

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ**

**КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ
ТА КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ**

Кваліфікаційна робота

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

на тему: «Дослідження процесу виробництва електроенергії в повітряному пристрої напівзакритого типу»

Виконала: студентка II курсу, групи 8.1452-дн
спеціальності: гідроенергетика
освітньої програми: гідроенергетика

А.П. Авксент`сва

(ініціали та прізвище)

Керівник: доц., к.т.н., Осаул О.І.

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент: Таратута В.О.

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя,

2023

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра: Електричної інженерії та кіберфізичних систем

Рівень вищої освіти: другий магістерський

Спеціальність: 145 Гідроенергетика

Освітня програма: Гідроенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри:

« » 2023 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Авксент`євої Аліни Петрівни

1. Тема роботи (проєкту): «Дослідження процесу виробництва електроенергії в повітряному пристрої напівзакритого типу».

Керівник роботи: доц. к.т.н., Осаул Олександр Іванович.

Затверджено наказом ЗНУ від «09» жовтня 2023 року, № 1577-с

2. Строк подання студентом роботи: 07 грудня 2023 року.

3. Вихідні дані до роботи: Теоретично та експериментально дослідити процес виробництва електроенергії в повітряному пристрої напівзакритого типу; експериментально визначити найбільш енергоефективну модифікацію запропонованого пристрою.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Аналіз існуючих вітроенергетичних систем генерації

електричної енергії. 2. Класифікація систем повітряних електрогенераторів. 3. Теоретичне дослідження умов виникнення вихрового ефекту. 4. Математичне дослідження вихрового ефекту ідеальної нестисненої рідини, фізичні процеси якої повністю відповідають процесам повітряного потоку. 5. Дослідження ефекту Вентурі. 7. Теоретичне визначення умов виникнення явища «природної тяги». 8. Математичне представлення параметрів депресії природної тяги. 9. Гідростатичний метод розрахунку параметрів депресії природної тяги. 10.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): види повітряних генераторів, Класифікація повітряних електрогенераторів за їх базовими характеристиками, загальні зображення повітряних електрогенераторів вертикально – осьового та горизонтально-осьового типів, схема руху повітряного потоку у різних частинах вихрової трубі, схеми до визначення параметрів природної тяги у каналах повітропроводу, графічне зображення сумарної характеристики вентилятора та природної тяги, зображення 3-D моделі повітряного електрогенератору напівзакритого типу, 3-D моделі складових частин пристрою генерації електроенергії, розрахунки електричних та енергетичних параметрів пристрою генерації електроенергії. креслення кінцевої модифікації повітряного електрогенератору напівзакритого типу, зображення існуючих складових частин «пілотного» зразка запропонованого пристрою.


6. Консультанти розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Осаул О.І., доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем	01.11.2022р. А.Осаул	02.02.2023р. А.Осаул
Розділ 2	Осаул О.І., доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем	02.02.2023р. А.Осаул	25.03.2023р. А.Осаул
Розділ 3	Осаул О.І., доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем	25.03.2023р. А.Осаул	05.12.2023р. А.Осаул

7. Дата видачі завдання: 25.09. 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз існуючих вітроенергетичних установок	01.11.2022 р.	
2.	Теоретичне та практичне дослідження процесів вихрового руху повітряних мас.	02.02.2023 р.	
3.	Теоретичне та практичне дослідження умов створення явища «природної тяги».	25.03.2023 р.	
4.	3-D моделювання початкового зразку повітряного пристрою електрогенерації напівзакритого типу. Розрахунок реальних розмірів майбутнього «пілотного» зразку запропонованого пристрою, розрахунок очікуваної потужності пристрої, місцевих втрат, КПД установки.	16.06.2023 р.	
5.	Графічне зображення (моделювання) конструктивних змін запропонованого пристрою електрогенерації, креслення і розрахунок майбутніх складових частин «пілотного» зразка пристрою.	10.09.2023 р.	
6.	Створення (виготовлення складових частин) «пілотного» зразку для проведення практичних досліджень процесу генерації електричної енергії.	25.11.2023 р.	
7.	Перший запуск діючої «пілотної» установки, експериментальне дослідження найбільш енергоефективної модифікації пристрою.	05.12.2023 р.	

Студент  А.П. Авксент'єва

(підпис)

Керівник роботи (проєкту)  О.І. Осаул

(підпис)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер:  В.В. Артемчук

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Авксент`єва А.П. «Дослідження процесу виробництва електроенергії в повітряному пристрої напівзакритого типу».

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 145 «Гідроенергетика». Науковий керівник - канд. техн. наук, доц. Осаул О.І. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2023 р.

В дипломній роботі проведено аналіз існуючих вітроенергетичних систем генерації електричної енергії, досліджено фізичні процеси природної тяги та вихрового ефекту повітряного потоку, виконаний аналіз конструктивних особливостей «ротора Оніпка». Розроблена 3-D модель запропонованого повітряного пристрою генерації електроенергії напівзакритого типу, виконано та експериментально досліджено деякі фізичні процеси «пілотного» зразка. Досліджено різні модифікації повітряного генератора напівзакритого типу та експериментально обґрунтовано конструктивні особливості побудови.

Ключові слова: ВИХОРОВИЙ ЕФЕКТ, ПОВІТРЯНИЙ ГЕНЕРАТОР, «РОТОР ОНІПКА», ПРИРОДНА ТЯГА, АЕРОДИНАМІКА ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ, ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА УСТАНОВКА.

ABSTRACTS

Avksentieva A.P. "Research of the process of electric power generation in an air device of semi-closed type".

Qualifying final work for obtaining a master's degree in specialty 145 "Hydropower". Supervisor – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Osaul O.I. Potebnyi Engineering Education and Research Institute of Zaporizhzhia National University. Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems, 2023.

The thesis analyzes the existing wind power generation systems, investigates the physical processes of natural draft and vortex effect of air flow, and analyzes the design features of the Onipko rotor. A 3-D model of the proposed semi-closed-type airborne power generation device was developed, and some physical processes of the "pilot" sample were performed and experimentally investigated. Various modifications of the semi-closed-type air generator are investigated and the design features of the construction are experimentally substantiated.

Keywords: VORTEX EFFECT, AIR GENERATOR, "ROTOR'S ONIPKO", NATURAL THRUST, AERODYNAMICS OF AIR FLOW, WIND POWER PLANT.

ВСТУП

Актуальність роботи. Пріоритетними напрямками в сфері альтернативних джерел енергії – є пошук найбільш енергоефективних пристроїв генерації електричної енергії. Вітроенергетичні установки ефективні лише при наявності вітру, тому запропоновано пристрій, особливістю якого є використання «ротора Оніпка», початкова швидкість якого становить 0,3 м/с, що дозволяє обрати для стартового обертання повітряний потік, утворений явищем «природної тяги». Підвищення енергетичних показників також відбувається за рахунок монтажу гвинтоподібних треків для утворення спрямованого вихороподібного руху повітряних мас, встановлення ізолюючих від зовнішніх впливів відбивачів, які одночасно виконують функцію зосередження кругообігу повітряного потоку і підтримання постійних показників температури, швидкості, вологості повітряного потоку.

Метою роботи є створення та експериментальне дослідження процесів генерації електроенергії у повітряному пристрої напівзакритого типу.

Задачі дослідження. Для досягнення зазначеної мети дослідження в магістерській роботі вирішуються такі завдання:

- аналіз існуючих вітроенергетичних пристроїв генерації електроенергії;
- теоретичне дослідження явища «природної тяги» та «вихрового ефекту»;
- 3-D моделювання запропонованого пристрою генерації електричної енергії;
- теоретичний розрахунок очікуваної потужності повітряного пристрою електрогенерації напівзакритого типу;
- створення «пілотного» зразка запропонованого пристрою, експериментальне дослідження модифікацій та аналіз найбільш ефективних.

