розрахункова сітка профілю NASA 0015

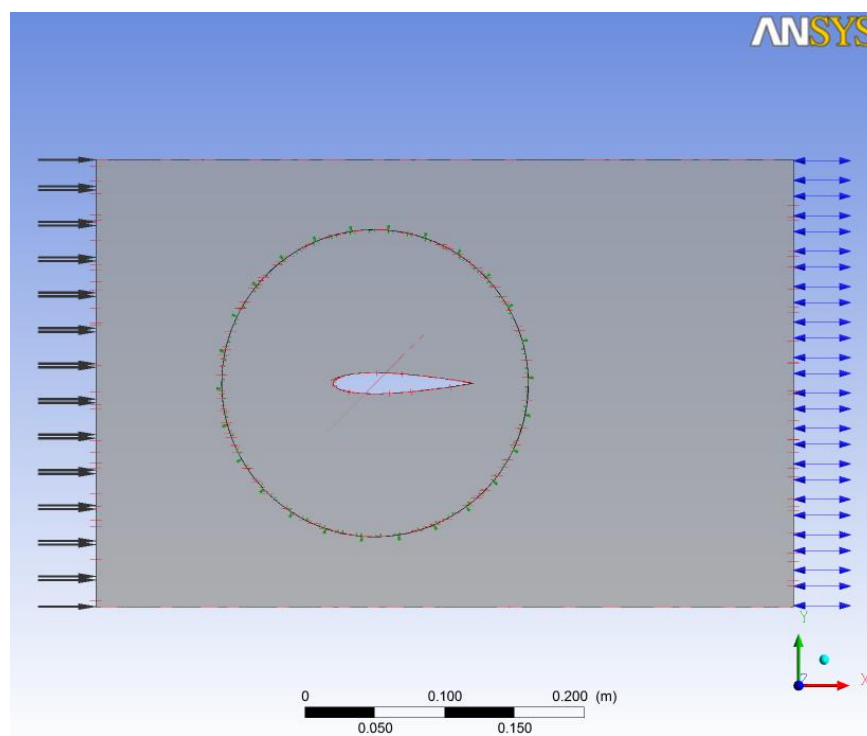


Рисунок 46 – Розрахункова область профілю NASA 0015

Розрахункова область для дослідження аеродинамічних характеристик профілю лопаті має вигляд паралелепіпеду. На відстані двох хорд $2b$ від профілю розташований вхідний переріз із вказаною величиною вхідної швидкості потоку 25 м/с. Профіль відділено від основного об'єму розрахункової області кільцевим інтерфейсом для можливості зміни кута атаки лопаті шляхом повертання внутрішнього об'єму відносно основної зони [76]. На відстані чотирьох хорд $4b$ знаходиться вихідний переріз з показником тиску на виході з розрахункової області 0,1 МПа, що відповідає атмосферному тиску. Всі інші поверхні паралелепіпеда мають функцію симетрії, що визначається відсутністю тертя та звуженням потоку повітря [77].

При чисельному моделюванні вдалося дослідити силову взаємодію встановленого під різними кутами профілю NACA 0015 з потоком повітря. Знаючи величини сил та вхідну швидкість в розрахунковій області, визначаємо аналітичним шляхом значення коефіцієнту підйомної сили C_y та сили лобового опору C_x :

$$C_y = C_y = \frac{2Y}{\rho V^2 S'} \quad (3.49)$$

$$C_x = \frac{2X}{\rho V^2 S'} \quad (3.50)$$

де Y – підйомна сила;

X – сила лобового опору;

S – критична площа перерізу.

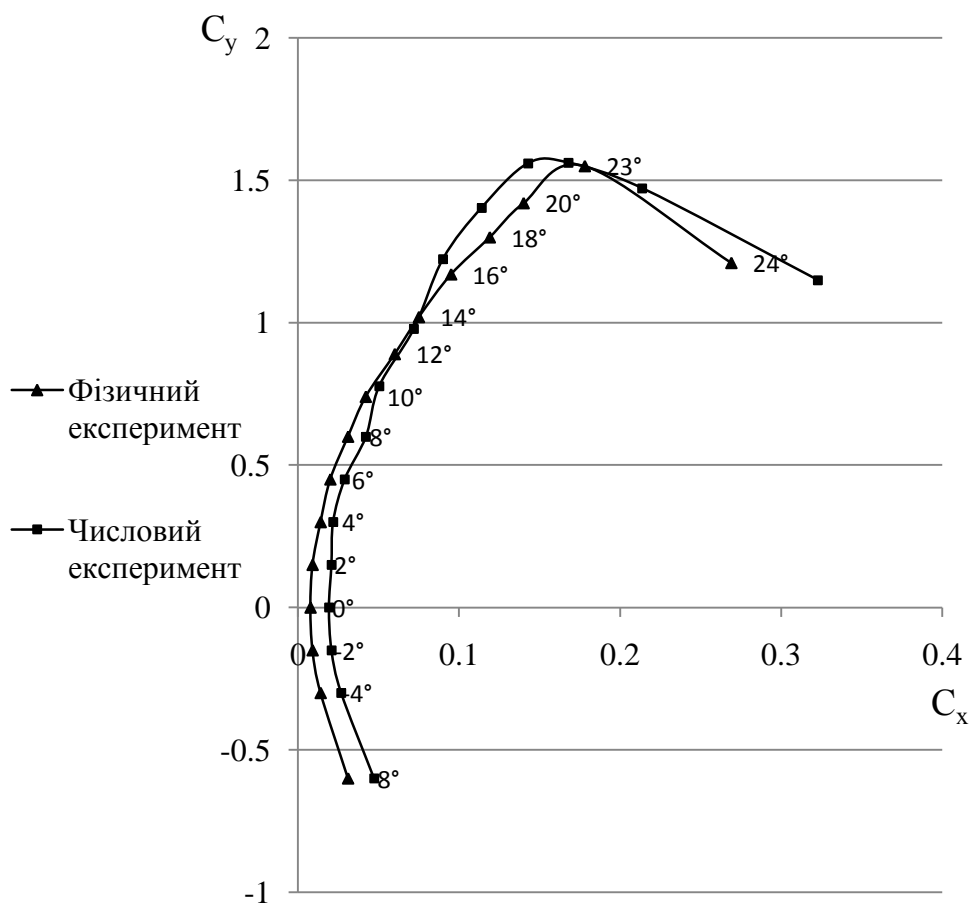
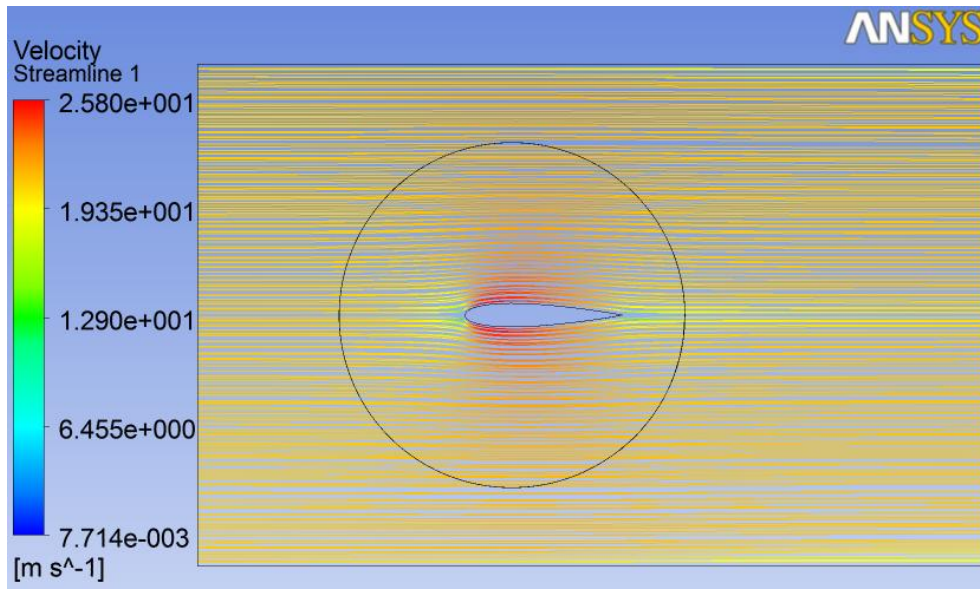


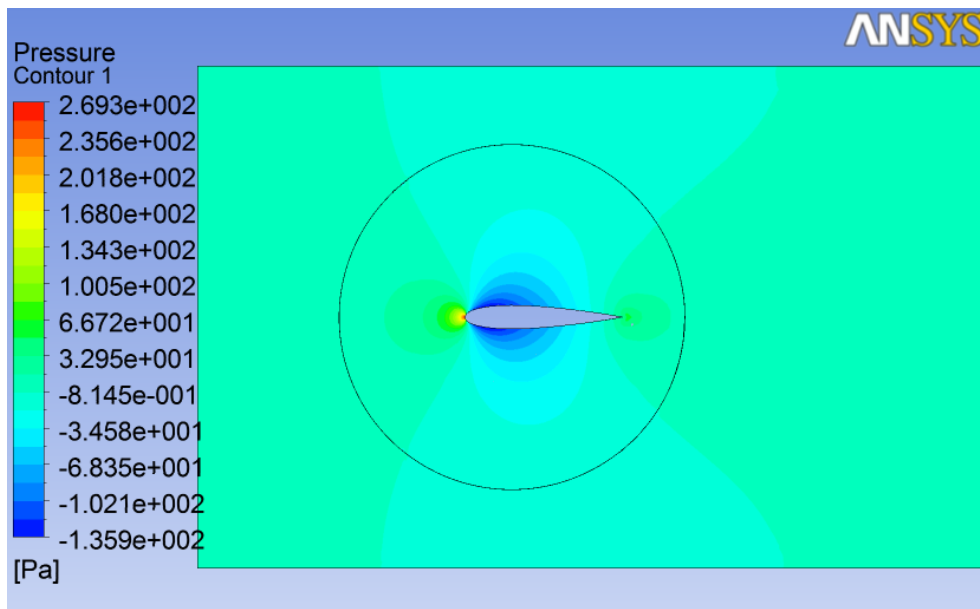
Рисунок 47 – Крива Лілієнтала для профілю НАСА 0015

Використання програмного комплексу ANSYS CFX для аеродинамічних розрахунків має одну характерну особливість – можливість візуалізації картин течії робочого середовища в об’ємі розрахункової області. Аналіз ліній току та зон відриву потоку від поверхні профілю дозволяє проводити корегування форми лопаті для заданих кінематичних характеристик потоку повітря з метою підвищення якості профілю та його аеродинамічних характеристик [78].

В експериментальній аеродинаміці випробування лопаті певного профілю проводиться до моменту утворення значних вихрових течій – до безвідривного обтікання. Якість профілю визначається величиною кута атаки при якому потік починає сходити не з задньої кромки, а з передньої.



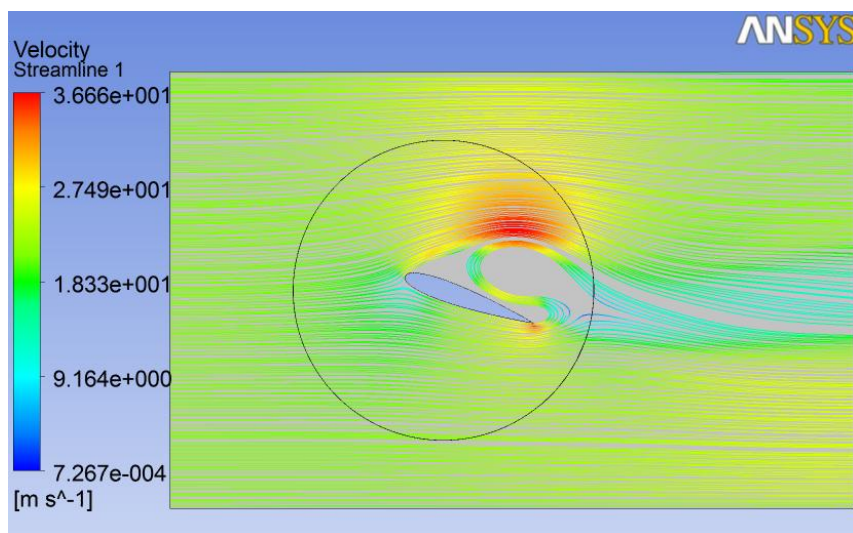
а)



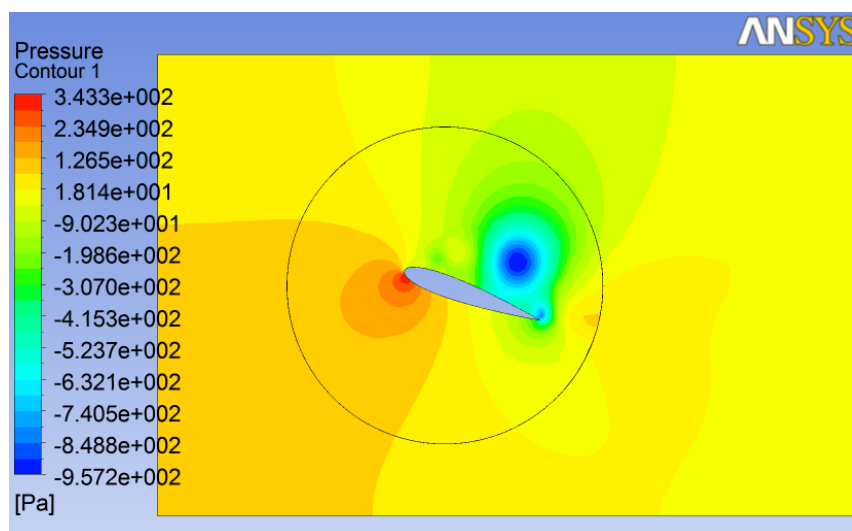
б)

Рисунок 48 – Візуалізація безвідривного обтікання профілю NASA 0015 при $\alpha=0^\circ$: а) – лінії току; б) – поля тисків

При цьому спостерігається значне вихроутворення та турбулізація потоку за профілем, що призводить до збільшення індуктивного опору. Чим більший сектор кутів атаки лопаті проходить з приляганням потоку до поверхні профілю, тим вища його аеродинамічна якість. Для NASA 0015 критичний кут атаки $\alpha=22^\circ$.



а)



б)

Рисунок 49 – Візуалізація відривного обтікання профілю NACA 0015 при $\alpha=22^\circ$: а) – лінії току; б) – поля тисків

3.4 Висновки

На основі імпульсної моделі вітроколеса розроблено двострумину модель, яка основана на ідеальному робочому процесі вітроколеса, що характеризується продукуванням максимального тягового зусилля в кожній точці кругової траєкторії руху лопаті. Використання даного методу теоретично дозволяє отримати максимально можливе значення коефіцієнту використання енергії вітру C_p при любых можливих характеристиках потоку повітря та при довільних режимах роботи вітроколеса.

Виконано аналіз практичного впровадження даного методу для покращення аеродинамічних характеристик вертикально-осьових вітротурбіни. Визначено, що найбільш раціонально використовувати введення допоміжного вектору швидкості в секторі нульового азимутального кута $\beta=0$.

Для аналітичного розрахунку АДХ ортогональних вітроколів необхідно мати залежність коефіцієнту підйомної сили та коефіцієнту лобового опору від кута атаки потоку повітря для заданого профілю. Дані характеристики можливо отримувати не тільки шляхом продувки профілю в аеродинамічній трубі, а і методом числового моделювання [79]. В розділі приведено алгоритм та необхідні параметри розрахункової області для реалізації даного методу. Також проведено порівняльний аналіз отриманих результатів з ранніми експериментальними даними.

4. ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ОРТОГОНАЛЬНОГО ВІТРОДВИГУНА

4.1. Експериментальний стенд

Перевірка викладених вище алгоритмів розрахунку та методів покращення аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів потребує проведення фізичного моделювання робочого процесу вітроколеса. Це дасть можливість детальніше дослідити фізичні явища при обертанні вітротурбіни та краще зрозуміти природу даних процесів.

За рекомендаціями щодо натурального аеродинамічного експерименту [80], вирішено, що основним умовам фізичного дослідження АДХ ортогонального колеса відповідає експериментальний стенд типу аеродинамічна труба. Вирішено провести розрахунок геометричних показників труби та характеристик потоку повітря в її робочій зоні при наступних вхідних даних:

- діапазон швидкостей потоку в трубі від 0 до 20 м/с;
- діаметр робочої зони 1000 мм.

Діаметр труби обрано виходячи з того, що досліджувана модель вітроколеса має висоту $H=400$ мм та радіус ротора $R=200$ мм (рис.50) і внутрішні стінки стенду не повинні впливати на процес обтікання вітротурбіни потоком повітря.

