Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

Липовий Віталій Миколайович

УДК 62-854

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ОРТОГОНАЛЬНИХ ВІТРОДВИГУНІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОВИХ ПОТОКІВ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

Спеціальність 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Суми – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: - кандидат технічних наук, доцент
Папченко Андрій Анатолійович,
Сумський державний університет,
докторант кафедри прикладної гідроаеромеханіки.

Офіційні опоненти: - доктор технічних наук, професор
Яхно Олег Михайлович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
професор кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки;

- кандидат технічних наук, доцент
Миронов Костянтин Анатолійович
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
доцент кафедри гідравлічних машин.

Захист відбудеться “ 30 ” червня 2015 р. о 13.00 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розісланий: «__» _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Є. М. Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

За даними світового енергетичного агентства, упродовж наступних десятиліть очікується значне збільшення енергоспоживання, пов'язане з розвитком економіки і приростом населення. Це призведе до зростання навантаження на систему енергопостачання та потребуватиме підвищеної уваги до ефективного використання енергії. Виходячи з цього, доцільним є зміщення тенденцій світової енергетики в бік альтернативних джерел енергії та збільшення їх питомої ваги на ринку енергоносіїв.

Вітроенергетика як найбільш розвинений сектор відновлюваних джерел енергії є основою енергетичних систем у багатьох країнах світу, визнана надійним та доступним джерелом екологічно чистої енергії.

Найбільшого поширення у світі набули горизонтально-осьові вітроустановки, що характеризуються високими енергетичними показниками, простотою робочого процесу та конструктивними особливостями, які дозволяють використовувати їх на вітроелектричних станціях великої потужності. Ці установки стабільно працюють при високих значеннях швидкості вітру та за умови якосної 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. Ефективність їх роботи не залежить від орієнтації вітроколеса відносно потоку повітря, а енергетичні показники наближаються до значень горизонтально-осьових вітроколіс. Тому для вирішення енергетичного питання України існує потреба в більш детальному дослідженні робочого процесу ортогональних вітродвигунів із метою виявлення недоліків та розроблення методів їх подолання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконувалася згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету відповідно до науково-технічної програми Міністерства освіти і науки України та реалізована при виконанні держбюджетної науково-дослідної роботи № 0111U002153 «Створення ефективних енергозберігаючих систем опалення та гарячого водопостачання на базі багатофункціональних теплогенеруючих агрегатів» та № 0109U001381 «Дослідження робочих процесів теплогенеруючих агрегатів багатофункціонального призначення та розробка на їх основі енерго- та ресурсозберігаючого обладнання».

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 вітроколіс 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 та енергетичні характеристики вітроколеса.

Методи дослідження. Під час дослідження робочого процесу ортогональних вітродвигунів використовувалися методи математичного моделювання на основі імпульсної концепції взаємодії вітроколеса з потоком повітря. Аеродинамічні характеристики профілів визначалися шляхом розрахункового моделювання в програмному комплексі ANSYS CFX. Адекватність отриманих результатів підтверджувалася шляхом експериментального дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше розроблено двоструминну 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

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автору належать:

[1, 6, 9, 10] – 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;

[2] – з використанням чисельного експерименту розроблено алгоритм визначення енергетичних показників ортогональних вітродвигунів. Приведено порівняльний аналіз інтегральних залежностей отриманих з використанням різних моделей турбулентності;

[3, 7] – визначено геометричні параметри розрахункової області та необхідні показники якості розрахункової сітки для чисельного моделювання обтікання потоком повітря сферичного тіла типу куля;

[5, 8] – викладено опис проведення фізичного експерименту для визначення енергетичних показників ортогональних вітродвигунів. Проведено порівняльний аналіз чисельних характеристик із експериментальними;

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

Основні положення і результати дисертації доповідалися й обговорювалися на:

Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 2012,2014рр.); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Промислова гідравліка та пневматика» (м. Чернігів, 2012 р.); XIX Міжнародній науково-технічній конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Кіровоград, 2014 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Герметичність, вібронадійність і екологічна безпека насосного та компресорного обладнання ГЕРВІКОН + НАСОСИ – 2014» (м. Суми, 2014р.).

Публікації. За матеріалами дисертації здобувачем опубліковано 10 наукових праць, з яких 4 у виданнях, що входять до переліку, затвердженого МОН України (в тому числі 1 особиста публікація) та 1 публікація у закордонному 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 130 сторінок, у тому числі 79 рисунки, 1 таблиця, бібліографія з 105 джерел на 10 сторінках, 2 додатки на 5 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі наведено тенденції розвитку вітроенергетичного сектора світового енергетичного комплексу та сформульовано актуальність наукового дослідження робочого процесу ортогональних вітродвигунів для використання їх в умовах вітрових потоків малої потужності.

У першому розділі проаналізовано сучасні умови використання вітроелектричних установок. Проведено порівняльний аналіз різних типів вітроколіс та визначено доцільність експлуатації вертикально-осьових

вітротурбін в умовах низьких середньорічних показників швидкості вітрового потоку.

Для визначення механізму підвищення потужності турбіни при незмінних массогабаритних показниках детально описано робочий процес ортогонального вітроколеса. Вказані причини циклічної зміни тягового зусилля на валу вітроколеса. Максимальна тягова сила на коловій траєкторії руху виникає в зонах перпендикулярного перетину лопаттю потоку повітря. В цих точках величина та кут атаки вектора відносної швидкості $\bar{W}$ набувають свого оптимуму, і, як наслідок, генеруються більші тягові зусилля. За рахунок втрати частини напору в об'ємі вітроколеса на підвітряному боці ротора тягова сила має менші значення ніж на навітряному. На дузі траєкторії руху лопаті «на потік» виникає зона з від'ємними значеннями крутного моменту. Вектор відносної швидкості в ній максимальний. Потік взаємодіє з лопаттю при нульових кутах атаки, що приводить до збільшення лобового опору та відсутності підйомної сили.

Існує ряд розробок, спрямованих на орієнтування профільованої лопаті на потік для збільшення питомої величини крутного моменту. Це призводить до значного ускладнення конструкції вітроколеса та істотно підвищує собівартість установки.

Тому для покращення енергетичних характеристик вітроколеса запропоновано визначити кінематичні характеристики потоку перед лопаттю, завдяки яким виникне можливість створення по всій коловій траєкторії руху максимально можливого тягового зусилля. На основі цього сформульовані мета та задачі наукового дослідження.

У другому розділі зроблено акцент на те, що ортогональні вітродвигуни, як правило, зазвичай генерують дуже малий пусковий момент і що навіть тоді, коли вони починають рухатися, можуть не прискоритися за межі «мертвої зони» в діапазоні $0{,}7 < \theta < 2{,}7$ (рис. 1), де коефіцієнт використання енергії вітру вітроколеса має від'ємні значення.

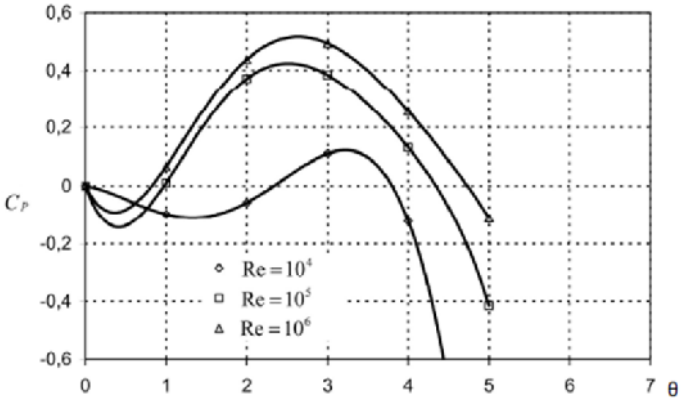


Рисунок 1 – Типові залежності $C_p = f(\theta)$ для ортогональних вітроколіс

Наведено опис раніше проведених робіт по покращенню процесу самозапуску методом підвищення числа Рейнольдса, з використанням профільованих лопатей більшої відносної товщини; методом використання генератора в режимі двигуна для попереднього розгону вітроколеса та виходу в розрахункові режими роботи; використанням ротора Савоніуса для підвищення пускових крутних моментів та використанням гнучких лопатей.