Об'єктом дослідження є повітряний електрогенератор напівзакритого типу.

Методи та способи дослідження. Досягнення цілей відбувалось за допомогою теоретичних розрахунків створеної 3-D моделі повітряного генератора, практичних експериментальних досліджень різних модифікацій «пілотного» зразка. В роботі застосовувалися основні положення вихрового ефекту повітряних мас та положення створення явища «природної тяги».

Наукова новизна отриманих результатів. Запропоновано пристрій для автономного забезпечення електроенергією споруд з використання «ротора Оніпка», енергоефективність якого значно вища за теоретичними розрахунками, аніж інші існуючі пристрої альтернативних джерел енергії.

Практична цінність роботи. Теоретичні розрахунки очікуваної потужності демонструють високий КПД запропонованого пристрою, крім того перевагою є – автономність, малогабаритність та мінімальні витрати на забезпечення електричною енергією споруд (будівель).

Апробація роботи. Результати роботи представлені у другій міжнародній науковій та практичній конференції «Current challenges of science and education» та у фаховому виданні журналу «Nauka i Studia» [29,30].

Структура та обсяг кваліфікаційної випускної роботи. Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилання з 30 позицій. Загальний обсяг складає 82 сторінок, у тому числі 22 рисунки та 5 таблиць.

РОЗДЛ 1
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦІЇ
ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ.

1.1 Новітні конструкції повітряних електрогенераторів.

Сучасний стан електроенергетичної галузі характеризується стрімким розвитком відновлюваних джерел енергії, особливостями яких виступає їх повна екологічна безпека елементів, що експлуатуються, а також ресурс даних джерел вважається необмеженим в енергетичному аспекті. Відтак, вітер є джерелом доступної та чистої відновлюваної енергії, в результаті використання якої відсутні шкідливі викиди в атмосферу. Недоліком вітроенергетичної установки є невелика потужність, але завдяки її роботі вирішується питання, викликані дефіцитом електроенергії у період пікових навантажень або забезпечення електроенергією віддалені від центрального енергопостачання райони міст, селищ.

До найперших повітряних турбін слід відносити турбіни горизонтально-осьового типу, які мають назву «перський вітряк» (рис. 1.1). Приблизний період датування винаходу даного виду припадає близько 900 р. н.е. та відповідно і з погляду сучасної системи класифікації розглядається як вітряк з вертикальною віссю обертання.

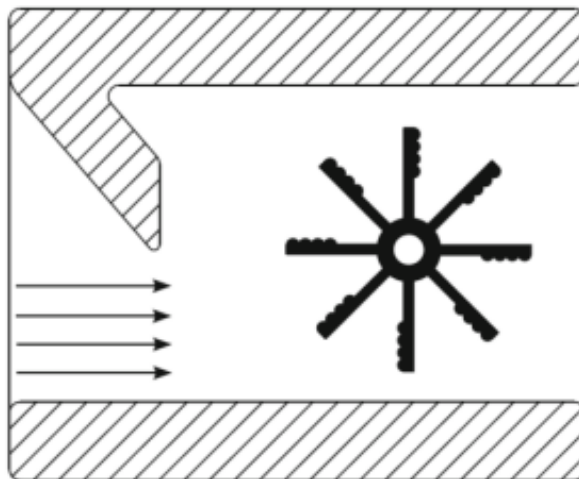


Рисунок 1.1 – «Перський вітряк»

Перша аеродинамічна повітряна турбіна з вертикальною віссю була розроблена та запатентована у Франції Жоржем Дар'є у 1927 році (рис. 1.2) [14]. Характеристикою цієї конструкції є швидкість обертання його лопатей, кутова швидкість яких кратна швидкості вітру.

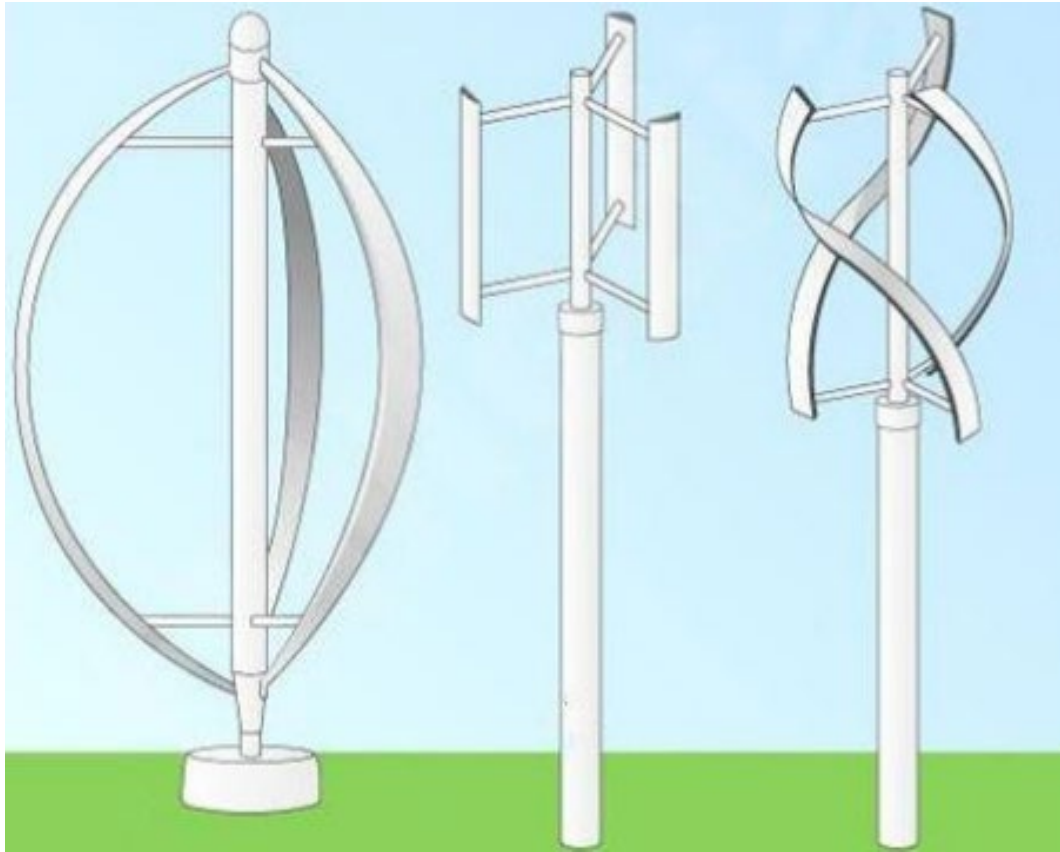


Рисунок 1.2 – повітряний генератор Дар'є.

Робота горизонтальних повітряних електрогенераторів передбачає, що кінетична сила вітру обертає турбіни, які мають дві чи три лопаті, від турбіни механічна енергія передається до головного валу, який з'єднаний з ротором генератора, ціль якого – перетворення механічної енергії в електричну. Відповідно до типової схеми електрогенератора, він складається з генератора, батарей-акумуляторів, контролеру електричного заряду. Постійний струм вітроенергетичної установки надходить до локального трансформатору струму, який перетворює його на змінний з метою подальшого електропостачання споживачів населених пунктів.

Промислові повітряні електрогенератори характеризуються потужністю від 100 кВт та можуть досягати кількох МВт, (рис.1.3) [15]. Зазначимо, що невеликі установки використовуються у комплексі з сонячними панелями, батареями та дизель-генераторами, назва яких «гібридні комплекси», які встановлюють у віддалених районах і не мають власних ліній для з'єднання зі споживачем та передачі йому електроенергії.