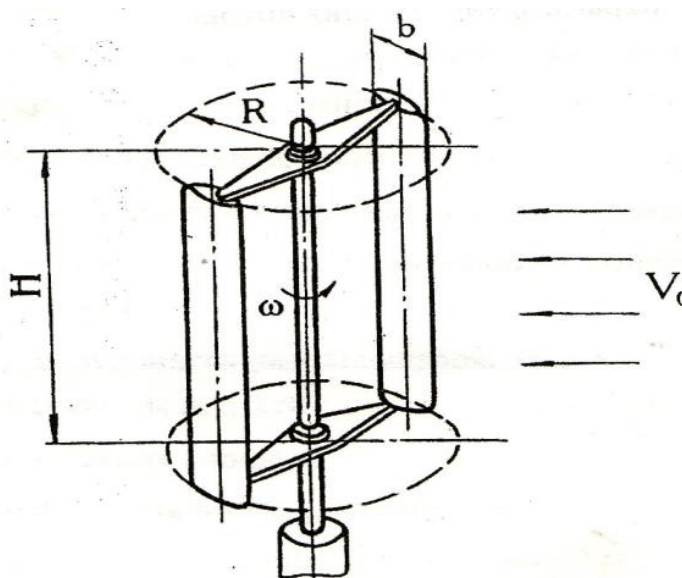


Рисунок 50 – Схема досліджуваного вітроколеса

З існуючих конструктивних схем аеродинамічних труб обрано відкриту трубу всмоктуючого принципу дії з закритою робочою зоною. Для визначення геометричних параметрів експериментального стенду, що задовольняють умовам використання його для дослідження аеродинамічних характеристик ОВД проведено чисельний розрахунок характеристик потоку в робочій зоні труби при різних швидкостях потоку.

Досліджено чотири конструктивних схеми аеродинамічної труби (Додаток Б.):

- циліндрична частина з осьовим вентилятором;
- циліндрична частина з осьовим вентилятором та зовнішнім конфузором;
- циліндрична частина з осьовим вентилятором, зовнішнім та внутрішнім конфузором;
- циліндрична частина з осьовим вентилятором, з двома конфузорами та випрямною ґраткою.

Попереднє моделювання виконане для циліндричної частини аеродинамічної труби з осьовим вентилятором. Метою якого було визначення можливості створення вісесиметричного потоку з нормальним градієнтом швидкості в робочій зоні тільки за рахунок певного видовження циліндричної частини.

Як показано на рисунку 51а, при відношенні довжини до діаметру $L/d=6$, в робочій зоні спостерігається значний перепад швидкості по перерізу труби. Досліджувана зона характеризується не вираженим ядром потоку та високою турбулентністю.

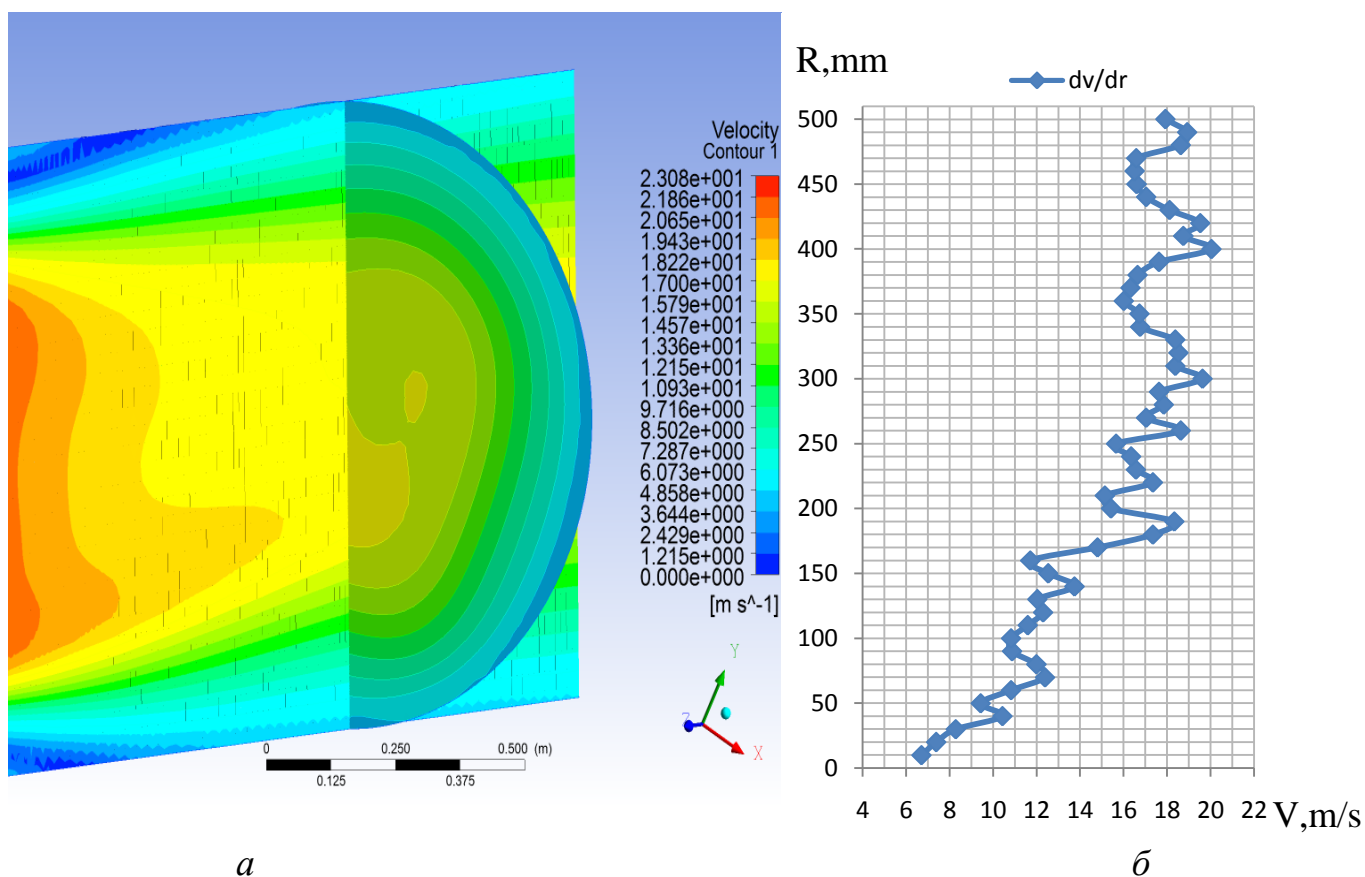


Рисунок 51 – Характеристик потоку в робочій зоні стенду для циліндричної ділянки: *a* – поля швидкостей отримані числовим моделюванням; *б* – градієнт вектора швидкості отриманий шляхом зондування потоку.

Для покращення розподілу швидкості в робочій частині труби на вході встановлюємо конфузор з коефіцієнтом притиснення $n=3$. Це призводить до зменшення вихрової зони від вхідних крамок труби та більш рівномірного розподілення тиску. Але в центрі потоку спостерігається зменшення швидкості за рахунок прискорення повітря біля стінок труби.

Для ліквідації негативного прискорення на периферії труби встановлюємо на вході в допоміжний конфузор. Оптимальні показники потоку визначаються шляхом зміни коефіцієнту притиснення внутрішнього конфузора (Додаток В).

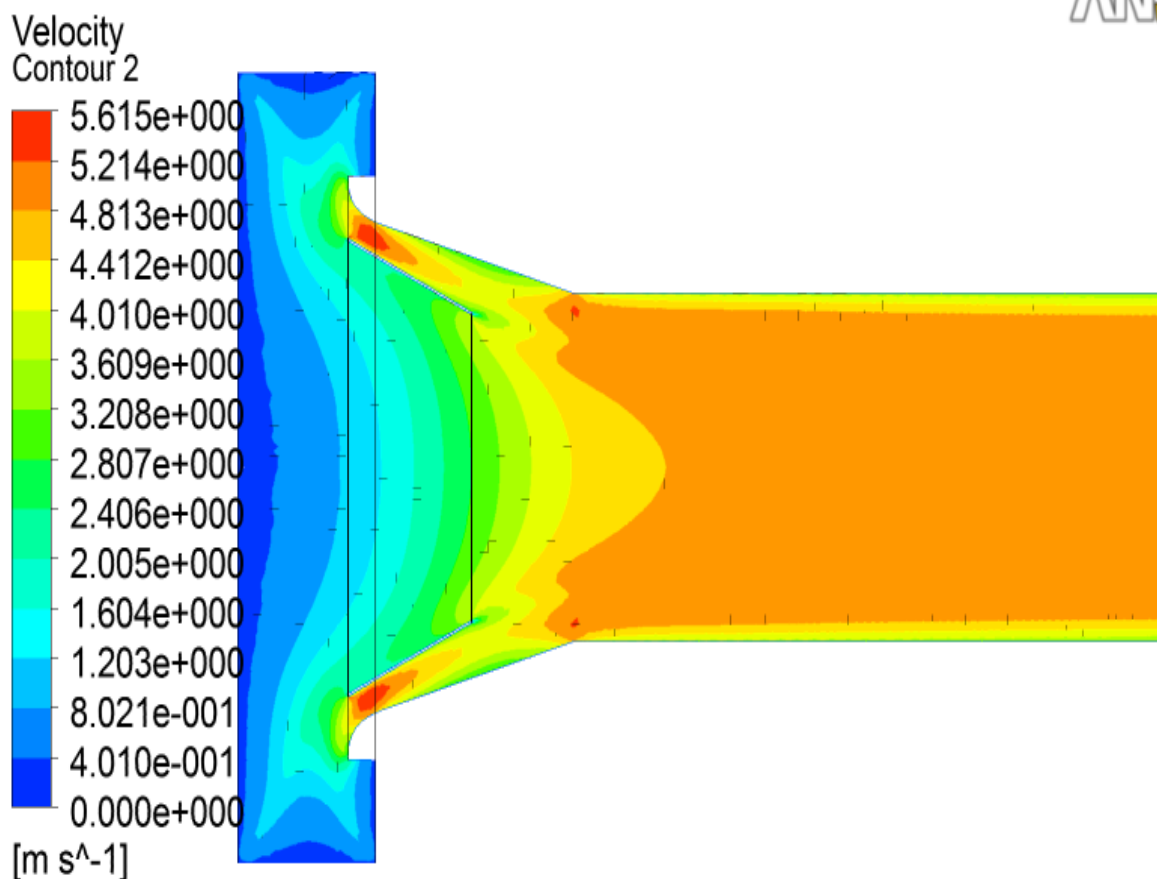


Рисунок 52 – Розподіл швидкості потоку по перерізу труби при встановленому внутрішньому конфузорові з коефіцієнтом притиснення $n=2,34$

На стадії чисельного моделювання вісесиметричного потоку з задовільним градієнтом швидкості вдалося досягти з циліндричною ділянкою труби довжиною 5 метрів та двома конфузорами з коефіцієнтами притиснення потоку $n=3$, для зовнішнього, та $n=2,34$, для внутрішнього.

По мірі виготовлення окремих частин експериментальної установки проводилося зондування потоку в робочій частині труби. Цей етап проектування необхідний для доведення правильності проведених попередньо чисельних розрахунків. Для зондування потоку використовували електронний лабораторний анемометр TES-1340, що дозволяє визначати значення швидкості потоку з точністю 0,01 м/с. Виміри проводилися по поперечному перерізу робочої частини труби діаметром 1000 мм через кожні 10 мм.

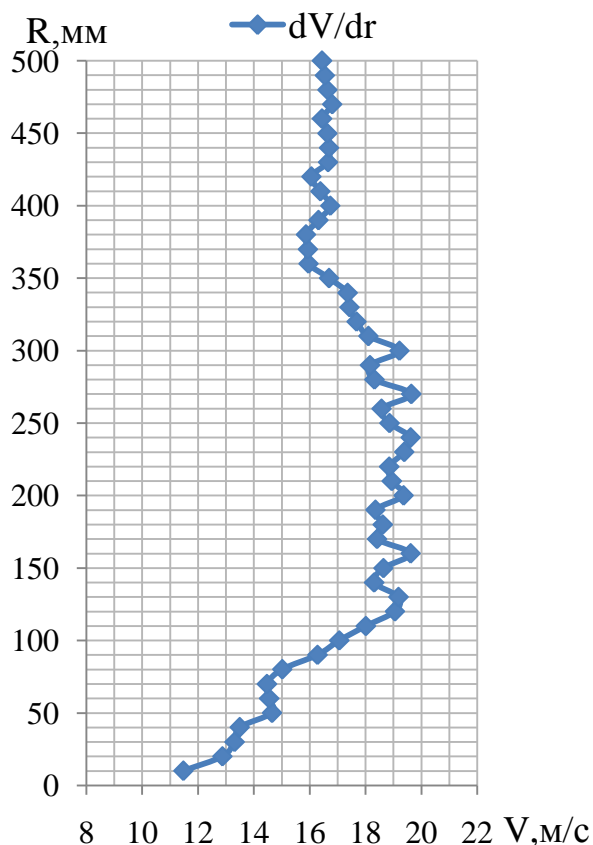


Рисунок 53 – Розподіл швидкості потоку по перерізу робочої зони аеродинамічної труби для циліндричної частини та зовнішнього конфузора

Подібність експериментальних та чисельних характеристик потоку в робочій частині труби спостерігається і з вмонтованим зовнішнім конфузуром. В центральній частині установки потік сповільнюється, тоді як на периферії відбувається підвищення швидкості за рахунок збільшення питомої витрати повітря по причині стиснення потоку.

Досягти більш плавного розподілу швидкості по перерізу труби вдалося шляхом встановлення допоміжного, внутрішнього конфузору. На рисунку 54 зображено графічну залежність градієнту швидкості для даного випадку. Варто зазначити, що при зондуванні відмічено наявність осьового вихору по всій довжині аеродинамічної труби. Для його ліквідації запропоновано встановлення перед робочою зоною випрямної ґратки. Виготовлено її з листової сталі товщиною 1 мм. Завдяки їй поперечний переріз труби розбито на комірки 50*50 мм, довжиною 100 мм.

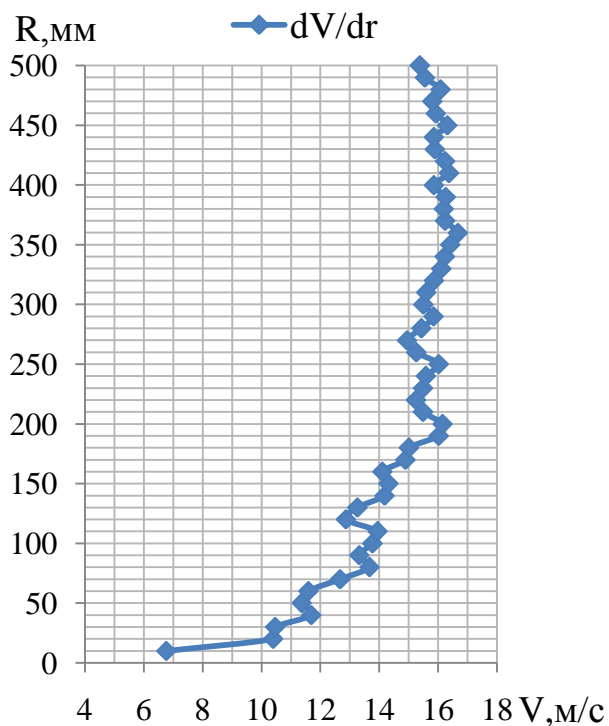
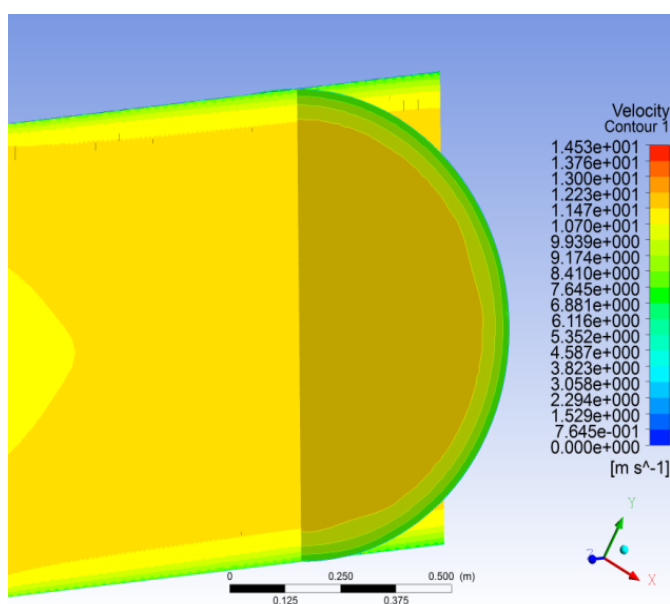
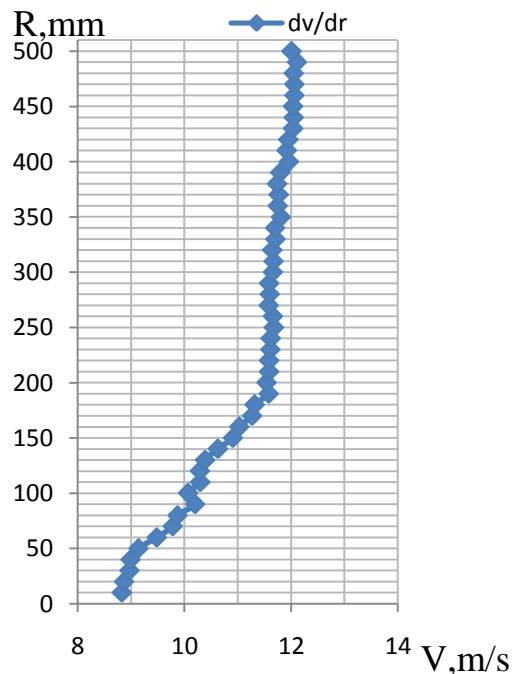


Рисунок 54 – Розподіл швидкості потоку по перерізу робочої зони аеродинамічної труби для циліндричної частини з двома конфузорами.



a



б

Рисунок 55 - Характеристик потоку в робочій зоні стенду для циліндричної ділянки з вмонтованими конфузорами та випрямляючою ґраткою: *a* – поля

швидкостей отримані числовим моделюванням; b – градієнт вектора швидкості отриманий шляхом зондування потоку

На рисунку 55 приведено порівняння розподілення швидкості по об'єму робочої зони при числовому експерименті та зондуванні. На відміну від першої схеми, в трубі чітко видно сформоване ядро потоку з відсутністю тангенціальної складової швидкості. Від центру до діаметру 650 мм величина перепаду вектору швидкості становить не більше 4% від максимального значення. Далі, при наближенні до стінок труби, спостерігається поступове сповільнення потоку до швидкості, що складає 70% від максимальної.