Беручи до уваги аналіз попередніх робіт, зроблено висновок, що найбільший науковий інтерес для зменшення або повної ліквідації зони від’ємних тягових зусиль становить використання гнучких лопатей. Тому запропоновано дослідити вплив на робочий процес вертикально-осьової вітротурбіни трьох конструкцій симетричних гнучких лопатей парусного типу (рис. 2).

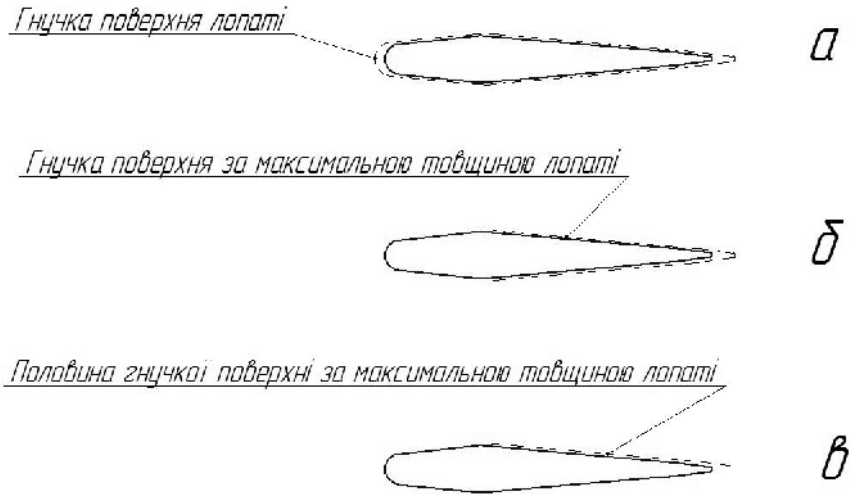
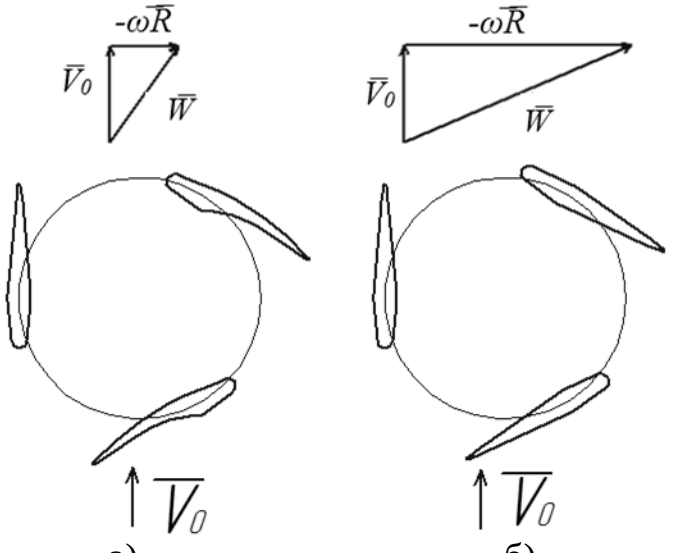


Рисунок 2 – Запропоновані конструкції парусних лопатей

Прогнозується, що при низьких швидкохідностях на гнучкій поверхні лопаті буде формуватися карман, що дозволить збільшити силу лобового опору під час руху лопаті «від вітру». Цей 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 й повністю ліквідувати «мертву зону» в енергетичній характеристиці турбіни.

При досягненні лопаттю середніх значень колової швидкості в межах $\theta = 0{,}5\ldots1$ гнучка частина випрямляється і починає працювати як звичайний симетричний профіль (рис. 3).



а) б)

Рисунок 3 – Прогнозована поведінка гнучкого симетричного профілю при різних швидкохідностях θ: а) θ = 0,4; б) θ = 2

У третьому розділі викладено гіпотезу зміни кінематичних характеристик потоку перед вітроколесом, яка базується на тому, що кути атаки α відносної швидкості $\bar{W}$ на коловій траєкторії є незмінними величинами. Із цієї умови випливає, що в кожній точці колової траєкторії величина тягового зусилля однакова (рис. 4).

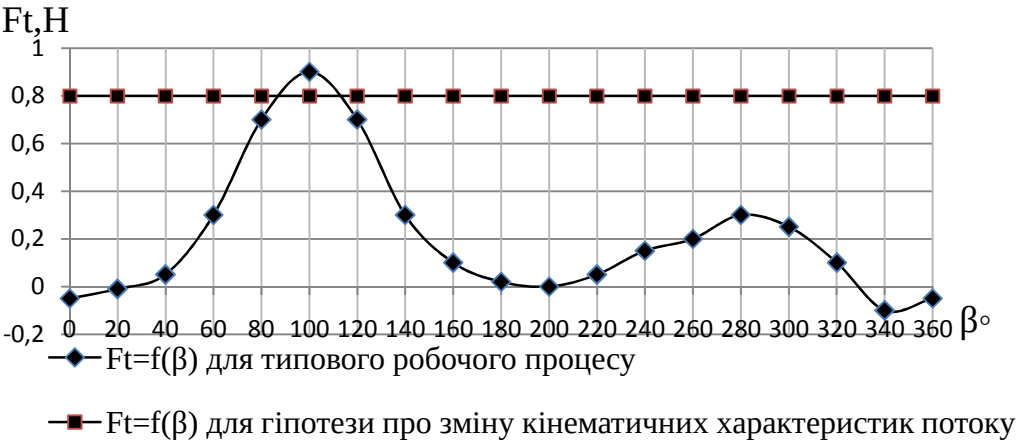


Рисунок 4 – Порівняння залежності $F_t = f(\beta)$для стандартного робочого процесу ОВД та робочого процесу, що базується на гіпотезі про зміну кінематичних характеристик потоку перед вітроколесом

Для реалізації сталого кута атаки необхідно змістити трикутник швидкостей шляхом уведення допоміжного вектора швидкості $\bar{W}'$.

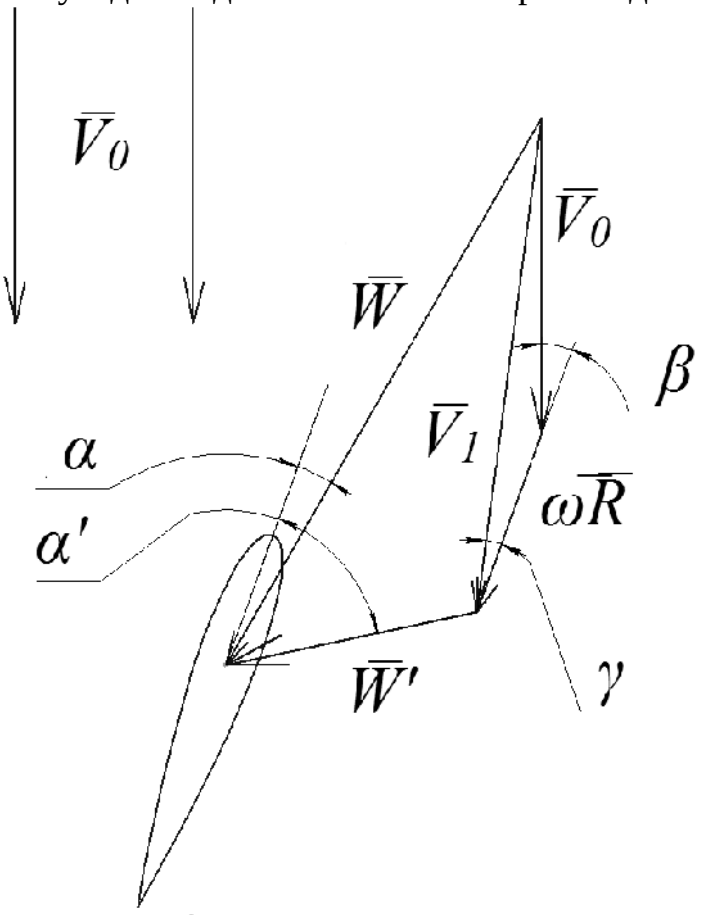


Рисунок 5 – Схема для аналітичного розрахунку

Використання цієї гіпотези на практиці дозволить згладити характеристику пульсуючих аеродинамічних сил на поверхні лопаті та підвищити сумарний крутний момент на валу вітроколеса, що приведе до збільшення генерованої потужності вітровою турбіною. Розрахункова схема для гіпотези про введення допоміжного вектора швидкості приведена на рисунку 5.