Рисунок 1.3 – Промислові повітряні електрогенератори

У сучасних вітроенергетичних установках використовуються генератори, які мають регульовану швидкість, поєднані при цьому проміжним перетворювачем потужності від цього генератора до відповідної системи збору енергії, що виступає вдалим способом здійснення міжмережевого з'єднання, чим забезпечується можливість відключення в умовах низького рівня напруги. Для цього облаштовують або генератори з ротором короткозамкненого характеру, або машини, що мають подвійне живлення.

Для енергетичних систем автономного електропостачання поширеною є проблема використання надмірної потужності, яка може бути вирішена завдяки проведенню експортних та імпортних заходів щодо направлення електроенергії до відповідних сусідніх районів; зміни рівня води у водосховищах, на яких працюють гідроелектростанції; переведення

електричної потужності на механічну енергію; навіть обмеження для користувачів у споживанні тощо. При цьому, використання локальних повітряних електрогенераторів дозволяє названу проблему вирішити, оскільки турбіни приєднуються до станції в якості цілісного комплексу завдяки відповідній системі збору потужностей. Зазначимо, що середня вихідна напруга у цьому випадку становить 34,5 кВт, а як вказано раніше, на станції ці показники збільшуються для подальшої передачі.

Цікаво зазначити, що аналіз всіх витрат встановлення нетрадиційних систем електропостачання призвів до визначення найдешевшим джерелом енергії повітряних установок HAWP (High-Altitude Wind Power рис. 1.4) [16]. Конкуренцію можуть представляти лише гідроелектростанції та звичайні повітряні електрогенератори, які використовуються для живлення локальних споживачів. HAWP-установки працюють на великих висотах, передбачаючи використання літаючих установок на висоті, де енергія вітру виявляється набагато більшою, ніж у поверхні землі. Відразу кілька дослідницьких груп розробляють AWE-технології (Airborne Wind Energy (AWE)), які призначені для використання на висоті до 610 м. Крім того, є і розробники, які створюють рішення, що працюють на висотах більш 650 м.



Рисунок 1.4 –HAWP-установки

Повітряні електрогенератори можуть мати різні конструкції в залежності від завдань, які вони виконують: повітряні електрогенератори-гіганти, розміром з висотний будинок, і повітряні електрогенератори-міні, вертикальні та горизонтальні, повітряні електрогенератори зовсім незвичайної форми [17]. Так, повітряні електрогенератори можуть парити у повітрі, плавати чи висіти на магнітних підвісках, розташовуватися між будинками та на дахах будинків.

Наприклад, Maglev Turbine – це повітряний електрогенератор, який вигадав 60-річний винахідник Ед Мазур, засновник компанії MaglevWindTurbine Technologies (MWTT) з Арізони. Це гігантський повітряний електрогенератор розміром із висотну будівлю займає площу 40 гектарів. За задумом автора Maglev зможе досягати потужності 1 GW. Розробник вважає, що пристрій забезпечує повне захоплення вітру, а завдяки магнітній підвісці усувається тертя. Аналогічна технологія застосована для поїздів на магнітній подушці. Також завдяки магнітній подушці не страшна ніяка швидкість вітру. MaglevTurbine (рис. 1.5) може захопити навіть міць урагану. Установка цього електрогенератора на 50-75% дешевша, ніж зведення традиційної повітряної станції такої ж потужності, а також займе менше часу і вимагатиме менше простору. Вже декілька Maglev встановлені у Китаї.



Рисунок 1.5 – Повітряний електрогенератор MaglevTurbine

Повітряний електрогенератор M.A.R.S. (Magenn Power Air Rotor System) (рис. 1.6), розроблено компанією Magenn, може підніматися у повітря на висоту до 300 м завдяки тому, що він наповнений гелієм. Його можна транспортувати у вітряні регіони та швидко розгортати [18]. Потік повітря обертає балон довкола горизонтальної осі. До балона кріпляться генератори та троси, які утримують його на місці та передають електроенергію на землю.



Рисунок 1.6 – Повітряний електрогенератор M.A.R.S.

Зазначимо, що британська компанія XCO2 використала цю ідею для створення повітряних електрогенераторів Quietrevolution, які будуть встановлені біля Букінгемського палацу (рис. 1.7). Місцеві жителі заперечували проти традиційних трилопатевих вітряків, бо вони псують зовнішній вигляд міста. Нові генератори добре вписуються у міський ландшафт. Вбудовані світлодіоди в S-подібних лопатях використовуються для створення зображень, коли обертається турбіна. Електрогенератор має висоту 5 м, а його діаметр досягає 3 м. Цікаво, якщо Quietrevolution працює при мінімальній швидкості вітру в 4,5 м/с, його японський аналог від компанії LoopWing здатний виробляти енергію при швидкості вітру в 1,6 м/с



Рисунок 1.7 – Повітряний електрогенераторів Quietrevolution.

Ще один варіант лопатей для міських повітряних електрогенераторів запропонований компанією Asia Alliance Base (рис. 1.8) [19]. На відміну від попереднього варіанту, гвинтові лопаті у цьому випадку мають дві точки опори, що відповідно робить конструкцію міцнішою та стійкішою, тому ця конструкція може витримувати більші швидкості вітру. При цьому, як стверджують розробники, спіральна структура лопатей, краще утримує енергію вітру та збільшує її.

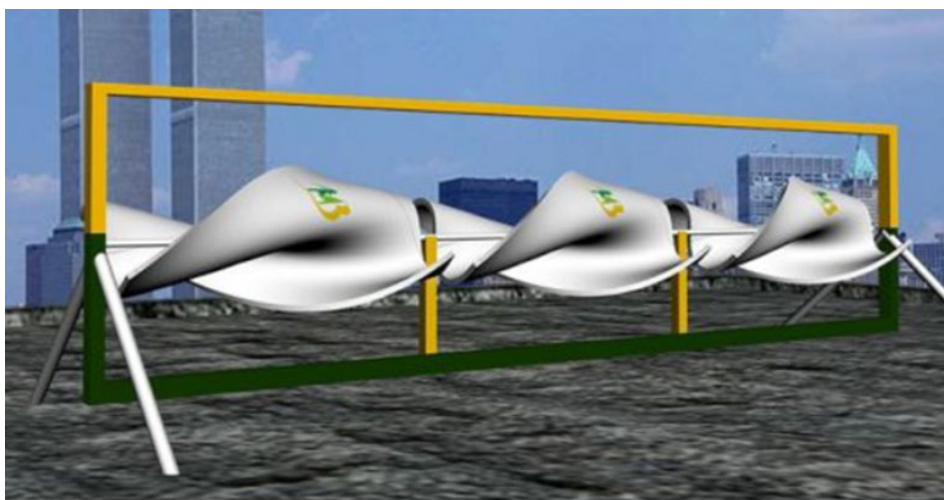


Рисунок 1.8 – Повітряний електрогенератор, запропонований Asia Alliance Base.

Міні повітряний електрогенератор Jellyfish призначений для місць, де є труднощі з доступом до електрики, оскільки його легко встановити [20]. При висоті всього 36 см він може генерувати близько 40 кВт·год на місяць. Зазначимо, що ключовою перевагою цього повітрогенератора є ціна, яка становить лише 400 доларів. Jellyfish був розроблений винахідником із Сіетлу на ім'я Чед Маглак. Під час досліджень встановлено, що на багатьох великих магістралях існує постійний потік повітря, що дозволяє виробляти електрику: рух автомобілів на великій швидкості, особливо вантажівок, буде рухати ці турбіни. Отже, при швидкості транспортного засобу 110 км/год кожна турбіна зможе виробляти 9600 кВт·год на рік. Ці повітряні електрогенератори безшумні.