Розроблена аеродинамічна труба складається з осьового вентилятора 1, циліндричної частини 2, спрямляючого апарату 3 (складається з двох конфузурів з різними коефіцієнтами притиснення потоку), випрямна ґратки 4 та робочої зони 5.

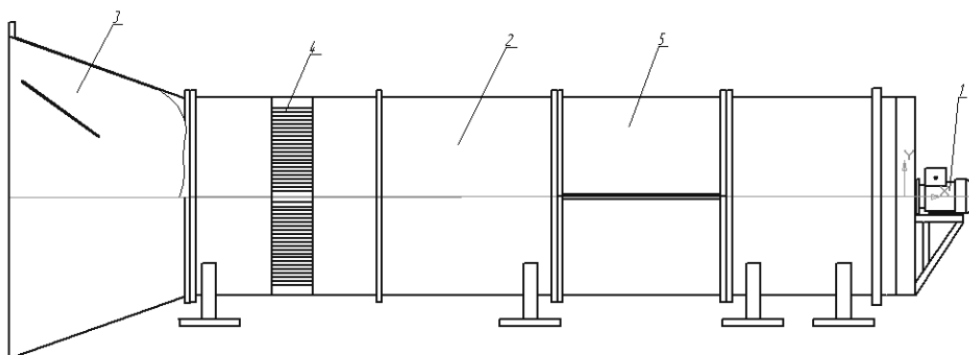


Рисунок 56 – Конструктивна схема аеродинамічної труби

Аналізуючи отримані дані можна зробити висновок, що за допомогою двох конфузурів та випрямляючої решітки в робочій частині аеродинамічної труби можна отримати характеристики потоку повітря які відповідають необхідним умовам для дослідження фізики робочого процесу ортогональних вітротурбін та визначення їх аеродинамічних характеристик.

На наступному етапі проведено підрахунок собівартості стенду враховуючи різні матеріали для виготовлення. Оптимальним варіантом обрано побудова

складальної конструкції з полівінілхлориду (ПВХ). Способом гарячого вальцювання з листів ПВХ пластику виготовлено циліндричні та конічні частини труби. Стики припаяні за допомогою пластикової присадки. Для жорсткості в кожену зону впаяні кільця з товстого матеріалу. Через них окремі частини з'єднуються між собою різьбовим кріпленням. Вся конструкція монтується на металевій зварній рамі. Через прямокутний фланець приєднується осьовий вентилятор Multi-Wing з діаметром крильчатки 1000 мм.



Рисунок 57 – Змонтована аеродинамічна труба

Для можливості регулювання швидкості потоку в електричну схему вентилятора вмонтовано частотний перетворювач струму. За його допомогою максимальна швидкість потоку в робочій частині досягає значення 25 м/с.

За допомогою розміщення довгих тонких стрічок в трубі вдалося візуалізувати карту течії. В діапазоні від 3 до 12 м/с лінії току розташовані вздовж труби. Значної турбулізації потоку не спостерігається. При подальшому збільшенні швидкості відбувається перемішування та переплетення стрічок між собою та виникає кутова складова вектора швидкості, яка при 20 м/с осьового потоку складає 0,6 м/с.

4.2. Модель ортогональної вітротурбіни

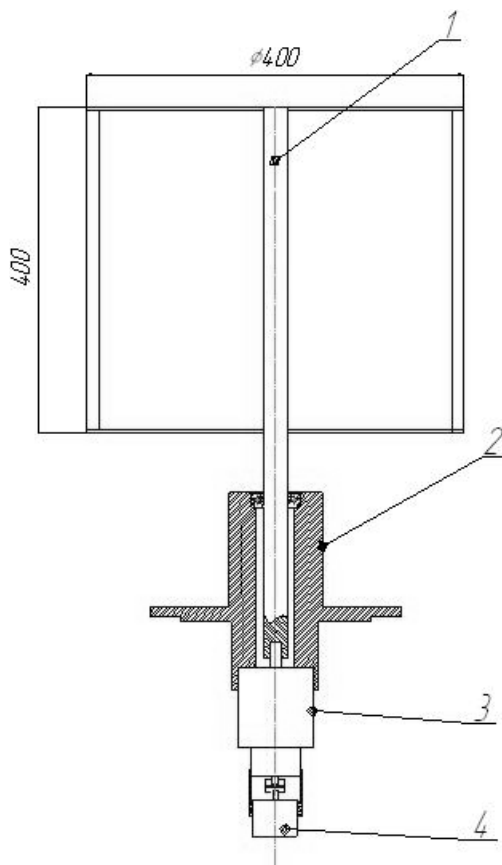


Рисунок 58 – Конструкція моделі вітрової турбіни

Об'єктом дослідження в подальшій роботі є робочий процес ортогональних вітродвигунів. Турбіна складається з ротору 1, який через радіально-упорний підшипник встановлений в кронштейні 2 жорстко з'єднаний з якорем серводвигуна на постійних магнітах 3. На валу якого через пластинчасту муфту закріплено оптичний датчик положення ротора та тахометр.

Ротор вітротурбіни складається з двох дисків, лопатей аеродинамічного профілю та валу. В дисках виготовлено отвори для можливості регулювання кута установки лопатей, їх кількості та зовнішнього діаметру вітроколеса [81].

Конструктивна схема складається з одного радіально-упорного підшипника для зменшення величини механічного моменту опору. При попередній конструкції, що мала вигляд двох радіальних опор, опір в підшипниках був занадто високий і тягового моменту на роторі вітроколеса не вистачало для запуску турбіни.

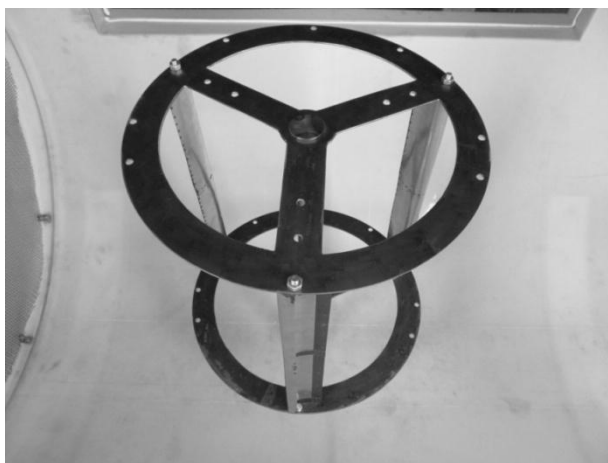


Рисунок 59 – Вмонтоване вітроколесо в робочій зоні аеродинамічної труби

В якості генератора обрано серводвигун на постійних магнітах ДИНАМО-СЛИВЕН. Основною особливістю роботи даного двигуна в електричній схемі турбіни є те, що виникає можливість визначення механічного к.к.д системи. В режимі двигуна електричним шляхом визначається необхідна потужність струму для обертання. При випробуванні турбіни з клем генератора вимірюється потужність виробленого струму. Сумуючи значення отримані в режимі двигуна та в режимі генератора отримуємо практично теоретичну характеристику вітроколеса.

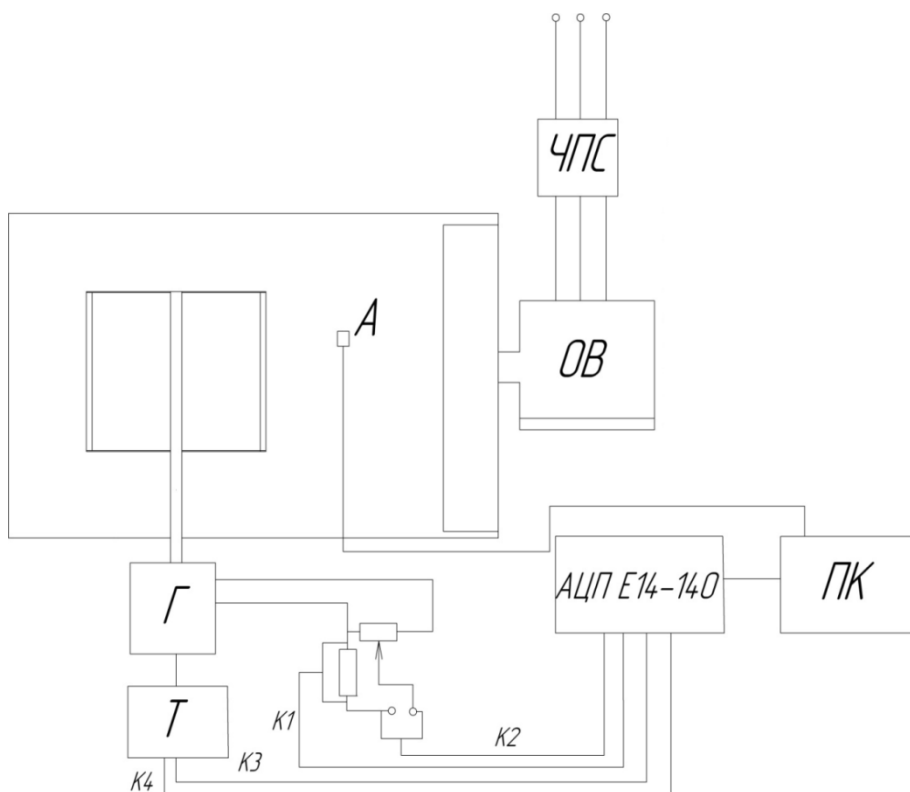


Рисунок 60 - Принципова схема стенда

Таблиця 4.1 – Умовні позначення принципової схеми стенда

Умовн е позначення	Назва	К -ть	Примітка
ЧПС	Частотний перетворювач струму	1	-
ОВ	Осьовий вентилятор	1	-
А	Анемометр лабораторний	1	TESS-1340
Г	Генератор	1	ДИНАМО-СЛИВЕН 8-6/2,5
Т	Тахометр	1	Фотоелектричний енкодер А58В-F
АЦП	Аналого-цифровий перетворювач	1	Е 14-140
ПК	Персональний комп'ютер	1	-
К1-К4	Цифрові сигнали	4	-

Експериментальне дослідження енергетичної характеристики вітротурбіни було проведене згідно з методикою, яка регламентована у відповідних рекомендаціях щодо випробувань гідравлічних машин [82]. Наведемо залежності, за допомогою яких було визначено необхідні параметри.

Потужність, яка генерується вітротурбіною, визначалася електричним шляхом. Напряга та стум якоря генератора визначалися за допомогою електронного блоку управління, який через аналого-цифровий перетворювач передає дані на персональний комп'ютер. Потужність турбіни N визначалась за формулою:

$$N = U \cdot I, \quad (4.1)$$

де U – напруга генератора, В;

I – сила струму якоря генератора, А.

Енергетична характеристика турбіни N_T визначалася шляхом віднімання показників характеристики холостого ходу N_x від показників характеристики, визначеної моделювання робочого процесу вітроколеса в аеродинамічній трубі N_m , тобто

$$N_T = N_m - N_x. \quad (4.2)$$

Величина швидкості потоку повітря через робочу зону аеродинамічної труби визначалася за допомогою електронного лабораторного анемометра TESS-1340.

Кількість обертів ротору турбіни визначалися з використанням фотоелектричного енкодера A58B-F.

4.3 Оцінка похибок результатів вимірювань

За основу визначення похибок, які мали місце при визначенні основних параметрів гідромлина, були використані відповідні залежності аналітичного характеру наведені в [83-85].

Відносна гранична похибка вимірювання електричної зведеної потужності ΔN_T , що генерується вітроколесом, визначалася за формулою

$$\Delta N_T = \sqrt{\delta P_e^2 + \delta \eta_e^2}, \quad (4.3)$$

де δP_e – відносна гранична похибка вимірювання електричної потужності, %;

$\delta \eta_e$ – відносна гранична похибка визначення ККД електродвигуна, %.

Відносна гранична похибка вимірювання напруги генератора обчислювалася за формулою

$$\Delta U = \frac{100 \cdot \Delta U}{U}, \quad (4.4)$$

де ΔU – абсолютна гранична похибка вимірювання напруги генератора, В;

U – експериментально визначена величина напруги, В.

Відносна гранична похибка вимірювання сили струму генератора обчислювалася за формулою

$$\Delta I = \frac{100 \cdot \Delta I}{I}, \quad (4.5)$$

де ΔI – абсолютна гранична похибка вимірювання сили струму, А;

I – експериментально визначена величина сили струму, А.

Відносна гранична похибка вимірювання швидкості повітря в робочій частині аеродинамічної труби обчислювалася за формулою

$$\delta V = \frac{100 \cdot \Delta V_0}{V_0}, \quad (4.6)$$

де ΔV_0 – абсолютна гранична похибка вимірювання швидкості потоку, м/с;

V_0 – експериментально визначена величина швидкості, м/с.

Відносна гранична похибка вимірювання частоти обертання ротора δn обчислювалася за формулою

$$\delta n = \frac{100 \cdot \Delta n}{n}, \quad (4.7)$$

де Δn – абсолютна гранична похибка вимірювання частоти обертання ротора, об/хв;

n – експериментально визначена величина частоти обертання, об/хв.

Абсолютна гранична похибка вимірювання частоти обертання визначалася як сума похибки тахометра та похибки вимірювання.

Відносна гранична похибка вимірювання лінійних розмірів елементів вітроколеса δL розраховувалася за формулою

$$\delta L = \frac{100 \cdot \Delta L}{L}, \quad (4.8)$$

де ΔL – абсолютна гранична похибка вимірювання геометричного розміру, м;

L – величина параметра, що визначається, м.

Відносна гранична похибка вимірювання часу проведення експерименту δT визначалася за формулою

$$\delta T = \frac{100 \cdot \Delta T}{T}, \quad (4.9)$$

де ΔT – абсолютна гранична похибка вимірювання часу, хв;

T – експериментально визначене значення часу, хв.

Середньоквадратичні відносні похибки непрямих вимірювань обчислювалися за формулою [84]:

$$\sigma_{\varepsilon} = \frac{\Delta}{2}, \quad (4.10)$$

де Δ – відносна гранична похибки параметру, що визначається, %.

Результати визначення значень похибок прямих та непрямих вимірювань наведені відповідно в табл. 3.2 та 3.3. Розрахунки похибок результатів випробувань свідчать про те, що вони знаходяться в допустимих межах.