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

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

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

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

$$V_1 = \sqrt{(\omega R + V_0 cos\beta)^2 + (V_0 sin\beta)^2}. \quad (3)$$

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

$$\gamma = arctg \frac{V_0 sin\beta}{\omega R + V_0 cos\beta}. \quad (4)$$

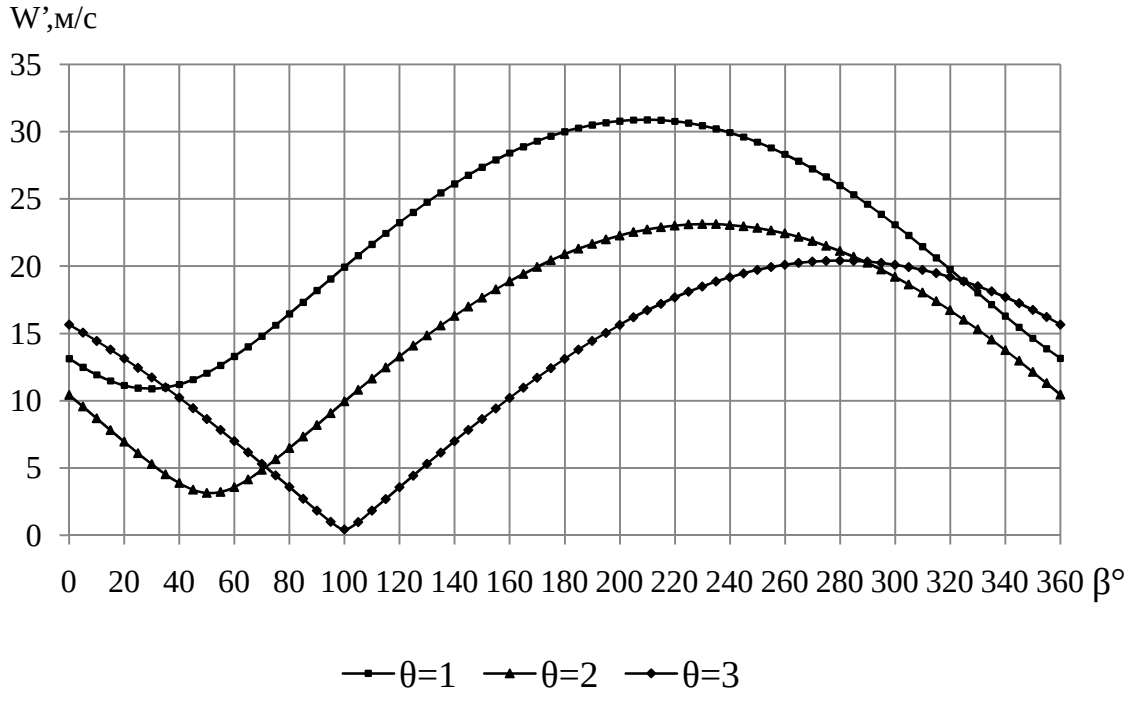


Рисунок 6 – Залежність *W' = f(β)* в залежності від початкової швидкохідності вітроколеса θ за вхідної умові $\bar{W}$ *= 30 м/с,* α *= 20°,* $\bar{V}_0$ *= 10 м/с*

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

$$\varphi = 180° - (\alpha' + \beta). \quad (5)$$

У діапазоні кутів *φ=0°…90°* для виконання вхідних умов показників відносної швидкості $\bar{W}$ на поверхні лопаті необхідно створити зворотні потоки в зоні вітроколеса, що в реальних умовах виконати практично неможливо. Тому активною зоною для введення допоміжного вектора швидкості $\bar{W}'$ є частини

колової траєкторії руху лопаті, що визначаються кутами β, при яких $\varphi > 90°$. На рис. 7 зазначені зони знаходяться вище заштрихованого поля.

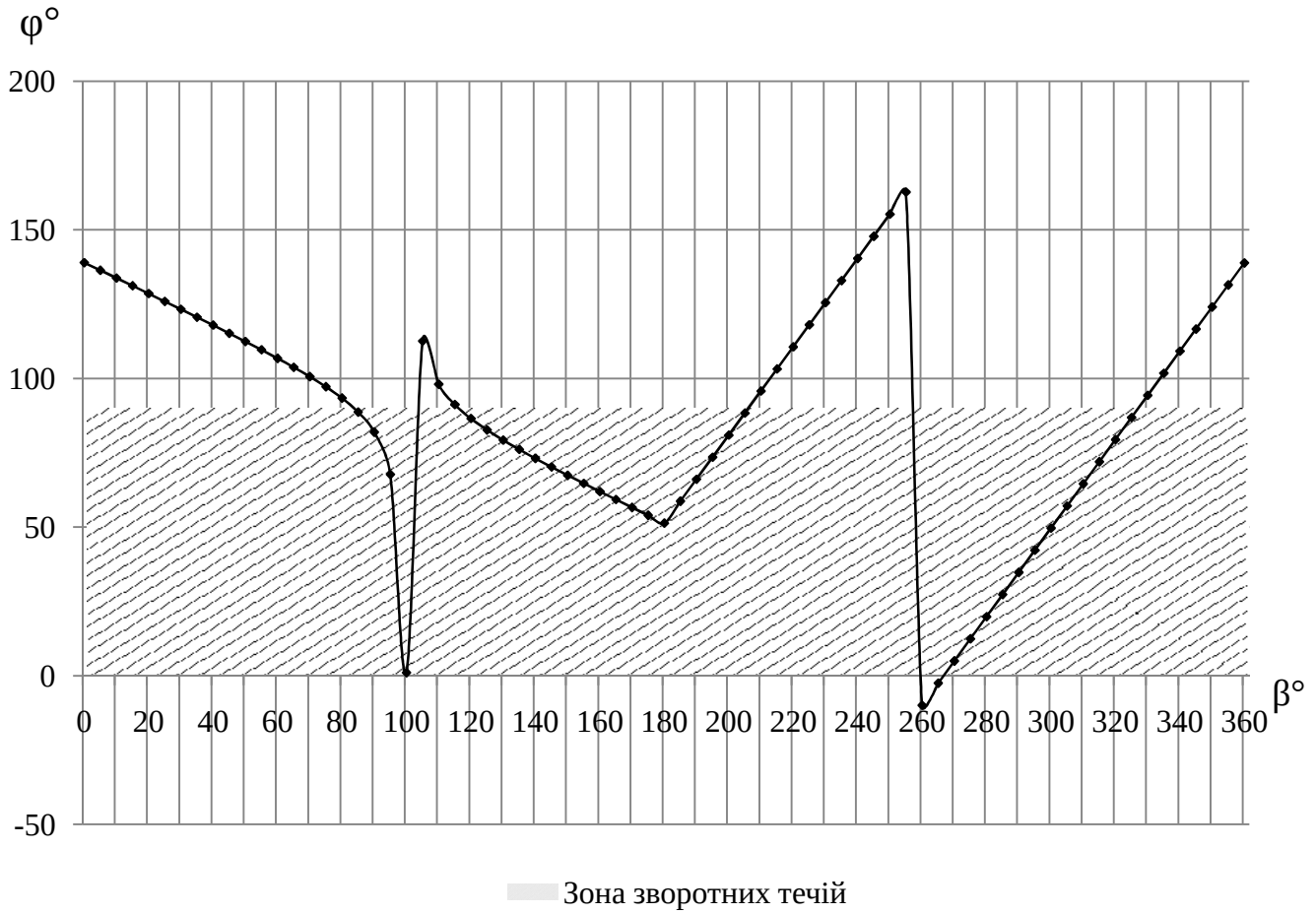


Рисунок 7 – Визначення зон для можливого введення вектора відносної швидкості $\bar{W}$’

Найбільший інтерес для практичного застосування цієї гіпотези представляє сектор в межах нульового азимутального кута β = 320°…0°…80°. У цьому діапазоні колової траєкторії лопаті спостерігається виникнення максимального моменту опору з боку потоку повітря.