Слід зазначити, що Університет штату Арізона запропонував повітряний електрогенератор Broadstar Aero Cam, розроблений авіаційним інженером Жоржем Жан Марі Дар'є. Невеликі вітрогенератори пропонується встановлювати на дахах будівель, так як така конструкція при тій же потужності, що і традиційний трилопатевий вітряк, займає набагато менше місця. Вітряк Дар'є, як правило, розташовується вертикально, але конструкція BroadstarAeroCam (рис. 1.9) має вітряки горизонтально на вертикальній щоглі, роблячи їх схожими на колеса водяного млина. Головне нововведення полягає у здатності автоматично налаштовувати висоту та кут атаки аеродинамічних лопаток, подібно до змін форми крила пугиці в польоті. Broadstar Aero Cam за невеликих розмірів має високий ККД і може працювати за будь-яких погодних умов.

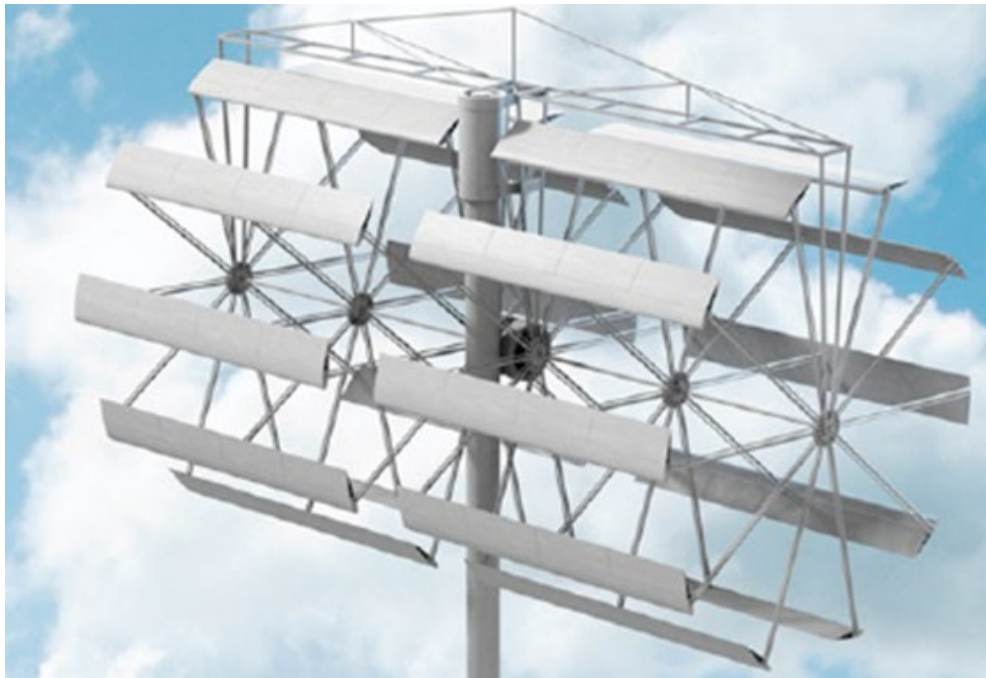


Рисунок 1.9 – Повітряний електрогенератор Broadstar Aero Cam.

V-LIM – повітряний електрогенератор, створений спеціально для того, щоб його встановлювати на дахах будинків [21]. Така конструкція є спільною розробкою дослідників з Портлендського державного університету та компанії RogueRiverWind. Зазначимо, що завдяки майже повній відсутності шуму та вібрації, його можна встановлювати будь-де. Вітряк не схильний до впливу турбулентності повітря, майже не створює шуму і вібрації. Вітряк можна екранувати від попадання птахів та тварин. Для його встановлення не потрібні висотні башти та щогли. Все це робить його придатним для встановлення на дахах будь-яких будинків.

Повітряний електрогенератор у формі повітряного змія Sky Serpent створив винахідник Даг Селсам із Каліфорнії (рис. 1.10). Розробник засумнівався, що одного гвинта достатньо для отримання максимуму енергії. Sky Serpent використовує кілька роторів, приєднаних до одного валу (повітряна гірлянда), а їх інший кінець прикріплений до повітряних куль з гелієм. Оскільки, багатороторні турбіни зіткнулися з проблемами, бо їхні ротори не ловили вітер через сусідні ротори, ротори Sky Serpent рознесені під кутом для того, щоб кожен з них входить у моду свіжий вітер.



Рисунок 1.10 – Повітряний електрогенератор Sky Serpent.

У 2003 році від Каліфорнійської енергетичної комісії винахідник отримав грант у розмірі 75000 доларів на розробку повітряного електрогенератору потужністю 3 кВт із семи роторів [21]. Завдання було успішно вирішене, і Даг Селсам продав після цього ще понад 20 таких генераторів потужністю 2 кВт.

Ще один приклад повітряних електрогенераторів для встановлення на дахах будівель – Liam F1 (рис. 1.11). Дана конструкція розроблена компанією Archimedes із Роттердама. Невеликий вітряк діаметром 1,5 м і вагою близько 100 кг легко може бути встановлений на даху будь-якої будівлі. Цей генератор може виробляти до 1800 кВтгод на рік, при цьому задовольняючи половину потреб в електроенергії середньої родини. Директор компанії стверджує, що ефективність такої турбіни досягає 80% від теоретично максимальної ефективності повітряних генераторів. Шум від такої турбіни не перевищує 45 дБ.



Рисунок 1.11 – Повітряний електрогенератор Liam F1.

Англійський винахідник Агустін Отегуро розробляє «зелені» архітектурні проекти. Так, його повітряний електрогенератор NanoVent-Skin складається з нанопроводів, які відіграють роль осей для безлічі мікроповітряних турбін і одночасно передають електроенергію (рис. 1.12) [22]. Зовнішня поверхня турбін покрита органічною фотоелектричною плівкою. Зазначена мережа живить електроенергією будинки.

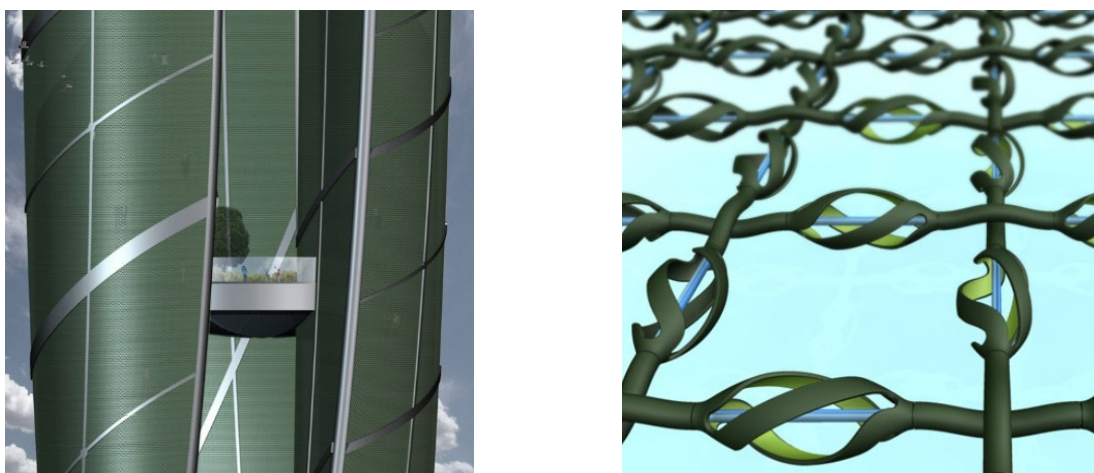


Рисунок 1.12 – Повітряний електрогенератор/

Зовні стіна NanoVent-Skin виглядає гладкою та однотонною, а зсередини видно все, що відбувається зовні. Перевага повітряного електрогенератору Helix Wind полягає в тому, що він може працювати за

будь-якого вітру. Пристрій лопат дозволяє уникнути турбулентності, а сам генератор має низький рівень шуму. На думку розробника, це безпечний для птахів генератор.