Таблиця 4.2 – Похибки прямих вимірювань

Параметр, що вимірюється, одиниця виміру	Середній рівень параметра	Абсолютна гранична похибка	Відносна гранична похибка, %	Середньо квадратична відносна похибка, %
Зовнішній діаметр вітроколеса D , мм	320	0,1	0,03	0,015
Швидкість потоку повітря V_0 , м/с	10	0,01	0,10	0,05
Напруга генератора U , В	20	0,05	0,25	0,125
Сила струму генератора I , А	1	0,01	1	0,5
Частота обертання n , об/хв	400	1	0,25	0,125

Таблиця 4.3 – Похибки непрямих вимірювань

Параметр, що визначається, одиниця виміру	Середній рівень параметра	Відносна похибка, %	Середньо квадра-тична відносна похибка, %
Потужність вітрової турбіни N_T , Вт	20	1,25	0,625

Для доведення працездатності експериментального стенду проведемо визначення інтегральних залежностей для вітроколеса дослідженого раніше. Для порівняння характеристик отриманих в аеродинамічній трубі з раніше визначеними залежностями обрано лопать крилового незамкненого профілю КН-4. Ротори даної геометрії досліджувалися професором Коваленко В.М. в лабораторії вітроенергетики Сумського державного університету в 1989-1993 роках [86]. На рисунку б1 зображено порівняльний графік для аеродинамічної характеристики ротору КН-4 отриманої в лабораторії Коваленком В.М. та визначеної в аеродинамічній трубі кафедри прикладної гідроаеромеханіки.

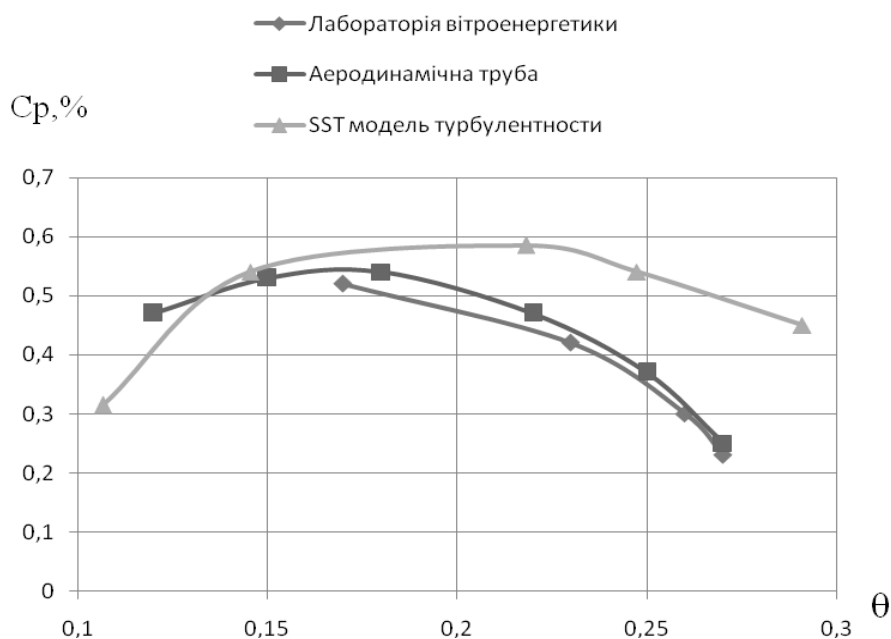


Рисунок б1- Аеродинамічна характеристика ортогональної турбіни з лопатями профілю КН-4

З рисунку 61 видно чітку подібність положення кривих. Нами отримана характеристика знаходиться вище по осі коефіцієнту використання енергії вітру за рахунок використання системи електричного визначення механічних втрат в опорах ротору та генератору. Завдяки цьому вихідна залежність приближається за значенням до теоретичної.

Провівши аналіз виконаних робіт, можна зробити висновок, що створений стенд для визначення аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів відповідає нормам для подібних установок. Структура потоку повітря має встановлений характер з чітко виділеним ядром. Перепад швидкості в ньому становить 4% від максимального значення швидкості. При середньому значенню вектора швидкості вище 12 м/с спостерігається не значна турбулізація потоку.

Порівнюючи отримані характеристики турбіни можна сказати, що ці дані близькі з залежностями отриманими раніше. Тобто на даному стенді можна проводити дослідження робочого процесу ортогональних вітроколес з високою точністю.

4.4 Дослідження методів підвищення енергетичних показників ортогональних вітродвигунів фізичним експериментом.

4.4.1 Дослідження гнучких лопатей.

Покращення процесу самозапуску ОВД вирішуємо шляхом використання в якості робочих органів профільованих гнучких лопатей парусного типу. Натурний експеримент проводився на різних режимах роботи турбіни зі змінними геометричними показниками вітроколеса.

При експериментальному дослідженні розглянуто лопаті з хордою $b=100$ мм на вітроколесах з зовнішнім діаметром D 220мм, 330 мм та 460мм. Відповідно коефіцієнт заповнення вітроколеса для розглянутих випадків $\sigma=0,65$, $\sigma=0,94$ та $\sigma=1,36$ [72].

По мірі дослідження змінювалася величина вільної гнучкої поверхні лопаті шляхом нанесення рідкого пластику на тканину. При його застиганні на місті

нанесення утворювалася міцна поверхня аеродинамічної форми. Саме таким чином отримано три конструкції гнучких лопатей.

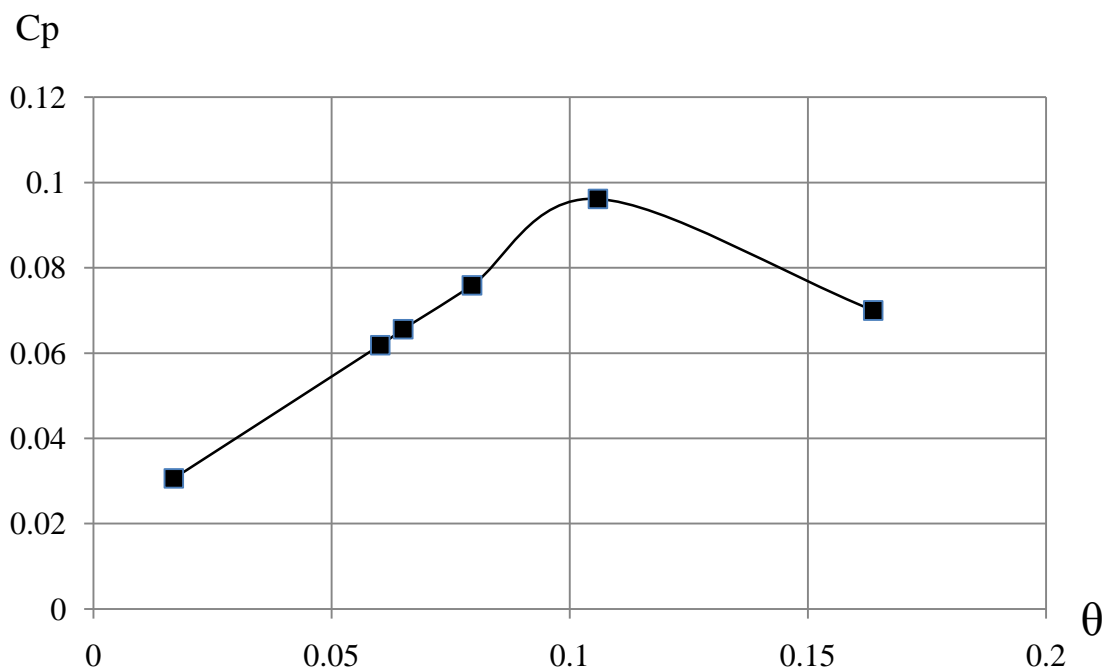


Рисунок 62 – Залежність $C_p=f(\theta)$ для конструкції лопаті з повністю гнучкою поверхнею

На рисунку зображено основну графічну залежність $C_p=f(\theta)$ для повністю гнучкої профільованої лопаті. Робочий процес вітроколеса з такою лопаттю характеризується відносно високим значенням стартового крутного моменту, що виражається в коефіцієнті C_m . Максимальне значення якого для даної конструкції $C_{m \max}=0,14$. На відміну від жорстких симетричних профілів максимальне значення крутного моменту спостерігається на стартових обертах вітроколеса. Оптимум коефіцієнта використання енергії вітру знаходиться в зоні низьких швидкостей $\theta=0,1$. Це можна пояснити тим, що при русі лопаті «на вітер» спостерігаються значні коливання тканини, що призведе підвищення лобового опору лопаті та створення вихрового сліду за нею. Тому ротор не в змозі розвинути високі оберти.

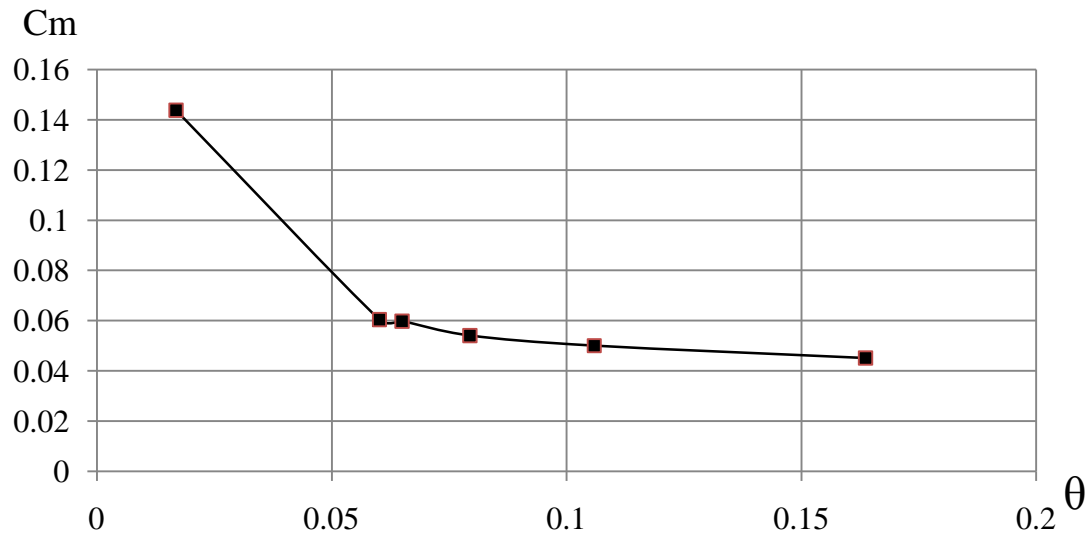


Рисунок 63 – Залежність $C_m=f(\theta)$ для повністю гнучкої лопаті

Аеродинамічні характеристики ротору покращуються з використанням симетричних лопатей з гнучкою частиною за максимальною товщиною профілю (рис.64). Характеристика $C_p=f(\theta)$ досягає значень швидкості $\theta=0,5$. На рисунку 65 приведено графічну залежність ефективності роботи вітроколеса з різними коефіцієнтами заповнення ротора σ з використанням лопатей з гнучкою частиною за максимальною товщиною профілю. Максимальне значення коефіцієнту використання енергії вітру $C_p=0,32$ отримано при $\sigma=1,36$.

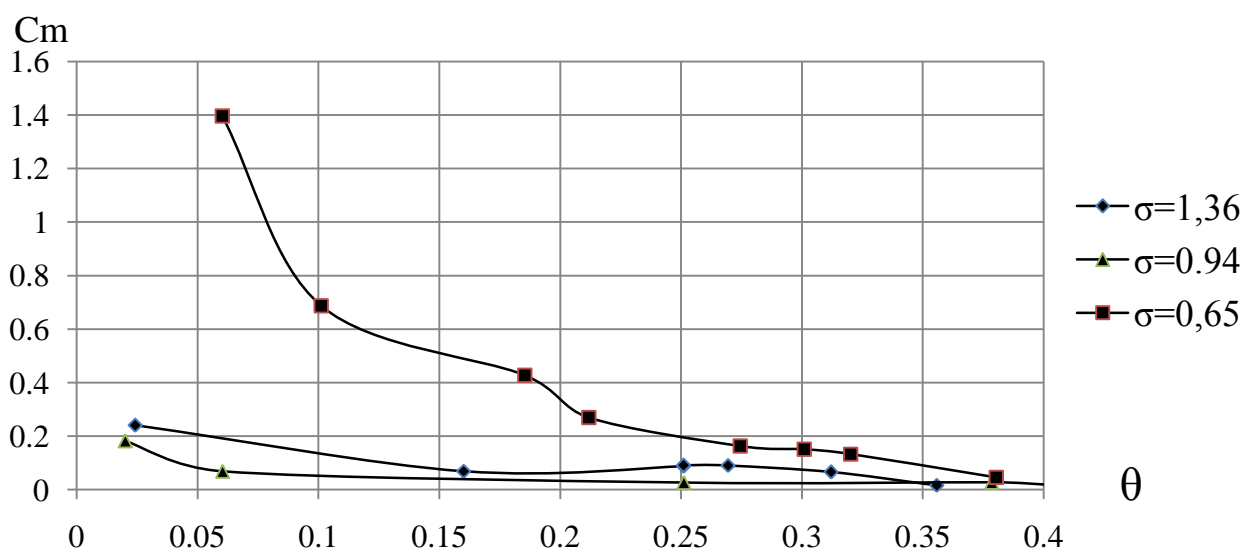
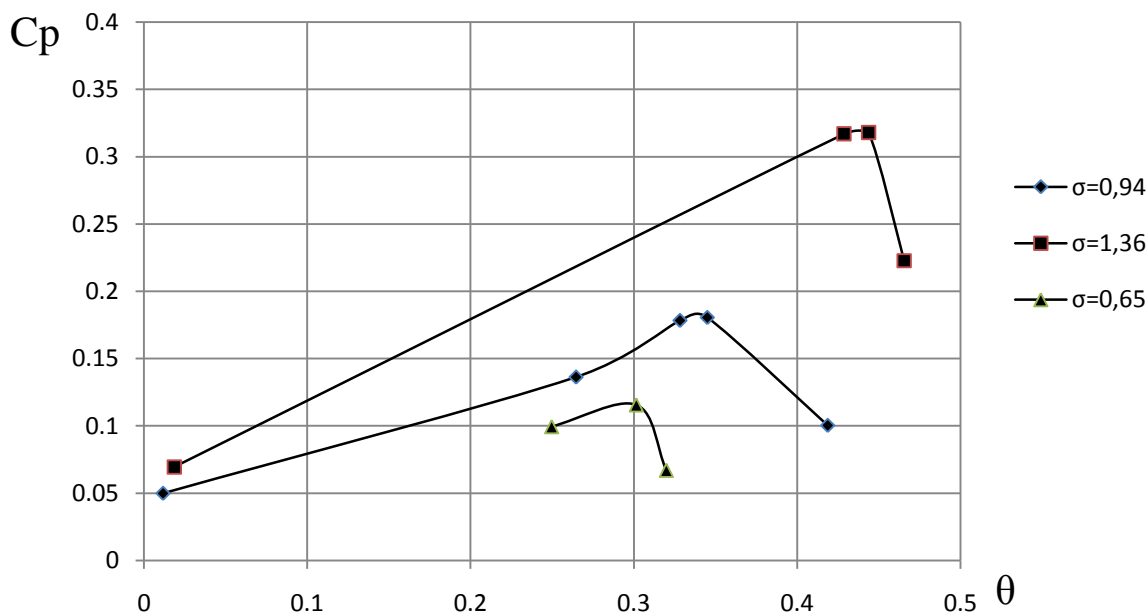


Рисунок 64 – Залежність $C_m=f(\theta)$ для симетричної лопаті з гнучкою частиною за максимальною товщиною лопаті



Кращі показники отримано для симетричної профільованої гнучкої лопаті з половиною гнучкої частини за максимальною товщиною профілю. Характеристику можна поділити на дві чітко виражені зони: зони роботи вітроколеса на різниці лобових опорів лопатей до швидкості $\theta=0,5$; та зона використання підйомної сили при швидкостях $\theta > 0,5$. Величина коефіцієнта стартового крутного моменту досягає свого максимуму на низьких обертах і становить $C_m = 0,47$.

Для стандартного профілю NACA 0015 в діапазоні швидкостей $\theta=0\dots 2$ величина коефіцієнту крутного моменту в основному від'ємна величина (рис.68) [87]. Саме цей негативний ефект призведе до низької здатності самозапуску ортогонального вітроколеса. При використанні гнучкої лопаті стартовий крутний момент підвищується на порядок. При розвиненні вітроколесом більших обертів його величина спадає до значення стандартного профілю і знаходиться в межах $C_m=0,1$.