Вплив допоміжного вектора швидкості на енергетичні показники вітроколеса визначаємо за допомогою математичної моделі, розробленої на основі імпульсної теорії, згідно з якою потік повітря втрачає половину свого напору в об’ємі вітроколеса:

$$V_1 = \frac{V_0+V_2}{2} = V_0\frac{1+\frac{V_2}{V_0}}{2} = V_0\frac{1+\bar{V}_2}{2}, \quad (6)$$

де V_0 – швидкість набігаючого потоку;

V_1 – швидкість потоку в обє’мі ротора;

V_2 – швидкість потоку за ротором.

В основу математичної моделі покладена гіпотеза про те, як необхідно вплинути на набігаючий потік, щоб по всій коловій траєкторії руху лопаті величина тягової сили досягла свого максимуму.

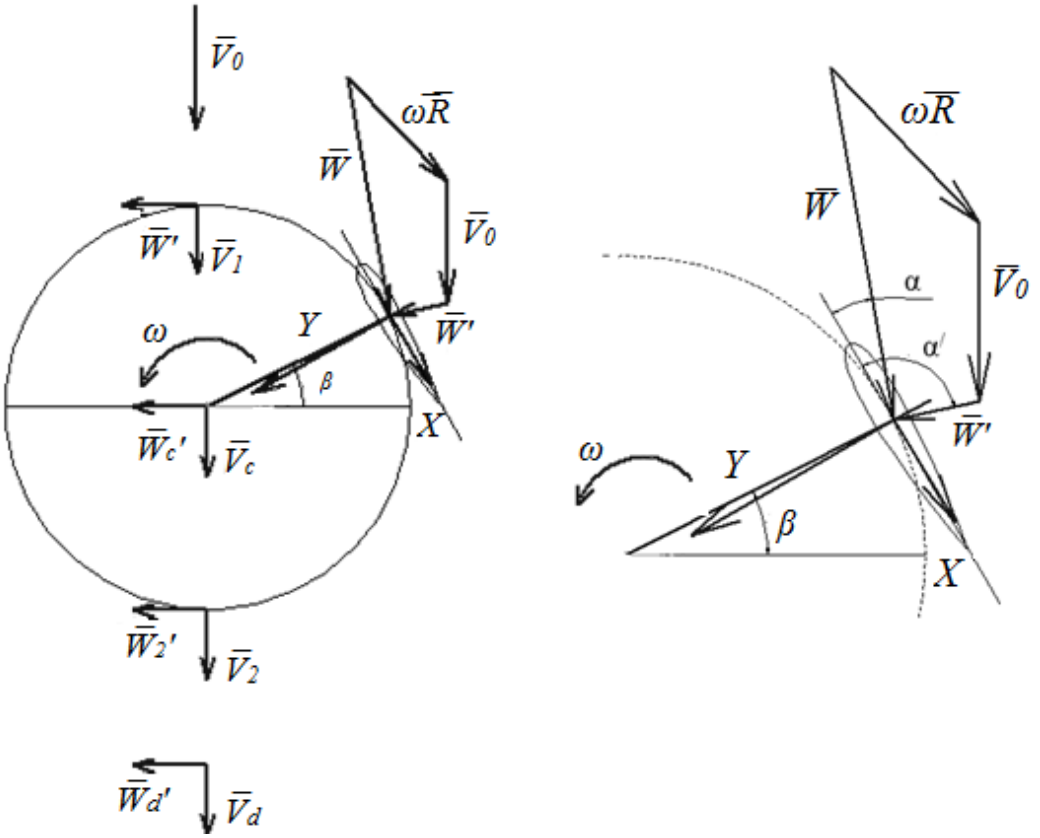


Рисунок 8 – Розрахункова схема для двоструминної імпульсної моделі вітроколеса

Розрахункова схема вітроколеса (рис. 8) поділяється 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 навітряному боці; V_e , $W_e^{/}$ - компоненти швидкості по центру вітроколеса; V_2 ,$W_2^{/}$ - компоненти швидкості на підвітряному боці; Vd ,$W_d^{/}$ - компоненти швидкості далеко за вітроколесом; ω – частота обертання; α – кут атаки відносної швидкості W; $\alpha^{/}$ - кут атаки допоміжної швидкості $W^{/}$; β – кут азимутального положення лопаті.

Коефіцієнти гальмування потоку представлено у наступному вигляді:

- для навітряного боку:

$$A_1 = \frac{V_1}{V_0}, B_1 = \frac{W_1}{V_0}, \tag{7}$$

- для підвітряного боку:

$$A_2 = \frac{V_2}{V_e}, B_2 = \frac{W_2}{V_e}. \tag{8}$$

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

$$V_1 = \frac{V_0+V_e}{2}, W_1^{/} = W^{/}, V_2 = \frac{V_e+V_d}{2}, W_2^{/} = \frac{W_e^{/}+W_2^{/}}{2}. \tag{9}$$

Виразимо швидкості через коефіцієнти гальмування потоку:

$$V_1 = A_1V_0\,,\ W_1^{/} = B_1V_0 = W^{/}, \tag{10}$$

$$V_e = (A_1 - 1)V_0,\ W_e^{/} = \frac{W_1^{/}}{2}, \tag{11}$$

$$V_2 = A_2(2A_1 - 1)V_0,\ W_2^{/} = B_2(2A_1 - 1)V_0, \tag{12}$$

$$V_d = (2A_2 - 1)(2A_1 - 1)V_0,\ W_d^{/} = V_0\left(2B_2(2A_1 - 1) - \frac{B_1}{2}\right). \tag{13}$$

Зміна кількості руху потоку:

- для навітряного боку:

$$\Delta K_{1x} = m_1(V_0 - V_e), \Delta K_{1z} = -m_1(W - W_e); \quad (14)$$

- для підвітряного боку:

$$\Delta K_{2x} = m_2(V_e - V_d), \Delta K_{2z} = -m_1(W_e^{/} - W_d^{/}). \quad (15)$$

Масова витрата повітря для навітряної та підвітряної сторони:

$$m_1 = \rho S\left(V_1 + W^{/}\right), \quad (16)$$

$$m_2 = \rho S\left(V_2 + W_2^{/}\right), \quad (17)$$

де ρ – густина повітря;

S – площа перерізу вітроколеса.

Згідно з припущеннями імпульсної моделі допускаємо, що підйомну силу Y та силу лобового опору X можна визначати через аеродинамічні коефіцієнти профільованої лопаті C_y та C_x:

$$F_y = \frac{\rho W_2}{2} bHC_y(\alpha), \quad (18)$$

$$F_x = \frac{\rho W_2}{2} bHC_x(\alpha), \quad (19)$$

де b – хорда лопаті;

H – висота лопаті.