Таким чином, аналіз існуючих систем автономного енергопостачання показав, що розробники створили різноманітний арсенал повітряних комплексів, які характеризуються екологічністю, ефективністю, малим рівнем шуму та спрямовані на забезпечення електропостачанням об'єкти та райони, що розташовані у важкодоступних місцях та віддалених від центральних ліній електропередачі. Різниця між повітряними електрогенераторами складається з потужностей та мети застосування.

1.2 Класифікація систем повітряних електрогенераторів.

Повітряний електрогенератор є складним автоматизованим комплексом, який характеризується електромеханічною системою, спрямований на переведення енергії рухомих мас повітря (кінетичної) до електричної з визначеною якістю. За загальною конструкцією він складається з повітряного двигуна, робочого (машинного) відділення, опори. Необхідно зазначити, що енергію повітряного потоку перетворює у механічну безпосередньої повітряний двигун, енергія у подальшому застосовується для приводу у дію відповідних механізмів або переводиться в електричну.

За даними таблиці 1.1 можна виокремити класифікацію повітряних електрогенераторів за їх базовими характеристиками [23].

Таблиця 1.1 – Класифікація повітряних електрогенераторів за їх базовими характеристиками.

Клас повітряних генераторів	Діапазон потужностей, кВт		Діапазон діаметрів повітряного колеса, м		Діапазон швидкостей обертання повітряного колеса, об./хв.	
Дуже великі	1500	3000	70	90	20	15
	4000	5000	105	124	15	13
Великі	600	750	43	48	30	30
	900	1300	50	64	32	20
Середні	200	300	26	30	40	40
	400	500	35	40	35	30
Малі	20	60	10	15	140	92
	75	150	18	24	60	40
Дуже малі	0,025	1	0,5	2,5	2000	500
	1,5	10	3,0	9,0	500	200

Важливо зазначити, що повітряні турбіни відрізняються між собою за конструкцією, закріплюючим фундаментом, засобами встановлення безпосередньо агрегату для сприймання вітру, встановленою системою, завдяки якій відбувається передача отриманої повітряної потужності, а також особливостями монтажем та обслуговування. У процесі проектування установок та розрахунків їх потужності потрібно спиратись на його наявні номінальні параметри, а саме тип: а) навантаження; б) системи перетворення повітряної енергії для споживчого використання; в) системи акумулювання енергії.

У залежності від призначення повітряні електрогенератори постійного струму поділяють на:

– «повітряно» зарядні;

- гарантованого електропостачання споживача;
- негарантованого електропостачання.

Електричні ВЕУ змінного струму поділяють на:

- автономні;
- гібридні, що працюють паралельно з енергосистемою сумірної потужності (наприклад, з дизельною установкою);
- мережеві, які працюють паралельно з потужною енергосистемою».

Класифікуючи повітряні електрогенератори за критерієм силової аеродинамічної взаємодії лопатевої системи з потоком повітря, яке на нього набігає, слід їх поділити на наступні типи:

- «повітряні двигуни, які під час руху лопатевої системи застосовують підйомну силу, виникаючу саме на робочих елементах цієї системи (циліндрах, що обертаються, жорстких лопатях) і через це створює крутний момент;

- повітряні двигуни, які під час руху лопатевої системи застосовують розходження в аеродинамічних силах, яке виникає на різних елементах цієї системи (крилових лопатях чи будь-яких інших поверхнях), у моменти руху цих поверхонь за напрямком вітру і проти напрямку вітру, тобто розходження в аеродинамічному опорі системи» [24].

За критерієм типу повітряного двигуна виокремлюють:

- горизонтально-осьові (рис. 1.13);
- вертикально-осьові (рис. 1.14).

До першого типу відносяться еквівалентність кутової швидкості обертання повітряного двигуна та аксіальна складова вектору швидкості вітрового потоку. Другий тип визначають як перпендикулярність векторів кутової швидкості обертання повітряного двигуна та аксіальної складової вектору швидкості вітрового потоку.

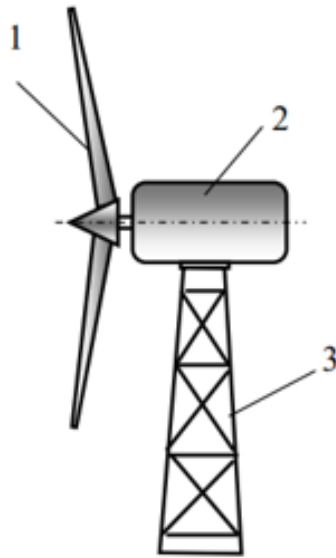


Рисунок 1.13 – Загальний вигляд повітряного електрогенератору горизонтально-осьового типу.

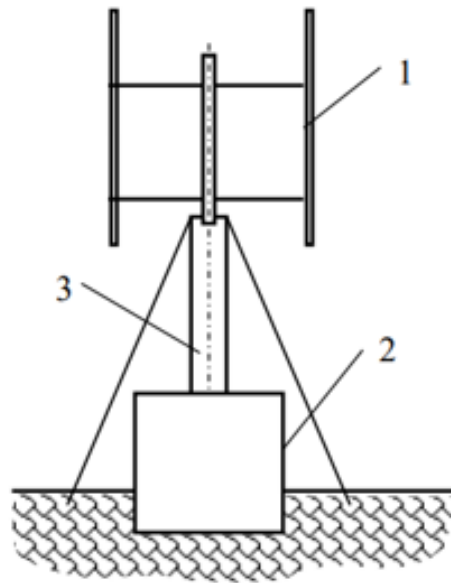


Рисунок 1.14 – Загальний вигляд повітряного електрогенератору вертикально-осьового типу.

Повітряний електрогенератор горизонтально-осьового типу великої або середньої потужності повинен мати інструмент для проведення регулювання необхідного кута лопатей ротора та відповідний механізм для орієнтації

безпосередньо турбіни [25]. Перетворювач первинного наповнення складається з двигуна та функціонує для переведення кінетичної енергії, яку надає повітря, до обертального руху ротора. При цьому завдання електрогенератору – це переведення отримуваної енергії в електричну енергію, яку мають потребляти споживачі.

Серед базових критеріїв класифікації виступає орієнтація вектору кутової швидкості обертання ротора повітряного двигуна щодо векторів швидкості повітря, що знаходиться у вільному потоці атмосфери. Відповідно до цього повітряні двигуни діляться на ортогональні і колінеарні. До останніх слід відносити ті, для яких вектори швидкості вітру і кутової швидкості обертання ротора повітряного двигуна є паралельними або антипаралельними (це горизонтально-осьовий двигун). У загальному випадку ортогональні потрібно розглядати повітряні двигуни, які передбачають, що вектори швидкості вітру і кутової швидкості обертання ротора двигуна є перпендикулярними.

Зазначимо, що є два варіанти їх поєднання:

– «вектор обертання кутової швидкості обертання ротора повітряного двигуна на перпендикулярній поверхні землі; таким повітряний двигуном є вертикально-осьовий ротор, який також має назву «карусельного»;

– вектор обертання кутової швидкості обертання ротора повітряного двигуна на паралельній поверхні землі; такий двигун має назву «барабанний» [26].

Повітряний двигун, який між векторами швидкості вітру і кутової швидкості обертання ротора має гострий кут, тобто від 0 до 90°, та може мати назву «похило осьовий».

Такі установки мають протипагу однієї лопаті повітряного електрогенератора, яка служить для балансування механізму. До переваг таких роторів можна віднести більш високу швидкість обертання, отже, можливо використовувати електрогенератори, які розраховані на високі

оберти обертання [27]. Також така установка має невелику вартість її виробництва за рахунок застосування тільки однієї лопаті.