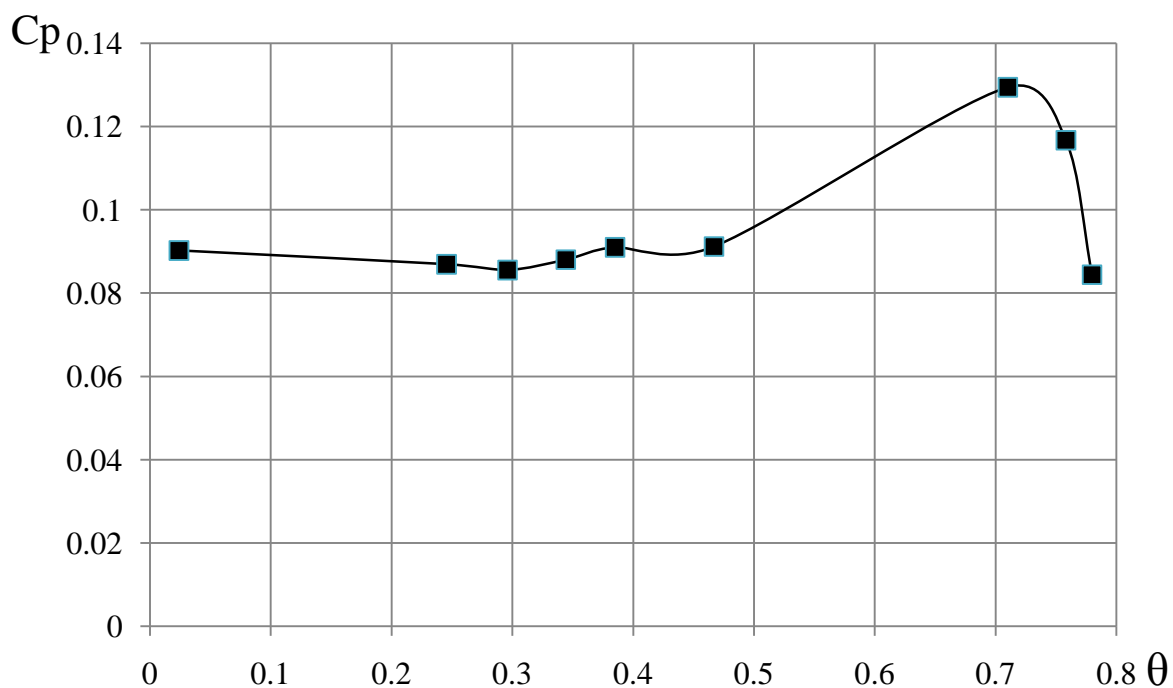


Рисунок 66 – Залежність $C_p = f(\theta)$ симетричної лопаті з половиною гнучкої частини за максимальною товщиною лопаті.

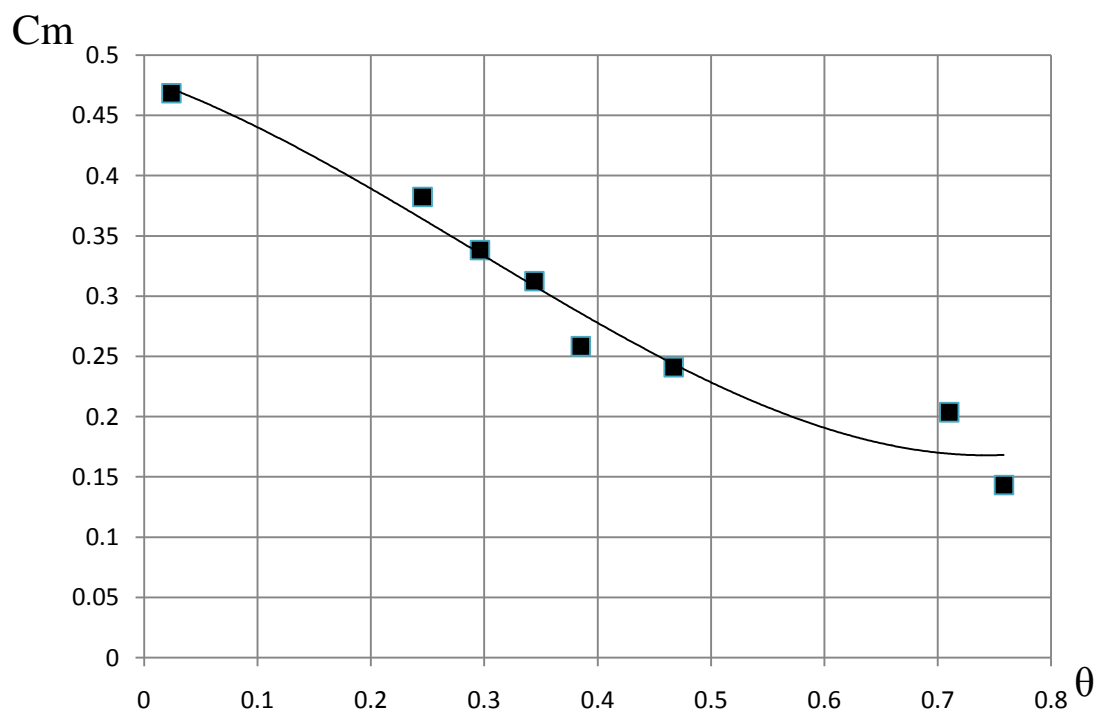


Рисунок 67 – Залежність $C_m = f(\theta)$ для симетричної лопаті з половиною гнучкої частини за максимальною товщиною лопаті.

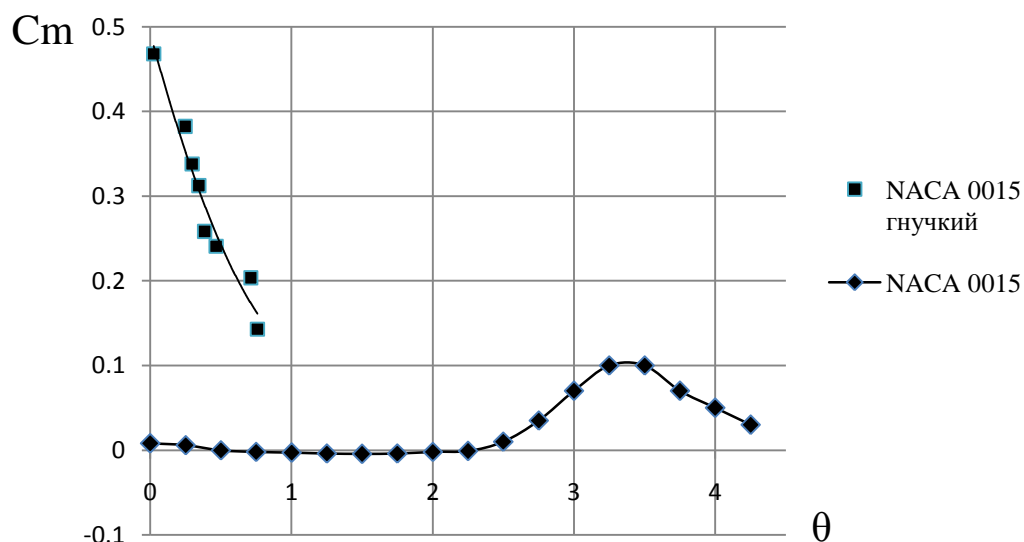


Рисунок 68 – Порівняння залежностей $C_m = f(\theta)$ для стандартної лопаті з профілем NASA 0015 та гнучкої лопаті NASA 0015 з половиною гнучкої частини за максимальною товщиною.

4.4.2. Дослідження впливу додаткового вектору швидкості на енергетичні показники вітроколеса.

Для перевірки гіпотези про зміщення кута атаки вектору відносної швидкості \vec{W} шляхом введення допоміжного вектору швидкості в робочу зону вітроколеса, проведемо комплекс експериментальних досліджень.

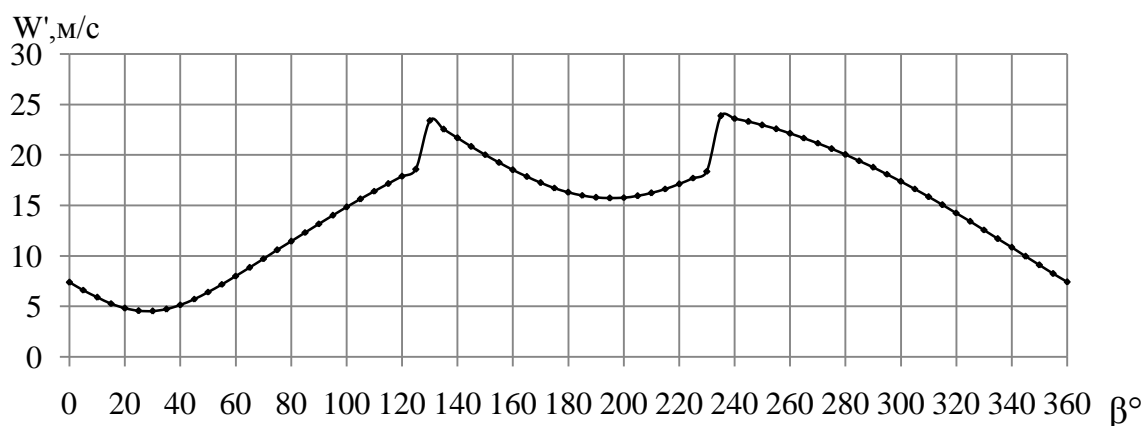


Рисунок 69 – Аналітична залежність $W' = f(\beta)$ при вхідних умовах $\theta = 0,6$, $\vec{W} = 20 \text{ м/с}$, $\alpha = 20^\circ$, $\vec{V}_0 = 10 \text{ м/с}$.

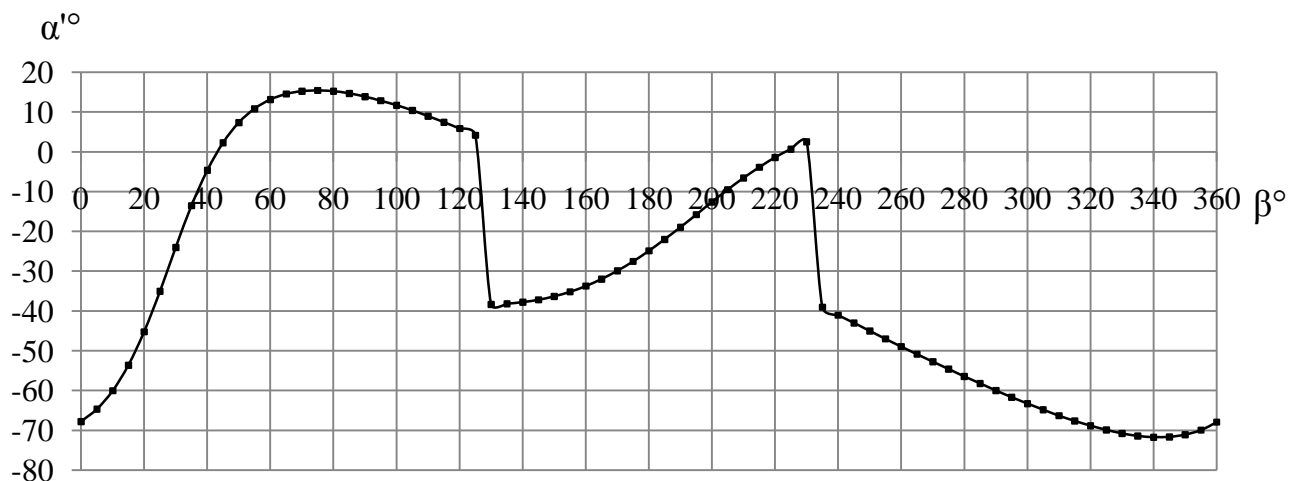


Рисунок 70 – Аналітична залежність $\alpha'=f(\beta)$ при вхідних умовах $\theta=0,6$,
 $\bar{W}=20\text{ м/с}$, $\alpha=20^\circ$, $\bar{V}_0=10\text{ м/с}$.

Основну увагу привернемо до частини вітроколеса в якій лопать рухається «на потік» (рис.71). В даному секторі робочий процес вітроколеса характеризується високими показниками сили лобового опору та , як наслідок, низькими значеннями крутного моменту. Фізичні процеси, що відбуваються в цій зоні значною мірою впливають на загальні енергетичні показники вітрової турбіни. Збільшення сили лобового опору призводить до зменшення величини коефіцієнту використання енергії вітру θ , оскільки постійне гальмування лопаті не дозволяє реалізувати розгін вітроколеса. Для симетричного профілю лопаті в даній зоні настає момент, коли кути атаки мають невеликі значення, оскільки вектор відносної швидкості \bar{W} паралельний хорді лопаті. Тому генерована підйомна сила є незначною, коефіцієнт використання енергії вітру C_p також зменшується.

Допоміжний вектор швидкості вводимо в робочу зону вітроколеса шляхом установки екрану. Розглянуто два типи екранів: плаский, довжиною 120 мм, та радіусний, довжиною 170 мм.

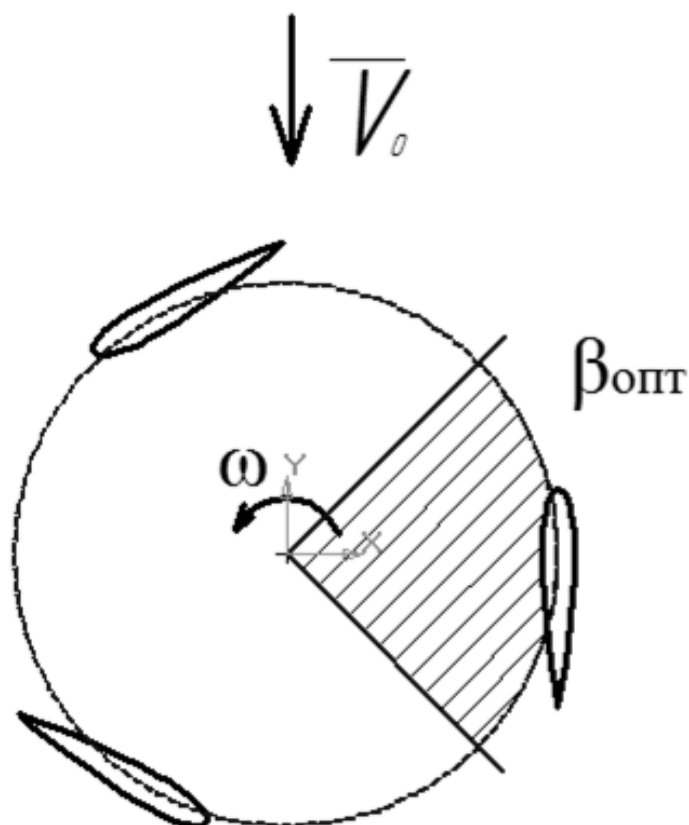


Рисунок 71 – Сектор кутів β для введення допоміжного вектору швидкості \overline{W} .

Використовуючи аналітичні залежності розрахунку величини та куту атаки допоміжного вектору швидкості \overline{W} приведені в розділі 3.2 визначаємо, що для обраного нами сектору доцільно змістити трикутник швидкостей на величину $\overline{W}=5,5$ м/с під кутом атаки $\alpha'=68^\circ$. Розглядаємо режим роботи вітроколеса при швидкості набігаючого потоку $V_0=10$ м/с та миттєвій коловій швидкості лопаті $\omega R=6$ м/с. При цьому відносна швидкість на поверхні лопаті становить $W=30$ м/с, а кут атаки $\alpha=20^\circ$. Дані умови обтікання лопаті є сприятливими для генерування максимально можливої підйомної сили та тягового зусилля.

Експеримент проводився шляхом переміщення введеного екрану по азимутальному куту відносно колової траєкторії руху лопаті. Крок зміни кута установки екрану 18° .