Середні значення сил, що діють уздовж осей x та z:

- для навітряного боку:

$$P_{1x} = \frac{i}{2\pi}\int_0^{\pi} X d\beta\,, P_{1z} = \frac{i}{2\pi}\int_0^{\pi} Z d\beta; \quad (20)$$

- для підвітряного боку:

$$P_{2x} = \frac{i}{2\pi}\int_{\pi}^{2\pi} X d\beta\,, P_{2z} = \frac{i}{2\pi}\int_{\pi}^{2\pi} Z d\beta, \quad (21)$$

де $X = -F_y \sin(\beta) - F_x \cos(\beta)\,, Z = -F_y \cos(\beta) + F_x \sin(\beta)$. (22)

Допускаємо, що кінетична енергія, втрачена потоком при взаємодії з лопатевою системою вітроколеса, повністю перетворилася в механічну енергію. Тоді для відповідних частин вітроколеса:

$$\Delta K_{1x} = -P_{1x}, \Delta K_{1z} = -P_{1z}, \quad (23)$$

$$\Delta K_{2x} = -P_{2x}, \Delta K_{2z} = -P_{2z}. \quad (24)$$

З урахуванням (5 – 14) рівняння енергетичної взаємодії вітроколеса з потоком повітря набувають вигляду:

$$\left(A_1 + \frac{W^{/}}{V_0}\right)\left(1 - (2A_1 - 1)\right) = \frac{ib}{8\pi R}\int_0^{\pi} \frac{W^2}{V_0^2}\left(C_x cos\beta + C_y sin\beta\right) d\beta, \quad (25)$$

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

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

$$(A_2 - B_2)\left[\frac{W^{/}}{2V_0(2A_1 - 1)} - \left[2B_2 - \frac{W^{/}}{2(2A_1 - 1)}\right]\right] = \frac{ib}{8\pi R(2A_1 - 1)^2 V_0^2}\int_{\pi}^{2\pi}\left(C_y cos(\beta) - C_x \sin(\beta)\right) d\beta$$

Швидкохідність вітроколеса:

- для навітряної частини:

$$\theta_1 = \frac{\omega R}{V_0}, \tag{26}$$

- для підвітряної частини:

$$\theta_2 = \frac{\omega R}{V_e} = \frac{\omega R}{(2A_1 - 1)V_0}. \tag{27}$$

Аеродинамічний коефіцієнт крутного моменту, що діє на вітроколесо:

$$C_M = \frac{ib}{4\pi R}\int_0^{\pi}\frac{W^2}{V_0^2}\left(C_y(\alpha)\sin(\alpha) - C_x(\alpha)\cos(\alpha)\right)d\beta + \\ + \frac{ib}{4\pi R}(2A_1 - 1)^2\int_{\pi}^{2\pi}\frac{W^2}{V_0^2}\left(C_y(\alpha)\sin(\alpha) - C_x(\alpha)\cos(\alpha)\right)d\beta \tag{28}$$

Наведено опис чисельного експерименту. Для можливості аналітичного розрахунку енергетичних показників вітроколеса необхідно знати аеродинамічні характеристики профільованого крила при різних кутах атаки потоку. Ці дані одержують при продувці профілів в аеродинамічних трубах, що потребує значних матеріальних і часових затрат.

У роботі запропоновано використання академічного пакету прикладних програм ANSYS CFX для моделювання обтікання потоком повітря твердого тіла. Для перевірки можливості застосування цього програмного комплексу проведено розрахунок обтікання сферичного тіла типу кулі (рис. 9). Для максимальної подібності отриманої залежності Cx=f(Re) (рис. 10) з експериментальною кривою визначено вплив геометрії розрахункової області та моделі турбулентності на вихідні дані. Визначено, що найкращу подібність отримано з використанням SST-моделі турбулентності та якісної сітки на поверхні досліджуваного об’єкта, що складається із 30 призматичних шарів із висотою пристінкового шару не більше 0,001 мм.

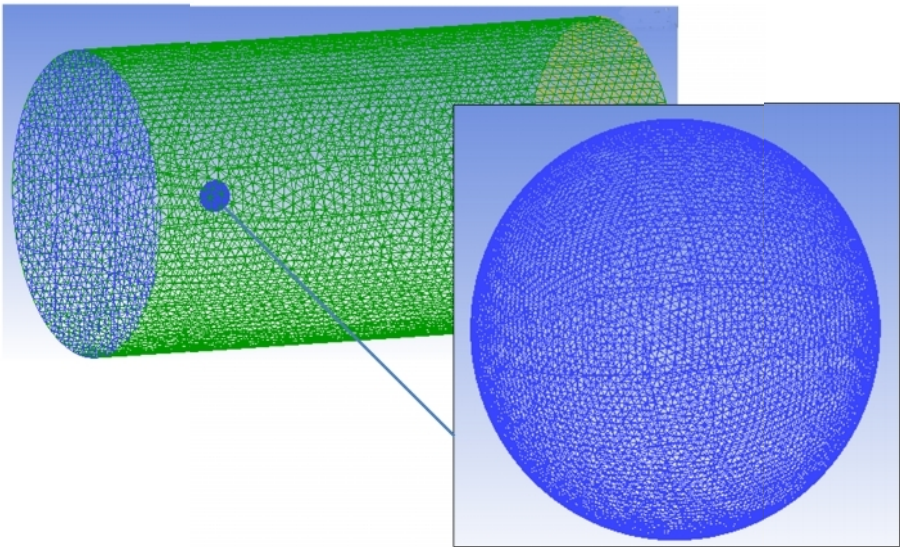


Рисунок 9 – Розрахункова область при моделюванні обтікання сфери

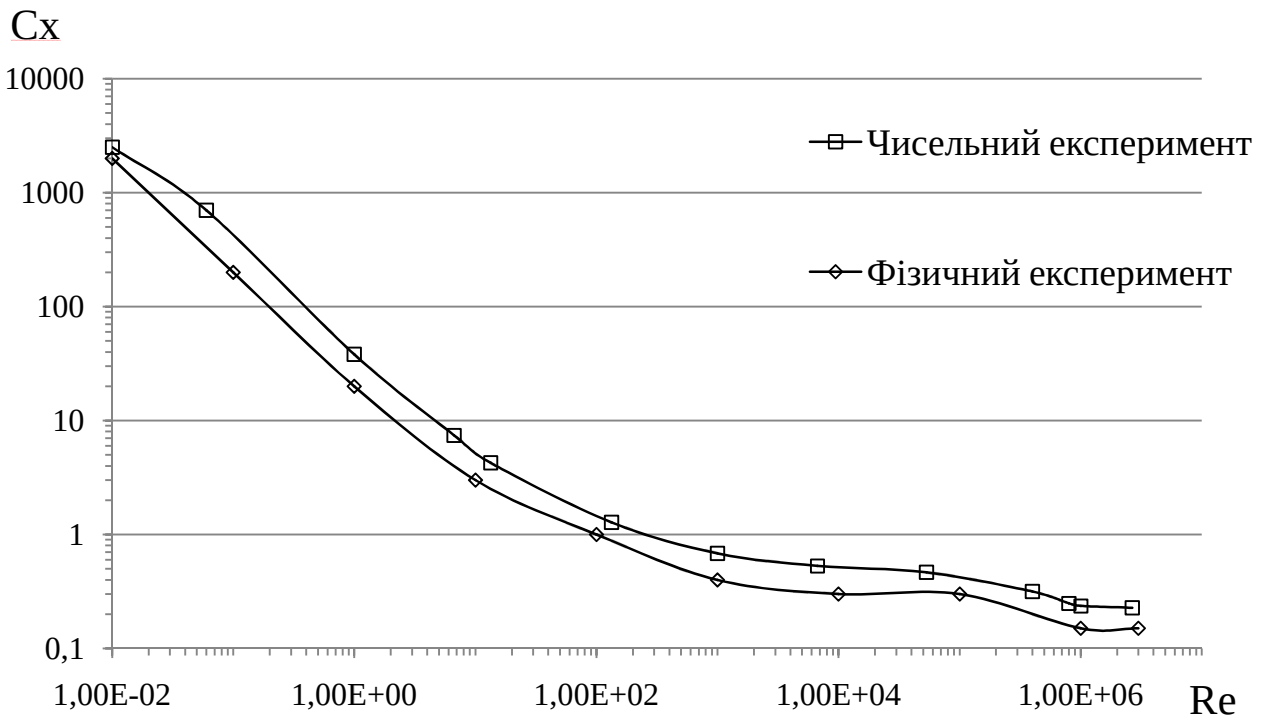


Рисунок 10 – Залежність коефіцієнта лобового опору від числа Рейнольдса для сфери Cx = f(Re)

Отримані практичні результати дають підстави для розв’язання задачі з визначення аеродинамічних показників профільованих лопатей розрахунковим шляхом. Придатність використання ANSYS CFX як інструментального засобу для моделювання обтікання потоком повітря профільованої поверхні перевірена на дослідному зразку лопаті з профілем NACA 0015 (рис. 11).