Відтак, порівнюючи повітряний електрогенератор горизонтально-осьового типу та вертикально-осьового типу слід відокремити наступні позиції:

- висока продуктивність функціонування;
- можливість проводити пуск самостійно, без застосування допоміжного приводу, що відбувається завдяки зміні градусу кута лопаті;
- більшого показника коефіцієнту щодо використання повітряної енергії;
- значного збільшення показника коефіцієнту швидкохідності, що призводить до зростання частоти обертання двигуна, що при цьому дозволяє знизити показники масогабаритності усього обладнання установки, разом з тим вони потребують розміщення високо над землею;
- відсутність потреби здійснювати кутову передачу моменту обертю.

До недоліків можна зарахувати потребу в пристрої, який буде проводити орієнтацію на напрямки вітру.

Порівнюючи вертикально-осьовий тип повітряних електрогенераторів з пропелерним горизонтально-осьовим окреслимо деякі переваги:

- функціонування незалежно від напрямку повітря, що не потребує проведення орієнтування турбіни у цій сфері;
- наявність вертикального валу передбачає розміщення спеціального обладнання біля фундаменту установки, що мінімізує відповідні вимоги до жорсткості та міцності опори, при цьому не обмежуючі необхідні масогабаритні показники обладнання, а також покращує технічне обслуговування та їх ремонт;
- можливістю проведення закріплення в декількох місцях лопатей до ротора, таким чином, знижуючи вимоги по жорсткості і міцності лопаті;

– меншим значенням окружної швидкості лопаті за менших значень коефіцієнта швидкохідності;

– виготовлення лопатей є достатньо простим виробництвом.

До числа їх недоліків можна додати: наявність меншого коефіцієнту під час використання повітряної енергії; зменшену швидкохідність.

Вважаємо доцільним розглянути використання об'ємного профілю лопатевої системи, що спрямована на зростання ефективності переведення енергії повітря, зокрема захоплюваний об'єм повітря (рис. 1.15) [28]. Ключове завдання цього види – підвищення коефіцієнт корисної дії повітряного електрогенератора з можливістю її роботи при поривах вітру від 3,5 м/с.

Зазначимо, передусім, що вона має складну систему лопатей, що дозволяє: а) двічі ефективніше перетворювати енергію повітря, з початку на передній частині лопатей, потім на задній; б) суттєво зменшити навантаження на значно віддалені частини лопатей, викликані силою опору повітря, що таким чином спрямовано на підвищення надійності комплексу; в) суттєво понизити рівень вібрації лопатей, за рахунок відсутності вільного кінця лопаті та кріплення підстави лопаті у двох точках, що тим самим знижує шумові впливи на навколишнє середовище та відповідно підвищує надійність установки.

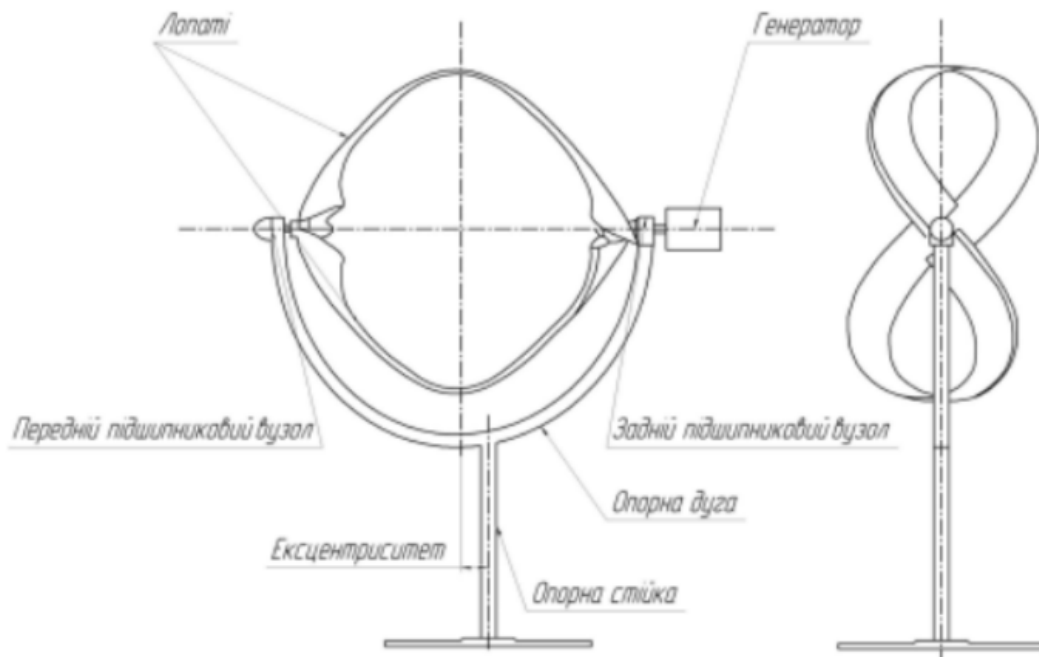
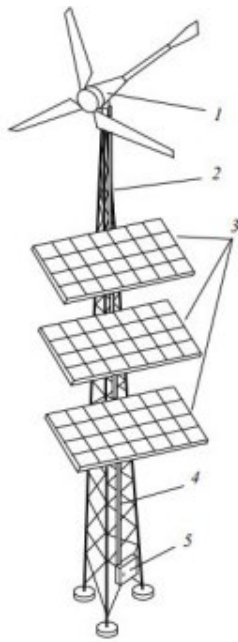


Рисунок 1.15 – Загальний вид повітряного електрогенератора з лопатями об’ємного профілю

Цікавими прикладами сучасних розробок є також мобільні комбіновані електростанції, що мають потужність до 10 кВт. Загалом вони представляють собою комбінацію трьох складових (рис. 1.16): повітряні електро-, сонячні фотоелектричні установки та дизельні електростанції. До базових переваги таких конструкції слід відносити: 1) великий період функціонування; 2) можливість оперативного встановлення та закріплення комплексу у важкодоступних місцях та віддалених районах; 3) суттєве зниження паливних витрат та відповідно зниження собівартість електроенергії на таких особливих об’єктах; 4) автономна роботи значно триваліша; 5) цифрові технології спрощують управління режимами роботи та проведення дистанційного моніторингу.



1 –повітряний агрегат; 2 –мачта; 3 – сонячні батареї; 4 – кабельний канал; 5 – розподільчий щит.

Рисунок 1.16 –Комбінована електростанція.

Повітряний електрогенератор і сонячні фотоелектричні комплекси передбачено використовувати у спільній системі із застосуванням мінігідроелектростанцій. Таким чином, залежно від наявності потоку повітря, сонячних потоків чи напору води формується єдине джерело електроенергії. Зокрема, у процесі затишшя повітря вироблення енергії відбувається сонячною фотоелектричною установкою або мінігідроелектростанцією. Відтак, це дозволяє покращити їх експлуатаційно-технічні характеристики, а також вирішити питання дефіциту енергоресурсів.

Таким чином, встановлено, що повітряний електрогенератор є складним автоматизованим комплексом, який характеризується електромеханічною системою, спрямований на переведення енергії рухомих мас повітря (кінетичної) до електричної з визначеною якістю. Сучасні технології дозволили розробити повітряні електрогенеруючі комплекси різної потужності та якості виконання для забезпечення потреб споживачів електричної енергії. Визначено, що основними є повітряні електрогенератори горизонтально-осьового типу та вертикально-осьового типу.