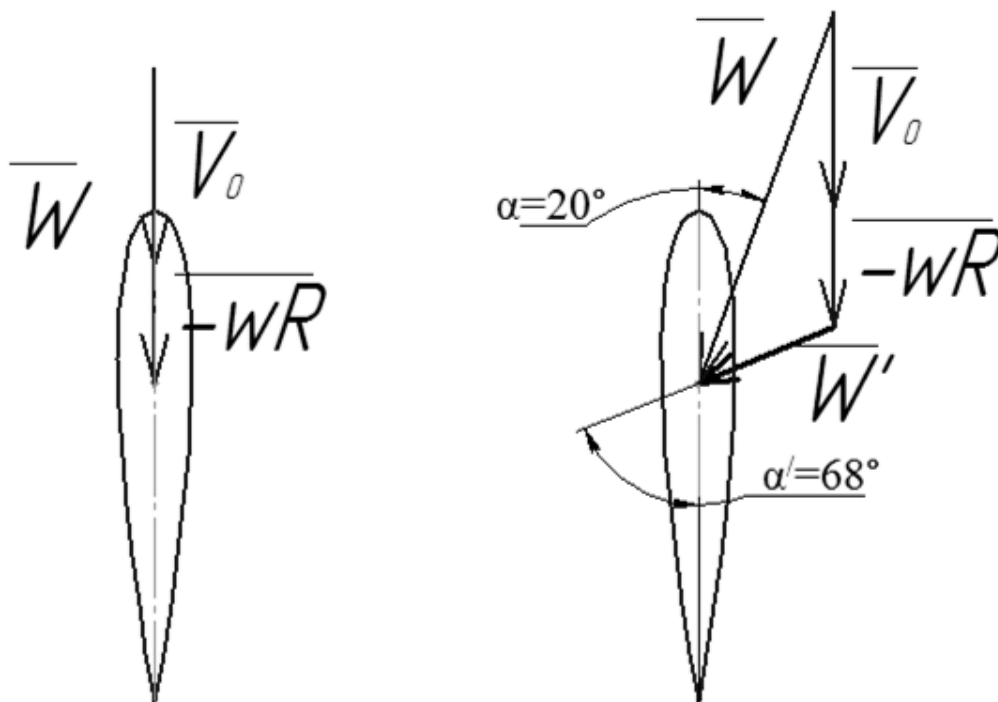


Рисунок 72– Зміщення трикутника швидкостей на лопаті при $\beta=0$ шляхом введення допоміжного вектору швидкості $\overline{W'}$

Для кожного кута визначалася генерована вітроколесом потужність. Оскільки експериментальне дослідження проводимо не для однієї точки, а для сектору азимутальних кутів 180° , то встановлюємо екран під кутом 20° .

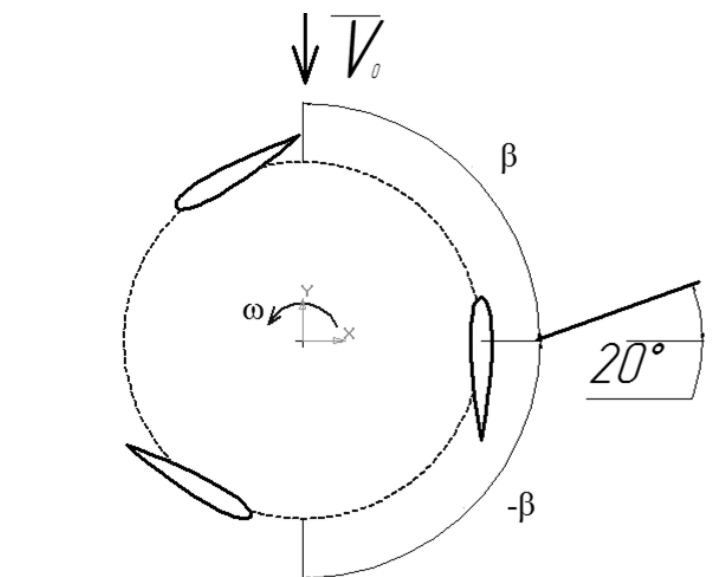


Рисунок 73 – Схема установки плоского экрана довжиною 120 мм під кутом 20°

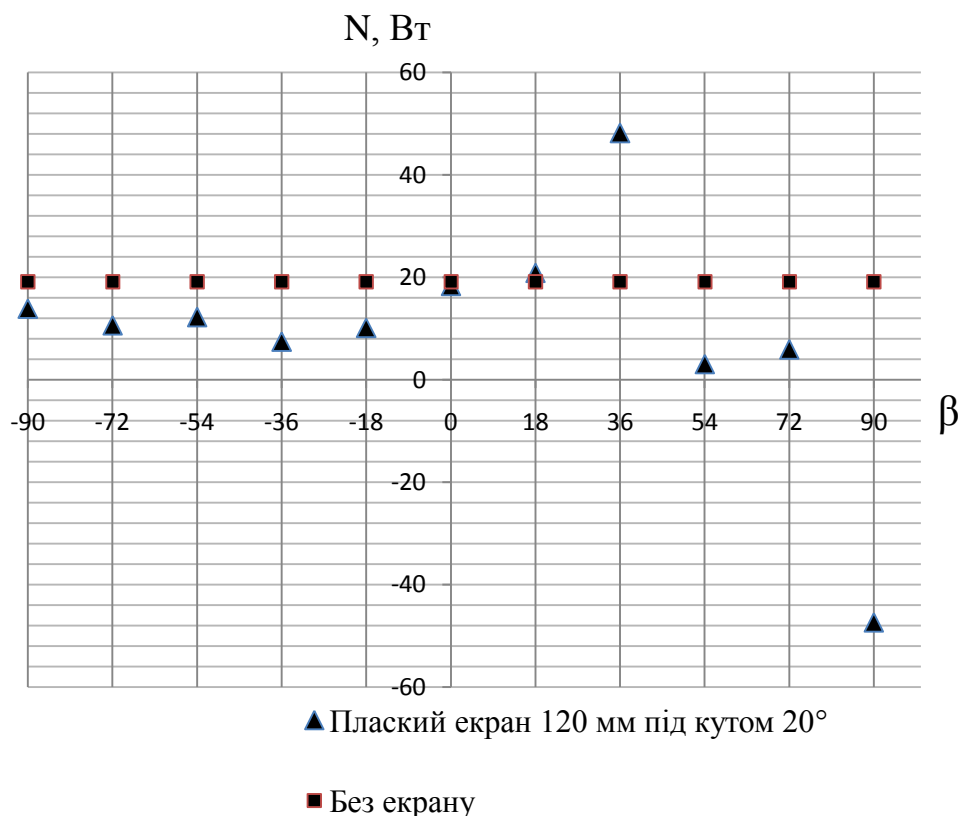


Рисунок 74 – Потужність вітроколеса з пласким екраном довжиною 120 мм під кутом 20°

Аналізуючи рисунок 74, можна зробити висновок, що наявність екрана в зоні роботи вітроколеса впливає на його енергетичні показники. В секторі азимутального кута $\beta=0\dots36^\circ$ спостерігається приріст генерованої потужності. Максимального значення він досягає на куті $\beta=36^\circ$. Виразимо приріст виробленої потужності вітроколесом через коефіцієнт K_N :

$$K_N = \frac{N_E}{N}, \quad (4.1)$$

де N – початкова потужність вітроколеса без екрану;

N_E – потужність вітроколеса з введенням екрану.

Для даного випадку максимальне значення коефіцієнту приросту потужності на азимутальному куті $\beta=36^\circ$:

$$K_{N \max} = \frac{48,18}{19,1} = 2,52. \quad (4.2)$$

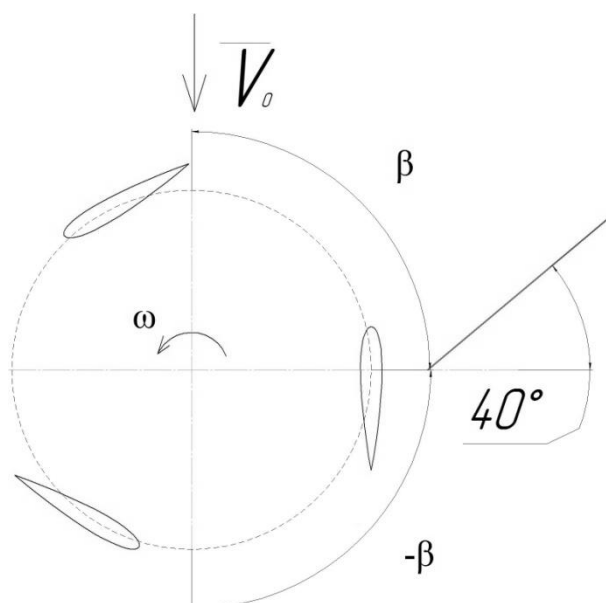


Рисунок 75 - Схема установки плоского экрана довжиною 120 мм під кутом 40°

Для перевірки правильності визначення допоміжного кута атаки та додаткового переконання в працездатності гіпотези про зміщення вектору відносної швидкості шляхом введення допоміжного вектору швидкості проведемо експериментальне дослідження впливу на енергетичні показники вітроколеса екрану довжиною 120 мм, встановленого під кутом 40° .

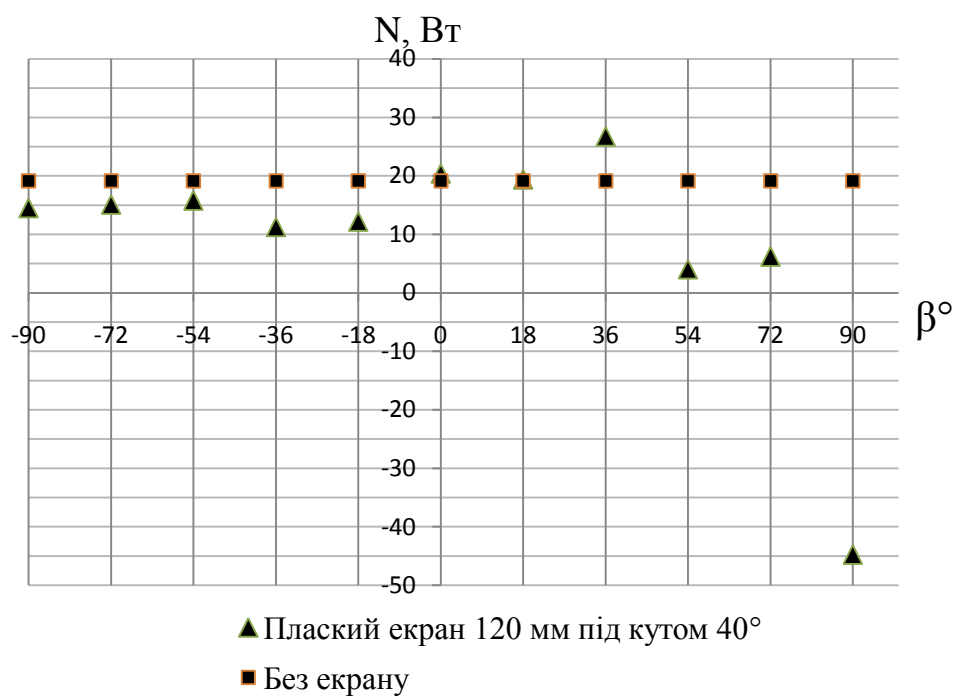


Рисунок 76 – Потужність вітроколеса з пласким екраном довжиною 120 мм під кутом 40° .

Для даного випадку спостерігаємо приріст потужності в зоні азимутального кута $\beta=0\dots36^\circ$. Максимальне значення коефіцієнту приросту потужності отримуємо при $\beta=36^\circ$:

$$K_{N \max} = \frac{26,75}{19,1} = 1,4. \quad (4.3)$$

Зменшення приросту потужності свідчить про те, що установка екрану під кутом 40° зміщує вектор відносної швидкості в напрямку зменшення кута атаки α . Це призводить до зменшення підйомної сили та тягового зусилля.

Для розглянутих випадків характерним є різка зміна генерованої потужності вітроколесом. Для компенсації цього ефекту розглянемо вплив на енергетичні показники ортогональної вітрової турбіни радіусного екрану встановленого під кутом 20° . Радіус екрану відповідає зовнішньому радіусу вітроколеса. Для досліджуваного випадку $R=200$ мм.

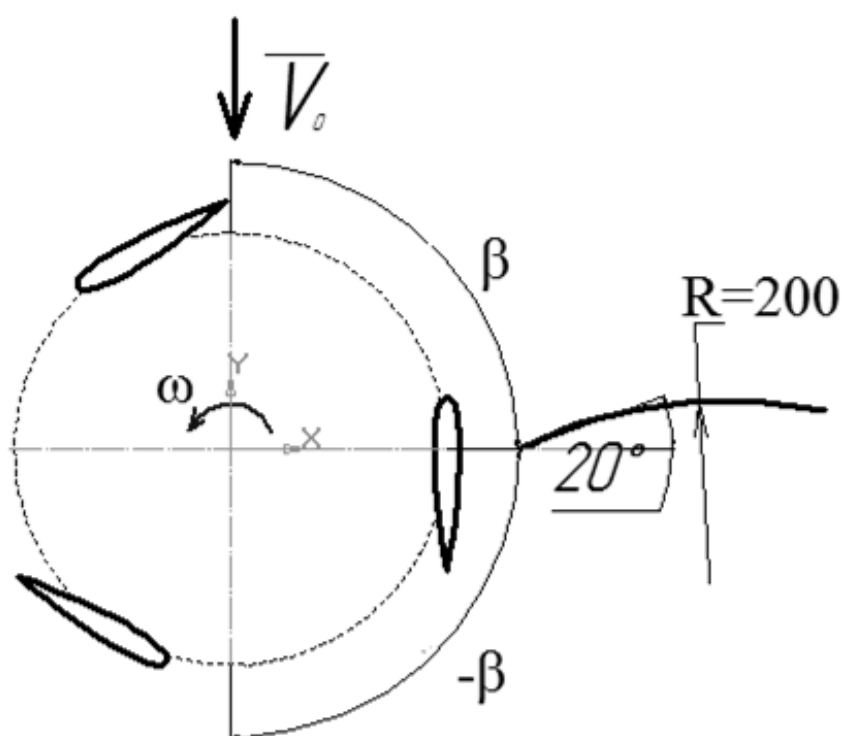


Рисунок 77 - Схема установки радіусного екрана довжиною 170 мм під кутом 20° .

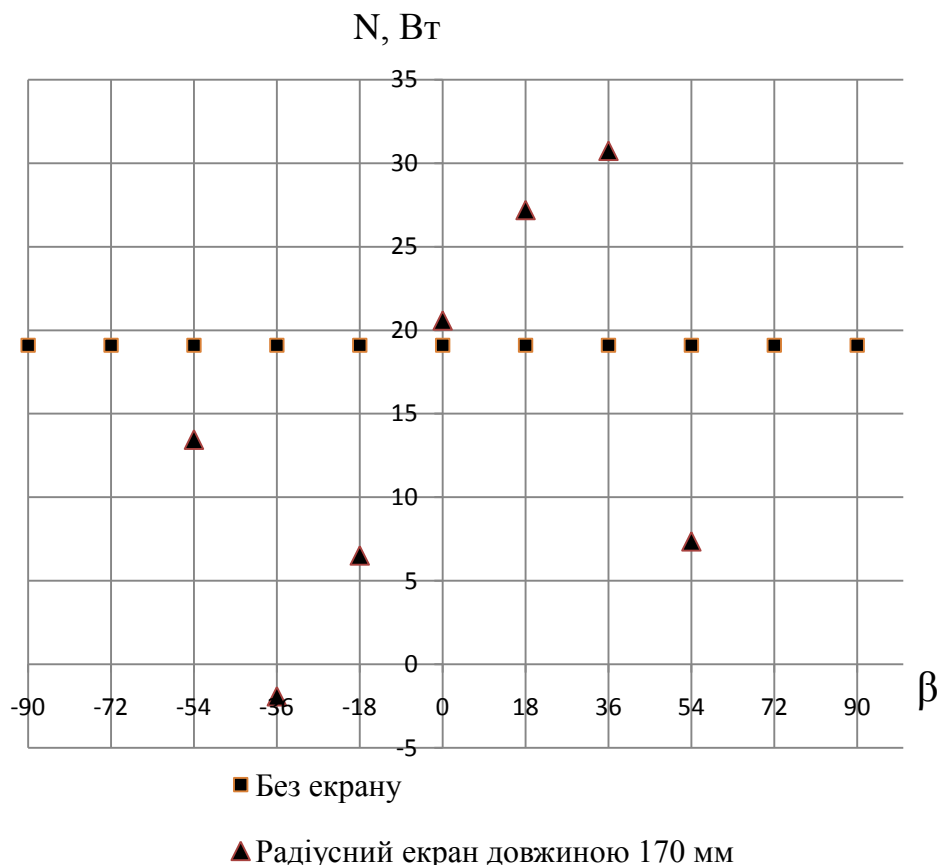


Рисунок 78 – Потужність вітроколеса з радіусним екраном довжиною 170 мм під кутом 20°

З рисунку 78 чітко видно, що на ділянці колової траєкторії $\beta=0\dots36^\circ$ відбувається плавний приріст потужності вітроколеса. Але величина коефіцієнту приросту потужності має менше значення, ніж для плоского екрану під кутом 20° .

$$K_{N \max} = \frac{30,75}{19,1} = 1,61. \quad (4.4)$$

Варто зазначити, що для всіх вище розглянутих конструктивних схем характерним є те, що максимальний приріст потужності отримуємо не при розрахунковому значенні азимутального кута положення екрану. Це можна пояснити тим, що в щілині між екраном та лопаттю відбувається здув допоміжного вектору швидкості набігаючим потоком повітря. Тому на поверхні лопаті, замість

розрахункового отримуємо менше значення кута атаки швидкості \bar{W} . Що призводить до зміщення вектору відносної швидкості \bar{W} в бік менших кутів атаки α .