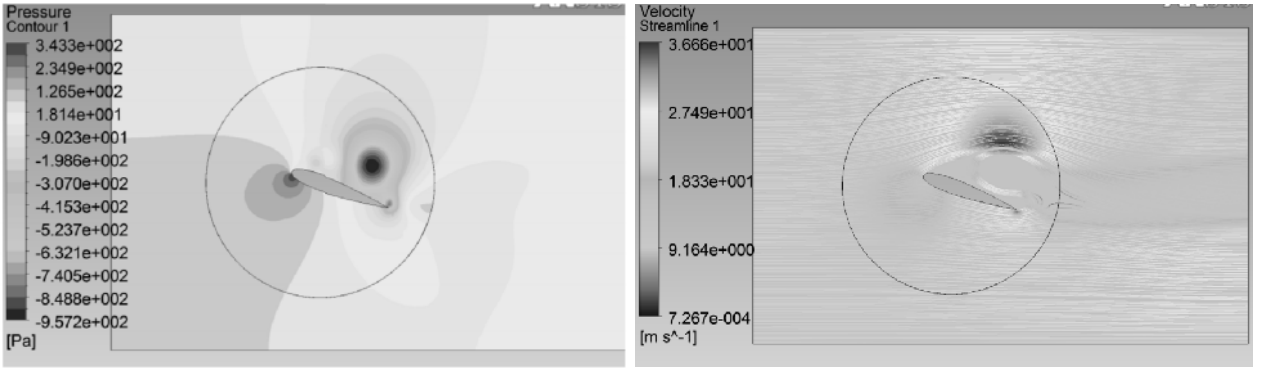


Рисунок 11 – Розрахунок аеродинамічних характеристик профілю NACA 0015

Визначено показники коефіцієнтів лобового опору C_x та підйомної сили C_y при різних кутах атаки профілю та проведено порівняльний аналіз із даними, одержаними в лабораторії LMAL-NACA (рис. 12).

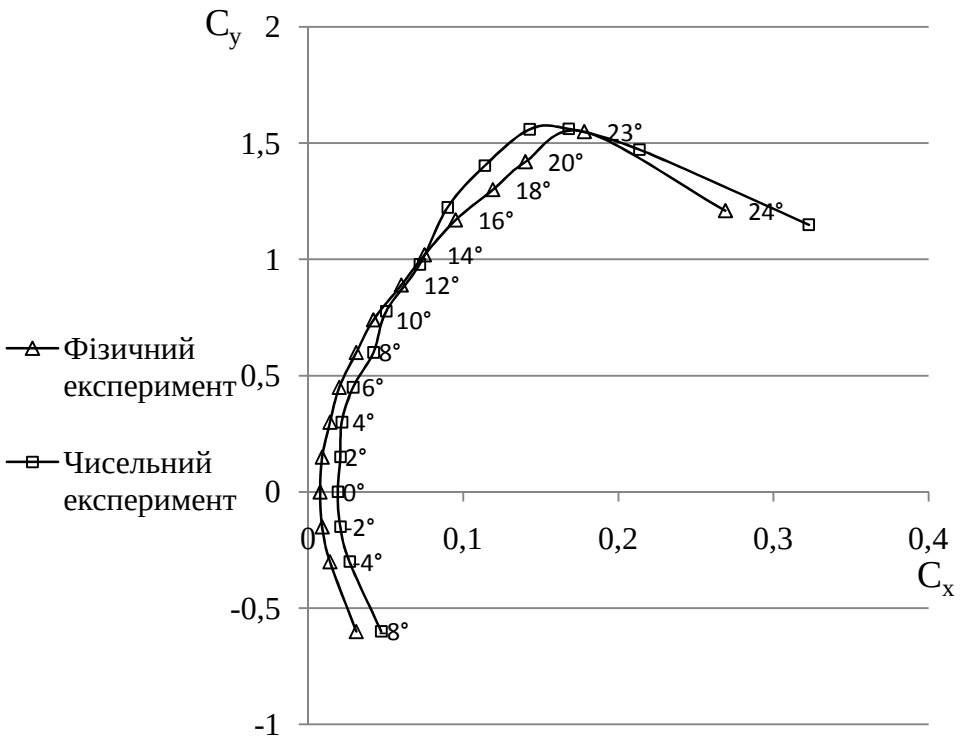


Рисунок 12 – Крива Лілієнталя I роду профілю NACA 0015

У четвертому розділі наведено опис експериментальної установки, фізичного моделювання робочого процесу ортогонального вітродвигуна та визначення похибок одержаних даних. Наведено залежності енергетичних характеристик ортогональних вітродвигунів із використанням гнучких профільованих лопатей від геометричних параметрів вітроколеса порівняно з параметрами подібних установок. Доведено доцільність використання гнучких лопатей для покращання процесу самозапуску вітродвигуна за рахунок високих значень крутного моменту на валу вітроколеса на стартових режимах роботи (рис. 13). Проведено аналіз залежності енергетичних характеристик від геометрії вітроколеса, а саме в залежності від коефіцієнту заповнення вітроколеса σ.

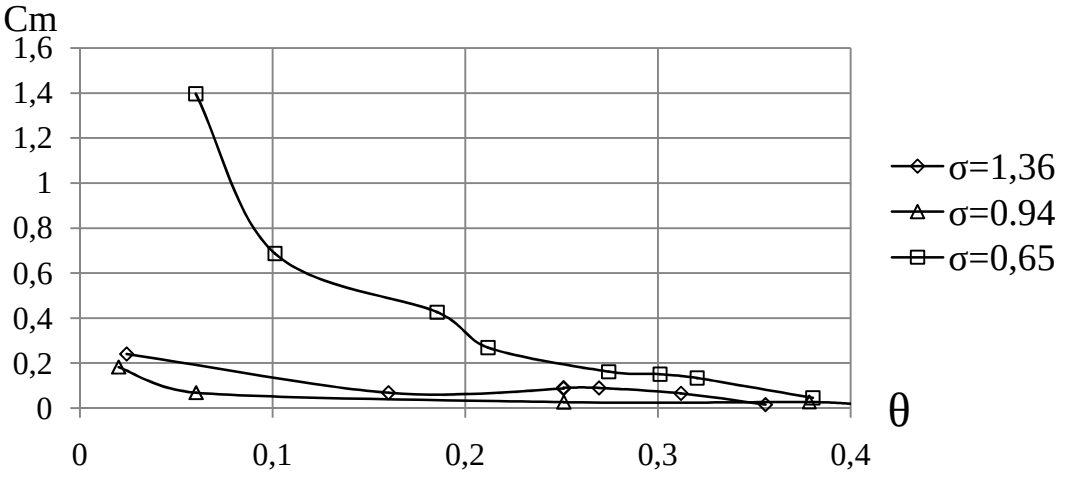
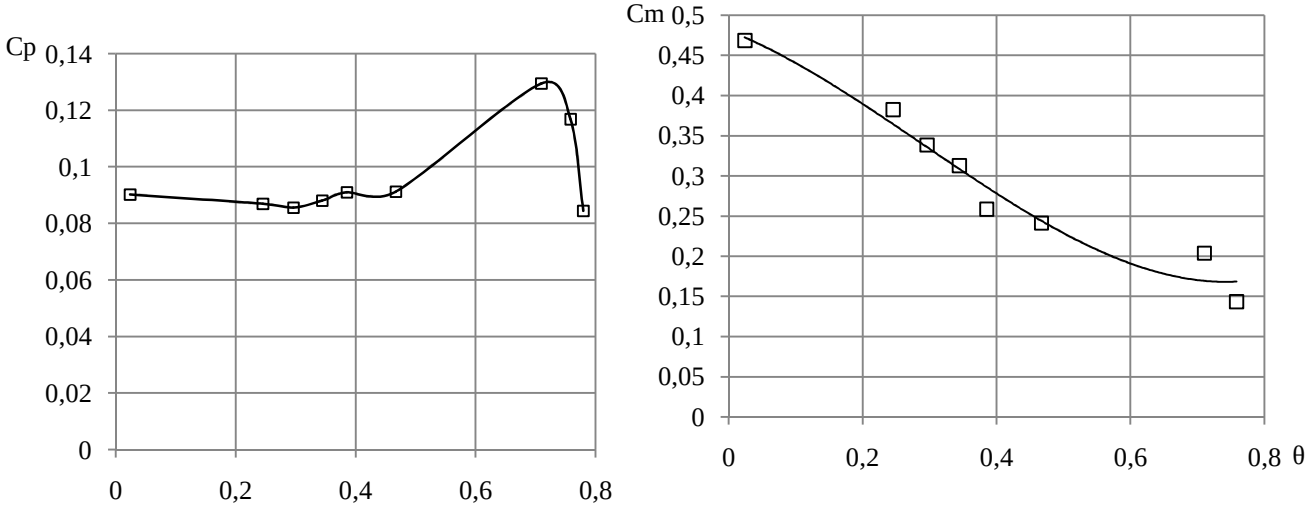