Висновки за розділом 1

Аналіз першого розділу показав, що вітер є джерелом доступної та чистої відновлюваної енергії, в результаті використання якої відсутні шкідливі викиди в атмосферу. З цього виходить, що для екології набагато краще використовувати енергію вітру, ніж традиційні джерела електропостачання.

Виявлено, що до найперших повітряних турбін слід відносити турбіни горизонтально-осьового типу, які мають назву «перський повітряк». А вже перша аеродинамічна повітряна турбіна з вертикальною віссю була розроблена та запатентована у Франції Жоржем Дар'ї у 1927 році.

Встановлено, що сучасні повітряні електрогенератори складаються з окремих багаточисленних турбін, які спеціально об'єднані в цілісну мережу. Так, повітряні електрогенератори, що розташовані у берегів водних об'єктів, виступають у якості недорогого джерела електроенергії, при цьому розглядаються як альтернатива традиційним невідновним джерелам. Зазначений вид повітряних електрогенераторів доцільно використовувати у віддалених або ізольованих районах.

З'ясовано, що для енергетичних систем автономного електропостачання поширеною є проблема використання надмірної потужності, яка може бути вирішена завдяки проведенню експортних та імпорتنих заходів щодо направлення електроенергії до відповідних сусідніх районів; зміни рівня води у водосховищах, на яких працюють гідроелектростанції; переведення електричної потужності на механічну енергію; навіть обмеження для користувачів у споживанні тощо. При цьому, використання локальних повітряних електрогенераторів дозволяє названу проблему вирішити, оскільки турбіни приєднуються до станції в якості цілісного комплексу завдяки відповідній системі збору потужностей.

Сучасні технології дозволили розробити повітряні електрогенеруючі комплекси різної потужності та якості виконання для забезпечення потреб

споживачів електричної енергії. Визначено, що основними є повітряні електрогенератори горизонтально-осьового типу та вертикально-осьового типу. За загальною конструкцією він складається з повітряного двигуна, робочого (машинного) відділення, опори. Необхідно зазначити, що енергію повітряного потоку перетворює у механічну безпосередньо повітряний двигун, енергія у подальшому застосовується для приводу у дію відповідних механізмів або переводиться в електричну.

РОЗДІЛ 2.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВИХОРОВОГО ЕФЕКТУ ТА ПРИРОДНОЇ ТЯГИ.

Кількість енергії, отриманої від альтернативних джерел енергії, щорічно зростає у відсотковому відношенні до всього енергозабезпечення країн світу, зокрема за рахунок встановлення нетрадиційних енергоресурсів. Однак, на сьогоднішній день однією з важливих економічних та енергетичних проблем України є енергозабезпечення віддалених від центральної енергосистеми районів міст та селищ. Вирішенням цього завдання є встановлення автономних електростанцій, генерація електричної енергії яких відбувається за рахунок природних явищ.

Прототипом запропонованого рішення є вітрогенератор напівзакритого типу, принцип дії якого заснований на перетворенні кінетичної енергії вітру (явище виникнення природної тяги) в електричну та вихорового ефекту.

2.1 Аналіз теоретичних досліджень виникнення вихорового ефекту та його експериментальне вивчення.

Аналітичне обґрунтування фізичної сутності вихорового ефекту полягає у гіпотетичному припущенні перетворення виникаючого у вихідному перерізі вихрової труби вільного вихру у вимушений вихор. У більшості робіт [1 - 4] це явище пояснюється перетворенням вихору, яке здійснюється за рахунок в'язкості й теплопровідності газового потоку, що спірально рухається вздовж труби, та строго описується системою рівнянь руху, суцільності, енергії та стану. Для ламінарного вісесиметричного повітряного потоку в циліндричних координатах система рівнянь має наступний вигляд [5]:

рівняння руху:

$$v_r \frac{dv_r}{dr} + v_z \frac{dv_z}{dz} - \frac{v_\tau^2}{r} = -\frac{1}{\sigma} \frac{dp}{dr} + v \left(\frac{d^2 v_r}{dr^2} + \frac{d^2 v_r}{dz^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_r}{dr} - \frac{v_r}{r^2} \right); \quad (2.1)$$

$$v_r \frac{dv_\tau}{dr} + v_z \frac{dv_\tau}{dz} + v_r \frac{v_\tau}{r} = v \left(\frac{d^2 v_\tau}{dr^2} + \frac{d^2 v_\tau}{dz^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_\tau}{dr} - \frac{v_\tau}{r^2} \right); \quad (2.2)$$

$$v_r \frac{dv_z}{dr} + v_z \frac{dv_z}{dz} = -\frac{1}{\sigma} \frac{dp}{dz} + v \left(\frac{d^2 v_z}{dr^2} + \frac{d^2 v_z}{dz^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_z}{dr} \right). \quad (2.3)$$

Рівняння суцільності:

$$\frac{d(\sigma \cdot r \cdot v_r)}{dr} + \frac{d(\sigma \cdot r \cdot v_z)}{dz} = 0. \quad (2.4)$$

Рівняння енергії:

$$\begin{aligned} \sigma \cdot c_p \left(v_r \frac{dT}{dr} + v_z \frac{dT}{dz} \right) &= v_r \frac{dp}{dr} + v_z \frac{dp}{dz} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \cdot \lambda \cdot \frac{dT}{dr} \right) + \\ &+ \frac{d}{dz} \left(\lambda \frac{dT}{dz} \right) + \mu' \left\{ 2 \left[\left(\frac{dv_r}{dr} \right)^2 + \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{dv_z}{dz} \right)^2 \right] + \left(\frac{dv_r}{dz} + \frac{dv_z}{dr} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{dv_\tau}{dr} - \frac{v_\tau}{r} \right)^2 \right\} - \frac{2\mu'}{3} \left(\frac{dv_r}{dr} + \frac{v_r}{r} - \frac{dv_z}{dz} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Рівняння стану:

$$p = g \cdot \sigma \cdot R \cdot T \quad (2.6)$$

За зазначеними рівняннями руху повітряного потоку (2.1, 2.2, 2.3), його щільності (2.4), енергії (2.5) та стану (2.6), приймаючи до уваги умови адіабатичного процесу, прилипання повітряного потоку до стінок труби циліндричної форми, знаходимо рішення, яке описує виникнення явища енергетичного розподілення за умов перетворення повітряного потоку.

Дослідження [6] було спрямоване на радіальний розподіл швидкості повітряного потоку та його статичної температури у кінцевому перерізі труби циліндричної форми, аналіз результатів якого підтвердив теорію розподілу повної температури у кінцевому перерізі, як функцію швидкості проходження газу крізь тангенціальні сопла та діаметру отвору діафрагми.

На рис. 2.1 схематично зображені процеси повітряного потоку, які відбуваються у вихровій трубі. Газодинамічні дослідження стверджують, що після проходження крізь тангенціальні сопла закручений повітряний потік розповсюджується вздовж радіусу до поки статичний тиск на його внутрішній межі не зрівняється за параметрами з тиском газу, який заповнює приосьову область, створюючи рух газового потоку, наближеному до потенціального, тобто вільному вихору з радіальним розподілом тангенціальної швидкості (2.7):

$$v_{\tau} \cdot r = const. \quad (2.7)$$

Систему рівнянь фізичного опису вихрового руху повітряного потоку у момент формування вільного вихору можна спростити та представити наступним чином (2.8 – 2.11) за рахунок прийняття осьової складової швидкості рівної нулю. Теплопровідність та в'язкість змінюють свої параметри лише за наявності виникнення градієнтів температури та швидкості, але для обраного моменту цими показниками можна знехтувати.