На більшості траєкторії руху екран негативно впливає на енергетичні показники вітроколеса, що пояснюється затіненням ним зон продукування максимального тягового зусилля на лопатях.

Експериментальним шляхом визначаємо залежність коефіцієнту використання енергії вітру від швидкохідності для вітроколеса з гнучкою лопаттю симетричного профілю НАСА 0015 з пласким екраном довжиною 120 мм, встановлений під кутом 20° . Отримуємо характеристики при трьох азимутальних кутах установки екрану: $\beta=0^\circ$, $\beta=18^\circ$, $\beta=36^\circ$. Саме при цих кутах спостерігається максимальний приріст потужності вітроколеса.

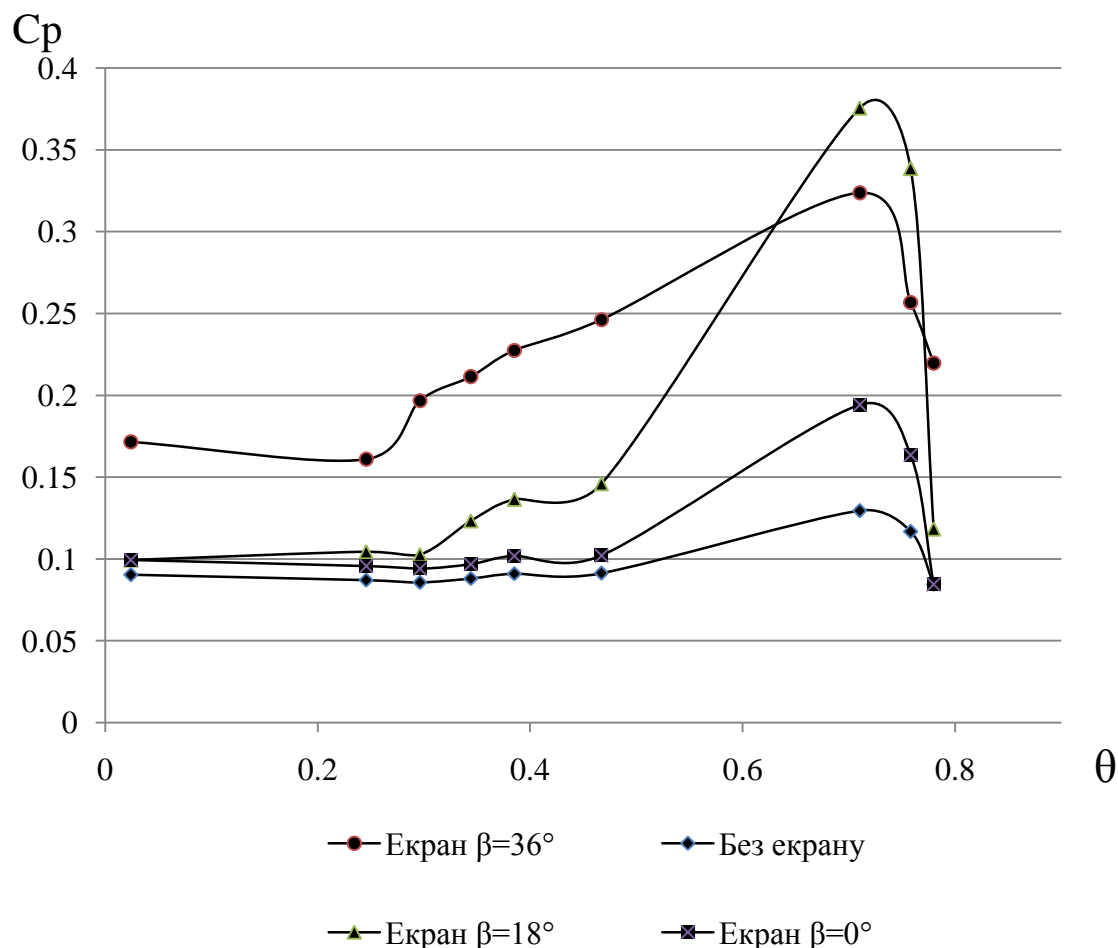


Рисунок 79 – Характеристика $C_p=f(\theta)$ для ортогонального вітроколеса з пласким екраном довжиною 120 мм встановленого під кутом 20° при різних азимутальних кутах β .

4.4 Висновки

Опираючись на експериментально отримані дані, можна зробити висновок, що розроблені аналітичним шляхом методи покращення аеродинамічних характеристик ортогональних вітроколів були повністю перевірені на натурних випробуваннях.

Використання гнучких лопатей симетричного профілю дозволяє отримати високі показники початкового крутного моменту на валу вітроколеса. Оптимальні значення отримані для парусної лопаті з половиною гнучкої поверхні за максимальною товщиною профілю.

Також на практиці показала працездатність гіпотеза про зміщення кута атаки лопаті з метою підвищення аеродинамічних показників вітроколеса. Доведено, що при встановленні плоского екрану довжиною 120 мм під кутом 20° на азимутальному куті 36° генерована потужність вітроколеса зростає у 2,52 рази.

Для гнучкої лопаті симетричного профілю НАСА 0015 з половиною гнучкої частини за максимальною товщиною отримані характеристики $C_p=f(\theta)$ з введенням в робочу зону вітроколеса плоского екрану довжиною 120 мм, встановленого під кутом 20° . Отримано характеристики для кутів положення екрану відносно потоку повітря $\beta=0^\circ$, $\beta=18^\circ$, $\beta=36^\circ$. Аналізуючи які можна зробити висновок, що максимального коефіцієнту використання енергії вітру $C_{pmax}=38$ вдалося досягти при установці екрана на азимутальному куті $\beta=18^\circ$. Але більшого питомого приросту потужності при всьому діапазоні швидкохідностей отримано при положенні екрана на азимутальному куті $\beta=36^\circ$.

5.ВИСНОВКИ

Беручи до уваги проведений літературний огляд, можна зробити висновок., що на сьогоднішній день вертикально-осьові вітроколеса є менш дослідженими в порівнянні з горизонтально-осьовими установками. Теоретично доведено можливість досягнення ефективної роботи даних установок в значних діапазонах швидкостей. Відсутність механізму орієнтації на вітер дозволяє отримувати енергетичні показники на промислових ВЕУ навіть вищі ніж для горизонтально-осьових вітроколес. Дані ВД доцільно використовувати для вітрових потоків малої потужності при швидкостях вітру 3-5 м/с.

З проведеного огляду робіт, спрямованих на покращення сапозапуску вертикально-осьових вітроколес можна зробити висновок, що для вітроустановок малих та середніх розмірів питання самозапуску становить більш складну задачу , ніж для вітроустановок великих розмірів розрахованих для високих потужностей. Покращення самозапуску можливе при підвищенні числа Рейнольдса шляхом збільшення відносної товщини профілю лопаті. Даний метод має один негативний наслідок – збільшення товщини лопаті призведе до зниження швидкохідності вітроколеса.

Найширшого розповсюдження набув метод встановлення допоміжного стартеру на валу вітроколеса. В основному в якості пускового механізму використовують ротор Савоніуса. Його виконують приблизно в межах 10% від розмірів основного вітроколеса. Недоліком даної компоновки є зниження ефективності роботи комбінованої вітроустановки при виході на розрахункові режими роботи, за рахунок створення стартером додаткового аеродинамічного опору на більших колових швидкостях.

Зацікавленість у питанні покращення самозапуску викликає використання гнучких лопатей. Дані робочі органи мають можливість автоматичного підстроювання геометрії профілю лопаті під режими роботи вітроколеса. Така функція лопатей дозволяє ліквідувати «мертву зону» в енергетичній характеристиці ортогональної вітротурбіни та отримувати високі показники

ефективності роботи при розрахункових режимах.

Виходячи з вище сказаного, можна зробити висновок, що дослідження впливу гнучких лопатей на аеродинамічні характеристики ортогональних вітродвигунів типу Н-Дар'є потребує детальнішого вивчення.

У дисертаційній роботі представлені результати моделювання робочого процесу ортогональних вітродвигунів для низькопотенційних вітрових потоків:

1. Розроблено новий тип гнучких профільованих лопатей парусного типу. Їх використання в якості робочих органів ортогональних вітродвигунів дозволяє на стартових режимах роботи збільшити величину крутного моменту, що приводить до покращення процесу самозапуску та ліквідації «мертвої зони» вітроколеса. При досягненні вітроколесом середніх значень швидкохідності лопаті продукують підйомну силу, за рахунок чого досягаються високі показники ефективності роботи турбіни.

2. Для підвищення потужності без зміни геометричних показників вітроколеса вперше розроблено гіпотезу про зміну вектору відносної швидкості. Теоретично її використання дозволяє в кожній точці колової траєкторії руху лопаті отримати максимально можливе значення тягового зусилля. Це призводить до зменшення пульсацій аеродинамічних сил та стабільної роботи вітрової турбіни на нерозрахункових режимах в умовах вітрових потоків малої потужності.

3. Вперше розроблено двострумінну імпульсну математичну модель ортогонального вітродвигуна для визначення кінематичних характеристик потоку повітря, які сприяють підвищенню потужності вітроколеса. Розраховано аналітичні залежності для визначення впливу на ефективність роботи ортогональної вітрової турбіни додаткового вектору швидкості \vec{W}' , що призведе до зміщення трикутників швидкостей в бік збільшення тягової сили на поверхні лопаті.

4. Розроблено рекомендації щодо чисельного моделювання обтікання профільованої лопаті потоком повітря в ANSYS CFX з використанням SST-моделі турбулентності. На основі тестової задачі, обтікання сфери, визначено вхідні показники розрахункової області що впливають на достовірність вихідних даних. З порівняльного аналізу характеристик отриманих чисельним моделюванням з

експериментальними даними можна зробити висновок, що можливе прогнозування аеродинамічних характеристик профільованих лопатей з похибкою 7-10% від реальних значень.

5. Для фізичного моделювання робочого процесу ортогонального вітродвигуна розроблено експериментальний стенд – аеродинамічну трубу відкритого типу з закритою робочою частиною. Визначено, що використання гнучких лопатей симетричного профілю дозволяє отримати високі показники початкового крутного моменту на валу вітроколеса $C_m = 0,47$ при низьких швидкостях $\theta < 0,5$. При подальшому розгоні вітроколеса значення коефіцієнту крутного моменту спадає до величин для жорсткої симетричної лопаті $C_m = 0,1$.

6. Експериментальним шляхом встановлено, що введення допоміжного вектора швидкості шляхом встановлення екрана на дузі колової траєкторії в межах нульового азимутального кута $\beta=0$ приведе до підвищення потужності вітроколеса. Доведено, що плоский екран довжиною 120 мм, нахилений під кутом 20° на азимутальному куті 36° , підвищує генеровану потужність вітроколеса у 2,5 рази.

7. Результати наукового дослідження впроваджено в навчальному процесі Сумського державного університету при проведенні викладачами курсів «Гідродинамічні машини та передачі», «Теорія турбомашин», «Альтернативна енергетика» та «Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії». На основі отриманих даних ведуться роботи по розробці та виготовленню експериментальних промислових зразків вітрових турбін ортогонального типу для використання їх в лініях резервного електричного живлення на підприємствах ТОВ «Турбомаш» (м.Суми), ТОВ «Боско» (м.Суми), ТОВ «Сп «Профіпласт»» (м.Суми).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Word energy outlook 2014 / International energy agency – London 2014. – P.711.
2. Нойбергер Н. Состояние и перспективы развития ветроэнергетики / Н. Нойбергер, О. Нолле, Г.Г. Пивняк // Национальный горный университет – 2011. – С.362-364.
3. Archer Evaluation of global wind power./ Archer, Cristina L. and Zacobson, Mark Z.// Journal of Geophysical Research D12110. - Stanford, CA :, 2005 - Vol. 110.
4. Peter ZHANG “Small Wind World Report Summary 2012” / Peter ZHANG – Germany ©WWEA 2012-20p.
5. Gijs A.M. The Lanchester-Betz-Joukowsky Limit. / Gijs A.M. - The Netherlands : John Wiley & Sons, Ltd :2007. – 75p.
6. Горелов Д.Н. Перспективы развития ветроэнергетических установок с ортогональным ротором / Горелов Д.Н., Кривошипкин В.П. // Теплофизика и аэромеханика. - 2008. - Т. 15. № 1. - С. 163-167.
7. Липовий В.М. Розробка експериментального стенду для визначення аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів / В.М.Липовий// Ж. Проблеми машиностроення – 2012. - № 3-4. – С49-52 .
8. Lipoviy V. Research workflow of vertical axis wind turbines by numerical experimentation / V.Lipoviy, A. Papchenko // Східно-Європейський журнал передових технологій – 2013. - №3/8(63).- С.10-15.
9. Липовий В.М. Аналіз обтікання кулі потоком повітря, як перше наближення для визначення аеродинамічних характеристик криловидних профілів ортогональних вітродвигунів / В.М. Липовий, А.А. Папченко, О.О.Барікин //Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки, - 2013. - № 1 .
10. Липовий В.М. Розробка багатофункціонального агрегату з приводом від ортогонального вітродвигуна/Липовий В.М., Папченко А.А. // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки - 2013. – № 4 . – С.90–93.
11. Lipoviy V. Methods development for determining the aerodynamic characteristics of vertical axis wind turbine / V. Lipoviy, A. Papchenko // Applied Mechanics and Materials. Vol. 630 in 2014. – pp. 74-80.

12. Шефтер Я.И. Изобретателю о ветродвигателях и ветроустановках / Я.И. Шефтер, И.В. Рождественский. - М.: Министерство сельского хозяйства СССР: 1957. – 147 с.
13. Паспорт Чашечный анемометр МС-13.
14. Бетц А. Ветряные двигатели в свете современных исследований / А. Бетц // Успехи физических наук. – 1930. - №2. – 190с.
15. Karl H. The Lanchester-Betz Limit. / Karl H. - Norman : American Institute of Aeronautics and Astronautics: 1980. - Vol. 3. - pp. 382-384.
16. Фатеев Е.М. Ветродвигатели и ветроустановки/ Е.М Фатеев. – М.:ОГИЗ-СЕЛЬХОЗГИЗ, 1948. – 539 с.
17. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн 2. Ветроэлектрогенераторы/В.С.Кривцов, А.М.Олейников, А.И.Яковлев. – Учебник. – Харьков:Нац. аэрокос.ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст.нац.техн.ун-т, 2003. – 519с.
18. Янсон Р.А. Ветроустановки / Янсон Р.А. – М.:Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2007. – 36с.
19. Ветроэнергетические станции / В.Н. Андрианов, Д.Н. Быстрицкий, К.П. Вашкевич и др. М.: Госэнергоиздат, 1960. 294 с.
20. Горелов Д.Н. Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения. / Горелов Д.Н. – Омск: 2012. – 64с.
21. Жуковский Н.Е. Аэродинамический расчет медленно движущихся ветряных мельниц // Собр. соч.: В 7 т. М.; Л.: Гостехиздат, 1950. Т.7. С. 333" 339.
22. Deglaire P. Analytical aerodynamic simulation tools for vertical axis wind turbine/ Deglaire P. Doctor of Philosophy Thesis. - Uppsala university. – 2010. – 100p.
23. Рожкова Л.Г. Прогнозируемые эксплуатационные характеристики ротора вертикально-осевой ветроэнергетической установки с лопастями, снабженными предкрылками. // Вестник НТУУ «КПИ», Машиностроение, вып. 35. -1999.-С. 164 - 168.

24. Горелов Д.Н. Экспериментальная оценка предельной мощности ветроколеса с вертикальной осью вращения / Д.Н. Горелов, Ю.Н. Кузьменко // Теплофизика и аэромеханика – 2001. – №2 – С.329-334.
25. Коваленко В.М., Рожкова Л.Г. Вертикально-осевые ветроустановки средней быстроходности. // Сб. праць II Української науково-технічної конф. „Гідромеханіка в інженерній практиці”. -Київ-Черкаси, 1997.-С. 202 - 204.
26. Сабинин Г.Х. Теория и аэродинамический расчет ветряных двигателей. М.: ЦАГИ, 1931. 71 с.
27. Savonius S. The wing rotor in theory and practice. / Savonius S. – Finland: Helsingfors. – 1930. – 42p.
28. Faust V. Machinae novae. / Faust V. – 1615. – 75p.
29. <http://www.flettner.co.uk/history/>
30. US Patent US000001820529A, 25. August 1931.
31. Belgisches Patent BE000000336740A, 30. Oktober 1926
32. Curtis M. Solidity, Blade Number, and Pitch Angle Effects on a One Kilowatt HAWT. / Curtis M. Visser, Kenneth D. - s.n.:2006. – 105p.
33. Сивади А., Сильде О. Вопросы теории быстроходного ветродвигателя с вертикальной осью и обтекаемыми лопастями. Таллин: Эстгосиздат, 1953. С. 19.
34. Kirke B. Evaluation of Self-Starting Vertical Axis Wind Turbines for Stand-Alone Applications. Doctor of Philosophy Thesis. s.l.: School of Engineering Griffith University, 1998.
35. Коваленко В.М., Рожкова Л.Г. Новая форма лопасти для ротора вертикально-осевой ветроустановки. // «Энергетика и электрификация». -. №5 -1997 -С.43 - 46
36. Коваленко В.М., Рожкова Л.Г. Вертикально-осевые ветроустановки средней быстроходности. // Сб. праць II Української науково-технічної конф. „Гідромеханіка в інженерній практиці”. -Київ-Черкаси, 1997.-С. 202 - 204.
37. Волков М.І. Аеродинаміка ортогональних вітродвигунів. Навчальний посібник. – Суми: ВВП «Мрія-1» ЛТД, 1996. – 120с.
38. Ветроэнергетический агрегат Болотова (RU 2352809).