Рисунок 13 - Залежність $C_m = f(\theta)$ для симетричної лопаті парусного типу з гнучкою частиною за максимальною товщиною лопаті при різних коефіцієнтах заповнення вітроколеса



а) б)

Рисунок 14 – Енергетичні характеристики симетричної лопаті з половиною гнучкої частини за максимальною товщиною лопаті: а) - $C_p = f(\theta)$; б) - $C_m = f(\theta)$

Викладено перевірку гіпотези про зміну вектора відносної швидкості потоку на поверхні лопаті за рахунок введення допоміжного вектора швидкості. Додатковий потік створювався за рахунок введення в робочу зону допоміжного екрана. Досліджено два типи екранів, установлені при різних кутах відносно потоку повітря: плоский екран довжиною 120 мм та радіусний екран довжиною 170 мм. Вплив екрана на генеровану потужність вітроустановки проводився в зоні ходу лопаті «на потік», в якій спостерігається виникнення максимального моменту опору за рахунок високих значень сил лобового опору (рис. 15).

На всіх досліджуваних режимах на секторі 0-36° азимутального кута установки екрану відносно траєкторії руху лопаті спостерігається підвищення потужності вітроколеса. Найбільшого значення вона досягла з використанням плоского екрану встановленого під кутом 20° на азимутальному куті 36°.

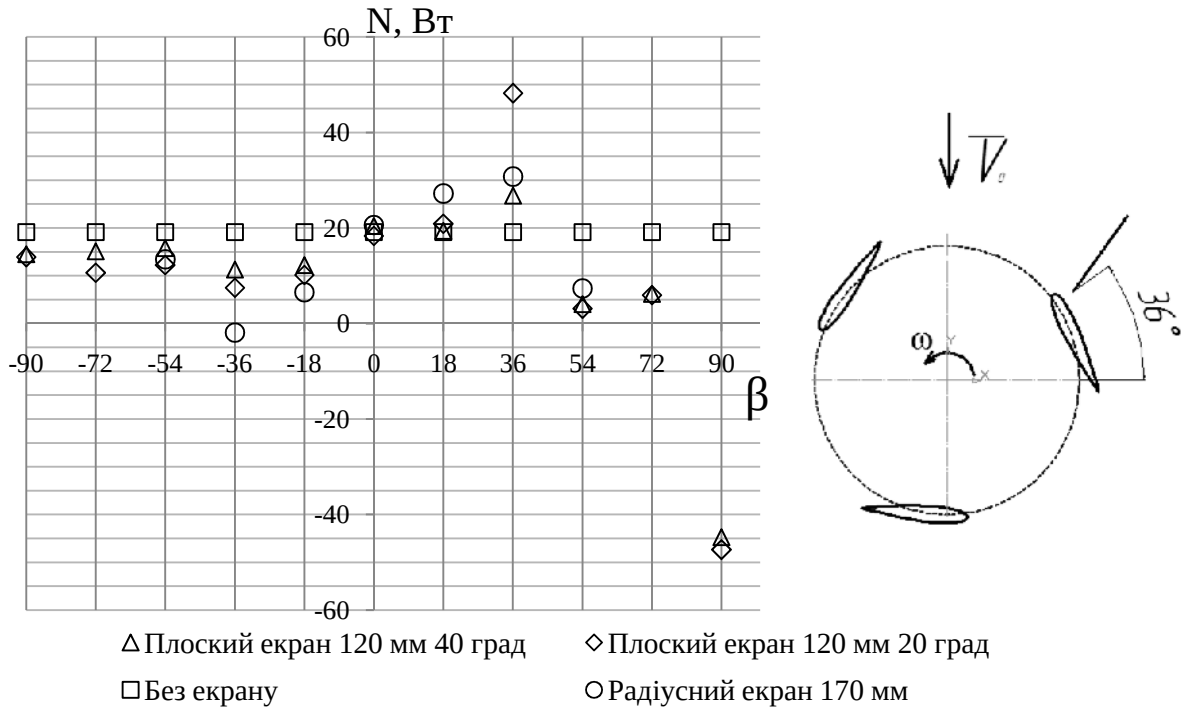


Рисунок 15 – Зміна потужності вітроколеса при введенні в робочу зону екрану

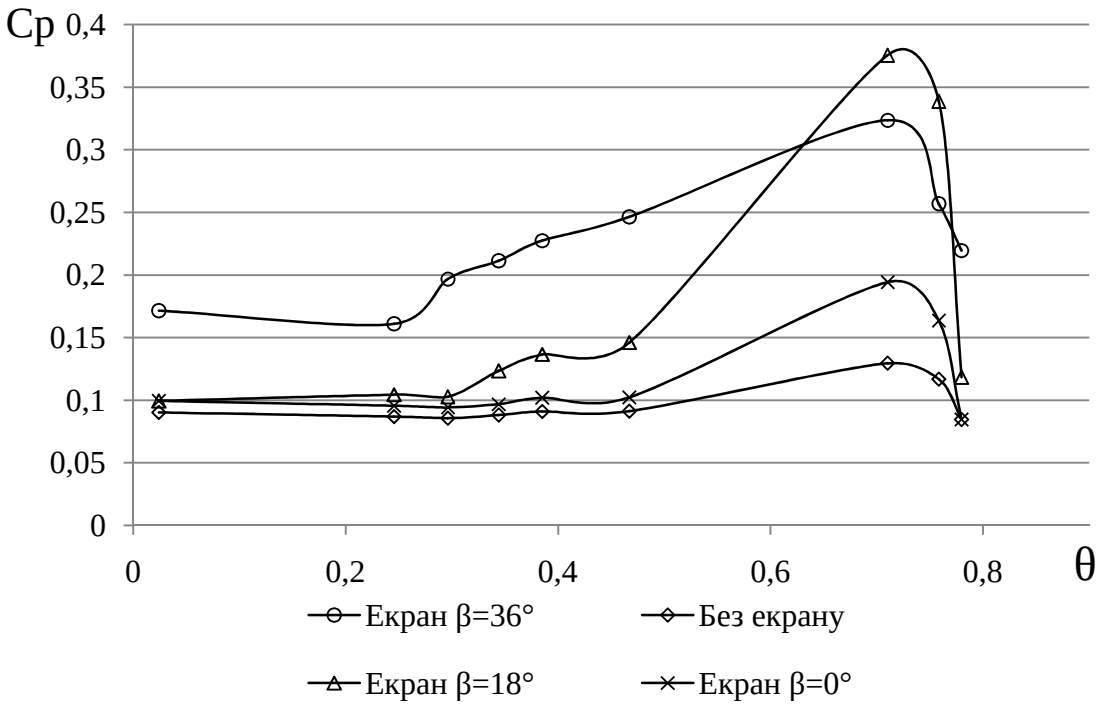


Рисунок 16 – Енергетичні залежності $C_p = f(\theta)$ для вітроколеса з використанням екрана, встановленого під різними кутами

Із цього зроблено висновок, що для підвищення ефективності роботи ортогонального вітродвигуна на нерозрахункових режимах роботи та при слабих вітрових потоках доцільно використовувати введення допоміжного вектора швидкості, що призводе до підвищення генерованої вітроколесом потужності.

ВИСНОВКИ

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 прзводить до зменшення пульсацій аеродинамічних сил та стабільної роботи вітрової турбіни на нерозрахункових режимах в умовах вітрових потоків малої потужності.

3. Вперше розроблено двоструминну 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 $\bar{W}$', що прзводе 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 швидкохідностях $\theta < 0{,}5$. 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 $\beta=0$ приводе 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 ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Липовий В.М. Розробка експериментального стенду для визначення аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів / В.М.Липовий// Ж. Проблемы машиностроения – 2012. - № 3-4. – С49-52 .
2. 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.

3. 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 .
4. 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.
5. Lupoviy V. Methods development for determining the aerodynamic characteristics of vertical axis wind turbine / Lupoviy V., Papchenko A.// Applied Mechanics and Materials. Vol. 630 in 2014. – pp. 74-80.
6. Липовий В.М. Розробка експериментального стенду для визначення аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів/Євтушенко А.О, Папченко А.А.. Липовий В.М.// «Промислова гідравліка та пневматика»: Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції, вересень 2012р., тези доп. – Чернігів, 2012. – С.149.
7. Липовий В.М. Дослідження обтікання сферичного тіла методом чисельного експерименту/Липовий В.М., Папченко А.А.// «Сучасні технології у промисловому виробництві»: Матеріали науково –технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій, квітень 2013р., тези доп. – Суми,2013. – Ч.2. - С.71.
8. Липовий В.М. Дослідження робочого процесу ортогонального вітродвигуна/ Липовий В.М., Папченко А.А. //«Герметичность, вибронадежность и екологическая безопасность насосного и копроессорного оборудования», «ГЕРВИКОН+НАСОСЫ-2014»: Материалы XIV Международная научно-техническая конференция, сентябрь 2014г. – Сумы, 2014. – С.126.
9. Липовий В. М. Дослідження характеристик потоку повітря в робочій частині аеродинамічної труби/Липовий В.М., Папченко А.А.// «Сучасні технології у промисловому виробництві»: Матеріали III Всеукраїнської міжвузівської науково –технічної конференції, квітень 2014р., тези доп. – Суми,2014. – Ч.2. - С.156.
10. Липовий В.М. Експериментальний стенд для визначення аеродинамічних характеристик ортогональних вітродвигунів/ Липовий В.М., Папченко А.А.// «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці»: Матеріали XIX міжнародної науково-технічної конференції, травень 2014р., тези доп. – Кіровоград, 2014. – С.130.

АНОТАЦІЯ

Липовий В. М. Підвищення енергетичних характеристик ортогональних вітродвигунів для використання вітрових потоків малої потужності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. – Сумський державний університет, Суми, 2015.

У дисертаційній роботі приведено вирішення питання самозапуску вертикально-осьового вітродвигуна для малих та середніх розмірів вітроколіс при використанні вітрових потоків низької потужності. Розроблено аналітичний метод визначення оптимальних характеристик потоку повітря для продукування максимального тягового зусилля на всій траєкторії руху лопаті. Чисельним моделюванням обтікання лопаті потоком повітря вирішено питання визначення аеродинамічних коефіцієнтів для заданого профілю, що з певним припущенням дозволяє відмовитися від натурного експерименту продувки профілю в аеродинамічній трубі.

Запропоновано механізм впливу на ортогональне вітроколесо шляхом уведення допоміжного вектору швидкості, з метою підвищення його аеродинамічних характеристик. Цей механізм випробувано на експериментальному стенді та доведено доцільність його використання під час роботи вітроколеса на нерозрахункових режимах.

У результаті досліджень визначено показники крутних моментів на валу ортогональної вітротурбіни з прямими лопатями парусного типу. Доведено підвищення стартового тягового моменту. Для запропонованих конструкцій симетричних гнучких профільованих лопатей наведені інтегральні характеристики при змінних геометричних показниках вітроколеса.

Результати дисертаційної роботи дозволяють розробляти високоефективні вітроенергетичні установки, орієнтовані на використання вітрових потоків низької потужності, що є актуальним для території України.

Ключові слова: самозапуск вітроколеса, гнучкі лопаті, вертикально-осьова вітротурбіна Дар’є, аеродинамічні характеристики, оптимальний кут атаки.

АННОТАЦИЯ

Липовый В. Н. Повышение энергетических характеристик ортогональных ветродвигателей для использования ветровых потоков малой мощности. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 - гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. - Сумской государственный университет, Сумы, 2015.

В диссертационной работе приведены решения вопроса самозапуска вертикально-осевого ветродвигателя для малых и средних размеров ветроколес при использовании ветровых потоков низких мощностей. Разработан аналитический метод определения оптимальных характеристик потока воздуха для возникновения максимального тягового усилия на всей траектории движения лопасти. Численным моделированием обтекания лопасти потоком воздуха решен вопрос определения аэродинамических коэффициентов для заданного профиля, что с определенным предположением позволяет отказаться от натурного эксперимента продувки профиля в аэродинамической трубе.

Предложен механизм влияния на ортогональное ветроколесо путем введения вспомогательного вектора скорости с целью повышения его энергетических характеристик. Данный механизм испытано на экспериментальном стенде и доказана целесообразность его использования при

работе ветроколеса на нерасчетных режимах.

Впервые разработано двухструйную математическую модель ортогонального ветродвигателя для определения кинематических характеристик потока воздуха, которые влияют на повышение мощности ветроколеса. Разработано аналитические зависимости для определения влияния на эффективность работы ветротурбины дополнительного вектора скорости $\bar{W}$', что приводит к смещению треугольников скоростей в сторону увеличения тяговой силы на поверхности лопасти.

В результате исследований определены показатели крутящих моментов на валу ортогональной ветротурбины с прямыми лопастями парусного типа. Доказано повышение стартового тягового момента. Для предложенных конструкций симметричных гибких профилированных лопастей приведены интегральные характеристики при переменных геометрических показателях ветроколеса.

Экспериментальным путем определено, что введение вспомогательного вектора скорости путем установки экрана на дуге круговой траектории в области нулевого азимутального угла $\beta=0$ позволяет повысить мощность ветроколеса. Плоский экран длинной 120 мм, наклоненный под углом 20° на азимутальном угле 36° повышает генерируемую мощность ветроколеса в 2,5 раза.

Определено, что использование гибких парусных лопастей симметричного профиля позволяет получить высокие значения начального крутящего момента на валу ортогональной ветротурбины. При низкой быстроходности $\theta < 0,5$ значение коэффициента крутящего момента составляет $C_m = 0,47$. При дальнейшем разгоне ветроколеса C_m падает до значения жесткой симметричной лопасти $C_m = 0,1$.

Результаты диссертационной работы позволяют разрабатывать высокоэффективные ветроэнергетические установки, ориентированные на использование ветровых потоков низкой мощности, что актуально для территории Украины.

Ключевые слова: самозапуск ветроколеса, гибкие лопасти, вертикально-осевая ветротурбина Дарье, аэродинамические характеристики, оптимальный угол атаки.

ABSTRACT

Lipoviy V. Increasing the energy performances of vertical axis wind turbines for wind flows of low power. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.05.17 - hydraulic machines and hydropneumaticunits. – Sumy State University, Sumy, 2015.

The thesis shows the solution to the question of self-start of vertical-axis wind turbine for small and medium-sized windwheels using wind currents low capacity. An analytical method for determining the optimal characteristics of the air flow for the occurrence of maximum power to the entire trajectory of the blade. Numerical simulation of flow around the blade airflow resolved the question of determining the aerodynamic coefficients for a given profile, with certain assumptions eliminates the

natural experiment blowing in the wind tunnel profile.

The mechanism of the effect of the orthogonal wind wheel, by introducing auxiliary velocity vector, in order to improve its energy performance. This mechanism is tested on experimental stand and prove the feasibility of its use in the operation of the wind wheel on the off-nominal conditions.

The studies identify indicators torque of the orthogonal wind turbine with straight blades sailing type. Proven to increase the starting of torque. For the proposed construction of symmetric flexible profiled blades are given integral characteristics with variable geometry have been the propeller.

The results of the thesis allow you to develop highly efficient wind turbines focused on the use of wind flows low power, which is important for Ukraine.

Keywords: windwheel self-starting , flexible blade, Darrieus vertical axis wind turbine, aerodynamic characteristics, optimal angle of attack.