39. Ветроэнергетический агрегат 2007111535/06, 29.03.2007.
40. Грахов Ю.В. Инженерный метод и математическое моделирование в проектировании ветроэнергетических установок / Ю.В. Грахов, О.В. Матвиенко, Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика.Механика.Физика.» – 2010. - №9. – С.45-52.
41. Горелов Д.Н. Перспективы развития ветроэнергетических установок с ортогональным ротором / Д.Н. Горелов, В.П. Кривоспицкий // Теплофизика и аэромеханика – 2008. – №1 – С.163-167.
42. Ротор ветряной установки с вертикальной осью вращения варианты RU 2347104
43. Robert J. Low-speed aerodynamic characteristics of a 17-percent-thick airfoil section designed for general aviation applications / J. Robert, McGee // Langley research center Hampton – NASA:1973. – P.69.
44. Лятхер В.М. Оптимизация профиля лопастей ортогональной ветроэнергетической установки / В.М. Лятхер, И.М. Кирпичникова, Е.В. Соломин // Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение – 2013. - №1. – С.112-118.
45. Коваленко В.М., Королев В.И., Рожкова Л.Г., Савченко В.Т. Исследование аэродинамических и мощностных характеристик элементов ортогональной ветроэнергетической установки // Материалы научно-техн. конференции по прикладной гидромеханике Института гидромеханики, Киев. -1992.-С. 36 – 37.
46. Пэнкхёрст Р. Техника эксперимента в аэродинамических трубах./ Пэнкхёрст Р., Холдер Д. - М., 1955 – С. 275.
47. Мартынов А.К. Экспериментальная аэродинамика. / Мартынов А.К. – Государственное издательство оборонной промышленности: 1950. – 476с.
48. Дозвуковая аэродинамическая труба Т-5. Экспериментальная база. Центральный аэро-гидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского.
49. Strickland J.H. A vortex model of the Darrieus turbine: an analytical and experimental study // Sandia laboratories report SAND79-7058. - 1980. - P. 253.
50. Волков Н.И. Разработка автономных эффективных вертикально-осевых ветроэнергетических установок малой мощности. Отчет НИР (промежуточный) – Сумы, 1993. – с.72-74

51. Templin R.J. Aerodynamic performance theory for the NRC vertical-axis wind turbine // National Research Council of Canada. Rep. LTR-160. - 1974. - P. 185.
52. Барлоу Р. Математическая теория надежности// Барлоу Р, Прошан Ф. / Пер. с англ. Под ред. Б.В. Гнеденко. М.: Советское радио, 1969. - 488 с.
53. ANSYS CFX 11.0 SolverTheory. Release 11.0 , 2008. – 261 p. – Режим доступа : <http://www.ansys.com>.
54. Kirke, B.K. Enhancing the Performance of Vertical Axis Wind Turbine Using a Simple Variable Pitch System. / Kirke, B.K., Lazauskas. - Wind Engineering :1991. - Vol. 15 - pp.187-195.
55. Watson, G.R. The Self-starting Capabilities of Low-solidity Fixed Pitch Darrieus Rotors. / Watson, G.R. - Cranfield, UK: BWEA Workshop:1920. - pp.32-39.
56. Ushiyama. I. Optimum Design Configurations and Performance of Savonius Rotors. / Ushiyama. I, Nagai, H. - Wind Engineering:1988. - Vol.12. - pp.59-75.
57. Simhan, K. A review of calculation methods for the determination of performance characteristics of vertical axis wind energy converters with special reference to the influence of solidity on starting characteristics. / Simhan, K. A. // Proc. European Wind Energy Conf. - Hamburg, FRG:1994. - pp.324-331.
58. Baker J.R. Features to aid or enable self-starting of fixed pitch low solidity vertical axis wind turbines. / Baker J.R. // Wind Eng & Indust Aerodynamics. – 1983/ - Vol. 15. - 369-380.
59. Kirke B.K. Enhancing the Performance of a Vertical Axis Wind Turbine Using a Simple Variable Pitch System. / Kirke B.K., Lazauskas, L.// Wind Engineering - 1991. - Vol.15. - pp.187-195.
60. Robert, J. Lift and drag of a sail aerofoil. / Robert, J. ,Newman, B.G. // Wind Engineering. - 1979. - Vol 3. - pp.1-22.
61. Hurley. B. A Novel Vertical Axis Sail Rotor. / Hurley. B. - BWEA Workshop: 1979. - pp.40-44.
62. Batista N.C. Self-start performance evaluation ia Darrieus Type vertical axis wind turbines: methodology and computational tool applied to symmetrical airfoils /

- N.C.Batista, R.Melicio, J.C.O. Matias, J.P.S. Catalao // International journal of research in engineering and technology. – 2010. – V.3/ - P.190-195
63. Unidirectional helical reaction turbine operable under reversible fluid flow for power systems US 5451137 A.
64. Ершина А.К. Основы теории ветротурбины Дарье. / Ершина А.К., Ершин Ш.А., Жалбасбаев У.К. - Алматы: Казгос ПНТИ. - 2001. - С. 37-39.
65. Johnson Wind Energy Systems / Johnson ,Gary L.. // Electronic Edition. - Manhattan, KS : s.n.: 2001. – 53p.
66. Богословский К.Е. Аэродинамические характеристики двух серий профилей с различной относительной толщиной в диапазоне чисел М от 0,75 до 3,0./ Центральный аэро-гидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. - ЦАГИ:1957. – 36с.
67. Лебедь В.И. Возникновение и развитие турбулентности при обтекании сферы. Проблемы и существующие подходы к их решению/В.И. Лебедь, С.Я. Уманский //Химическая физика – 2007. – №1 – С.65-88.
68. Девнин С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций. Справочник. Д.: Судостроение, 1983. 320 с.
69. Ушаков В.М. Анализ обтекания тел с отрывным потоком в системе SolidWorks/FloWorks/В.М. Ушаков //Машиностроение и смежные области. – 2003. – С.2-9.
70. Симаков Н.Н. Расчет обтекания шара в ламинарном и сильно турбулентном потоках//Журнал технической физики – 2013. – №4. – С.16-20.
71. Щербаков М.А. Сравнительный анализ моделей турбулентности с использованием научного кода «Fastest-3d» и коммерческого пакета ANSYS CFX / М.А.Щербаков, А.А. Юн // Вестник Московского авиационного института. – 2009. - №5.т.16. – С.111-122.
72. Коган В.Б. Теоретические основы типовых процессов химической технологии./ В.Б. Коган. – М. – 1977. – 592с.
73. Johnson T.A. Fluid Mech. / Johnson T.A., Patel V.S. // J.– 1999. V. 378. P. 19.

74. Бетяев С.К. Гидродинамические парадоксы/С.К. Бетяев //Квант. — 1998. — № 1. — 85с.
75. Кравец А.С. Характеристики авиационных профилей /А.С. Кравец. — М.:ГосиздОборонпром. — 1939. — 340с.
76. Басов К. А. ANSYS и LMS Virtual Lab. Геометрическое моделирование. / К.А. Басов.— М.: ДМК Пресс, 2006. — 240с.
77. Beri H. Effect of camber airfoil on self starting of vertical axis wind turbine / H. Beri, Yao Y. // Journal of environmental science and technology – 2011. – V.04. – P. 302-312.
78. Дзензерский В.А. Моделирование нестационарных турбулентных течений при обтекании подвижных тел сложной геометрии на основе уравнений Навье-Стокса / В.А. Дзензерский, А.А. Приходько, Д.А. Редчиц, Н.М. Хачапуридзе // Вісник Харківського національного університету. Серія «математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління» - 2009. - №847. – С.150-166.
79. Sethunathan P. Analysis of aerodynamic characteristics of a supercritical airfoil for low speed aircraft / P. Sethunathan, M. Niventhran, V. Siva, R. Sadhan Kumar// International journal of research in engineering and technjlogy – 2014. – V.03 – P.179-183.
80. Баклушин П.Г. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик ортогональных крыльчатых ветроколес. / Баклушин П.Г., Вашкевич К.П., Самсонов В.В. Со. науч. тр. Гидропроекта. - М.: Ветроэнергетический станции:1988. - С. 98-105.
81. Burton, T. Wind Energy Handbook. / Burton, T. - John Wiley & Sons: 2001. – p.150.
82. Яремченко О.В. Испытания насосов. Справочное пособие / Яремченко О.В. – М.: Машиностроение, 1976. – 225 с.
83. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / Спиридонов А.А. – М: Машиностроение, 1981. – 184 с., ил.
84. Рузинов Л.П. Планирование эксперимента в химии и химической

технологии / Рузинов Л.П., Слободчикова Р.И. – М.: Химия, 1980. – (серия «Химическая кибернетика») – 280 с., ил.

85. .Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 398 с.
86. Коваленко В.М., Рожкова Л.Г. Разработка лопастей вертикально-осевых ветроустановок средней быстроходности. / В.М. Коваленко, Л.Г. Рожкова // Вісник СумДУ. - Суми 1998. – №2 (10), - С.35-43.
87. Paraschivoiu К. Aerodynamic Loads and Performance of the Darrieus Rotor. / Paraschivoiu К.// J. Energy. - Quebec:1981. - Vol. 6. - pp. 406-412.
88. Claessens M.C. The Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines. Master of Science Thesis. - Delft University of Technology: 2006. – p.115.

ДОДАТКИ

Додаток А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Боско»



_____ Хащина П.І.

13 березня 2015р.

АКТ

впровадження матеріалів кандидатської дисертації
наукового співробітника кафедри прикладної гідроаеромеханіки
Сумського державного університету
Липового Віталія Миколайовича

м.Суми

13 березня 2015р.

Даний акт складено про те, що на підприємстві введено в експлуатацію автономну систему освітлення території. В якості джерела енергії використано вертикально-осьовий вітродвигун з покращеними аеродинамічними характеристиками розроблений під вітровий потенціал нашої місцевості.

Використання вітродвигуна дозволяє суттєво знизити матеріальні затрати на забезпечення необхідної освітленості території в темну пору доби, що говорить про економічну доцільність введення даного типу установок в систему електропостачання підприємства.

Начальник виробництва

Ільніцький В.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Турбомаш»


Оліфіренко М. В.

12 січня 2015р.

АКТ

впровадження матеріалів кандидатської дисертації
наукового співробітника кафедри прикладної гідроаеромеханіки
Сумського державного університету
Липового Віталія Миколайовича

м.Суми

12 січня 2015р.

Даним актом посвідчується, що на підприємстві ведуться роботи по виготовленню та монтажу вітроелектричної станції вертикально-осьового типу за практичними рекомендаціями отриманими Липовим В.М. при виконанні кандидатської дисертації. Запуск установки планується на 2016 рік.

Начальник виробництва



М.П. Зінченко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «СП «Профіпласт»

Булига О.Б.

9 лютого 2015р.



АКТ

впровадження матеріалів кандидатської дисертації
наукового співробітника кафедри прикладної гідроаеромеханіки
Сумського державного університету
Липового Віталія Миколайовича

м.Суми

9 лютого 2015р.

Даний акт складено про те, що підприємство проводить підготовку технічної документації для створення системи освітлення виробничої частини будівлі від електричної мережі ортогональної вітрової турбіни. Потужність установки 5 кВт, що дозволяє стабільно підтримувати освітлення на 350 м.кв. промислової площі.

Головний інженер

О.А. Коломієць

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Перший проректор,
проректор з навчальної роботи
доц. В.Д. Карпуша

« _____ » _____ 2015 р.

АКТ

02 березня 2015 р.

м. Суми

Про впровадження
результатів дисертаційної роботи
Липового В.М. у навчальний процес.

Складений комісією у складі:

- Голова комісії – декан факультету ТЕСЕТ, доцент кафедри прикладної
гідроаеромеханіки, канд. техн. наук О.Г.Гусак:
– завідувач кафедри прикладної гідроаеромеханіки, професор, к.т.н
Ковальов І.О.;

– доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки, к.т.н. О.І. Котенко.

Встановлено, що в процесі підготовки дисертаційної роботи здобувачем
кафедри прикладної гідроаеромеханіки Липовий В.М. на тему «Вдосконалення
аеродинамічних характеристик ортогональних вітроподвигунів для вітрових
потоків малої потужності» (науковий керівник – к.т.н., доц. Папченко А.А.) у
навчальний процес впроваджено наступне:

- результати досліджень використовуються викладачами кафедри при
викладанні для студентів спеціальності «Гідравлічні машини,
гідроприводи та гідропневмоавтоматика» курсів «Гідродинамічні
машини та передачі», «Теорія турбомашин», «Альтернативна
енергетика» та «Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії».

Голова комісії

Члени комісії:

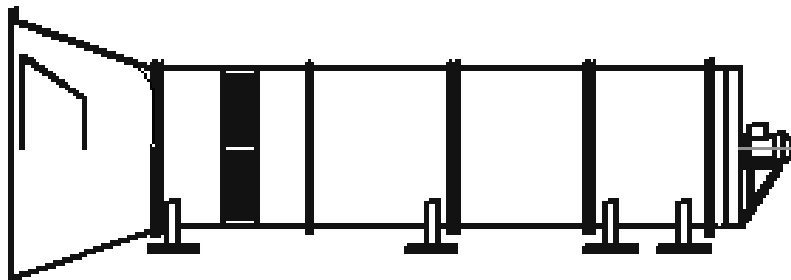
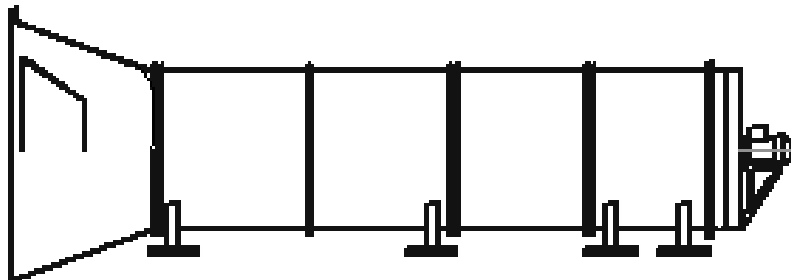
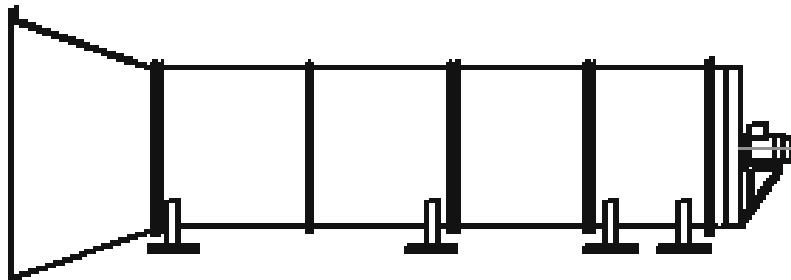
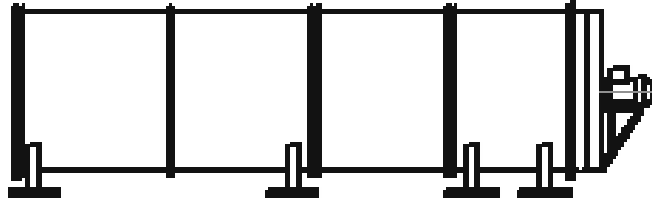
О.Г. Гусак

І.О. Ковальов

О.І. Котенко

Додаток Б

Конструктивні схеми аеродинамічних труб в яких проводилося зондування потоку.



Додаток В

Характеристика потоку повітря в аеродинамічній трубці з внутрішніми конфузорами з різними коефіцієнтами притиснення n .