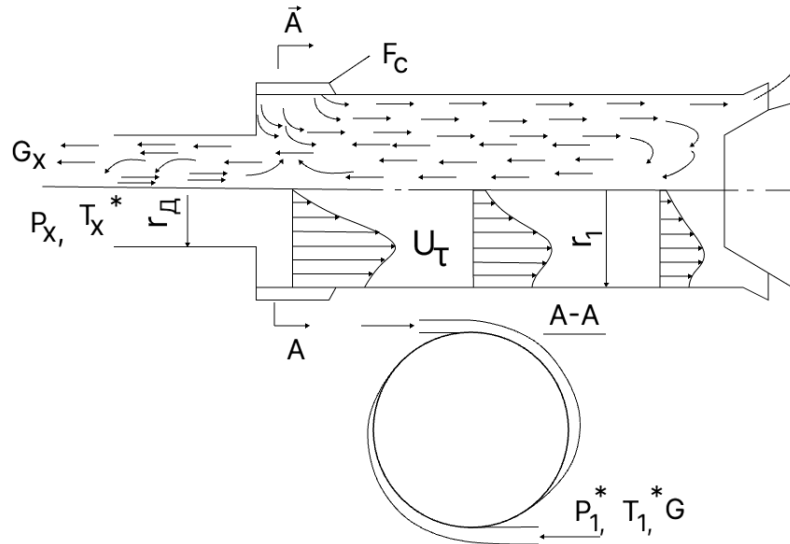


Рисунок 2.1 – Схема руху повітряного потоку у вихровій трубі

$$v_r \frac{dv_r}{dr} - \frac{v_t^2}{r} = -\frac{1}{\sigma} \frac{dp}{dr}; \quad (2.8)$$

$$v_r \frac{dv_t}{dr} + v_r \frac{v_t}{r} = 0; \quad (2.9)$$

$$\frac{d(\sigma \cdot r \cdot v_r)}{dr} = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{dT}{dr} = \frac{1}{\sigma \cdot c_p} \frac{dp}{dr} \quad (2.11)$$

Зазначені вище системи рівнянь опису фізичного процесу вихрового повітряного потоку разом з рівнянням (2.6) розподіляє швидкість вільного вихору (2.7), адіабатне розподілення статичної температури вздовж радіусу:

$$T \cdot p^{\frac{1-k}{k}} = C_2 \quad (2.12)$$

та постійність повної температури вздовж радіусу:

$$T^* = T + \frac{v_\tau^2 + v_r^2}{2g \cdot c_p} = const. \quad (2.13)$$

На відміну від температурного параметра в'язкість не впливає на розподіл швидкості вільного вихрового потоку. Доказом цього є наведені нижче рівняння (2.14 – 2.15) руху в'язкого нестислого газу за умов нехтування параметру стислості.

$$v_r \frac{dv_r}{dr} - \frac{v_\tau^2}{r} = -\frac{1}{\sigma} \frac{dp}{dr} + v \left(\frac{d^2 v_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_r}{dr} - \frac{v_r}{r^2} \right); \quad (2.14)$$

$$v_r \frac{dv_\tau}{dr} + v_r \frac{v_\tau}{r} = v \left(\frac{d^2 v_\tau}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv_\tau}{dr} - \frac{v_\tau}{r^2} \right). \quad (2.15)$$

Вищезазначені рівняння руху в'язкого нестислого газу разом з рівнянням (2.10) дають рішення у вигляді (2.7), що дозволяє зробити висновки відносно відсутності впливу стислості та в'язкості у радіально-круговому потоці закону потенціальної течії – закону вільного вихору. Теплопровідність також не може призвести до деформації профілю швидкості.

За відсутності теплового обміну через бокові поверхні потоки маси та енергії в стаціонарній радіально-круговій течії крізь будь-який кільцевий переріз довільного радіусу залишаються незмінними і відповідають своїм значенням на вході, отже повна ентальпія та відповідно їй повна температура газу незмінні вздовж всього радіусу.

Вільний вихор є стійким до сил внутрішнього тертя і не руйнується ними [6]. Дійсно, нехтуючи параметрами радіальної та осьової складової швидкості, вираз для зрізуючих напруг від сил тертя можна записати наступним чином:

$$\tau = \mu' \left(\frac{dv_\tau}{dr} - \frac{v_\tau}{r} \right). \quad (2.16)$$

Для випадку вільного вихору з урахуванням виразу (2.7) момент, створений на одиниці довжини кільцевого перерізу у довільному радіусі вихору, становить:

$$M_\tau = 2 \cdot 3,14 \cdot \tau \cdot r^2 = -4 \cdot 3,14 \cdot \mu' \cdot C_1 = const. \quad (2.17)$$

Значення моменту залишається постійним вздовж радіусу, тобто на кожний кільцевий елемент вихору з двох сторін діють рівні та протилежно спрямовані моменти, які не можуть ні прискорити, ні сповільнити рух елемента, тобто не можуть деформувати профіль окружної швидкості вільного вихору. Вихор може почати руйнуватись тільки на своїх радіальних межах, де у результаті тертя о стінку та взаємодію з приосьовими елементами порушується рівновага моментів.

Сили в'язкості забезпечують підтримування постійності моменту вздовж радіуса вихору, тому усі внесені ззовні обурення призводять лише до зниження загального рівня швидкості при збереженні закону їх розподілення вздовж радіуса. Це експериментально підтверджено встановленим [7,8] фактом збереження вільного вихору на доволі великій протяжності вихрової зони труби.

При повільному зниженні рівня окружних швидкостей під час руху вихору вздовж труби зменшується радіальний градієнт статичного тиску у ньому, і вихор поширюється до осі. Зменшення радіального градієнту створює осьовий градієнт тиску, який змушує елементи газу, що потрапили в приосьову область, змінити свою осьову швидкість на зворотну і рухатись до соплового перерізу.

Процес переходу до осової області характеризується інтенсивною турбулізацією елементів газу [9,10] і за рахунок високої турбулентної в'язкості створюється зворотній потік, що обертається за законом обертання твердого тіла, тобто вимушеного вихору з постійною кутовою швидкістю:

$$\omega = \frac{v_{\tau}}{r} = const. \quad (2.18)$$

Зворотній приосьовий потік, який виник, при своєму русі закручується все більш інтенсивним вільним вихором.

2.2 Теоретичний аеродинамічний розрахунок вихрового руху повітряних мас.

Аеродинамічний розрахунок переміщення повітряних мас ґрунтується на наступних завданнях:

- розрахунок і експериментальне дослідження розмірів поперечних перерізів усіх ділянок каналу, які забезпечували б переміщення необхідної кількості повітря;
- визначення сумарного опору, що виникає під час руху повітря в повітряному просторі каналу.

Розрахунок базується на загальних законах гідроаеромеханіки, а повітряні маси розглядаються як нестислива рідина. Це цілком припустимо, оскільки величина тиску у системах вентиляції повітря незначна. Для цього необхідно порівняти умови роботи трубопроводу, функція якого – переміщення води, яка є практично нестисловою, і повітропроводу. Коефіцієнт стисливості води, тобто величина, що показує, на яку частку ΔV зменшується початковий об'єм V при збільшенні тиску на 1 атм, може бути прийнятий рівним значенню $5 \cdot 10^{-5}$. Тому при збільшенні тиску в трубопроводі на 10 атм відношення $\Delta V/V$ для води складе $5 \cdot 10^{-4}$ або 0,05%.

Для повітря коефіцієнт стисливості приблизно в 1000 разів менший, ніж 10 атм, тому відношення $\Delta V/V$ для повітряних мас, що переміщуються повітропроводом, складе також 0,05%.

2.2.1 Втрати тиску повітряних мас при подоланні місцевого опору та опору тертя.

Під час руху повітря в повітропроводах тиск витрачається на тертя повітря о поверхні стінок повітропроводу і на подолання місцевих опорів. Опори тертя безперервні та спостерігаються по всій довжині повітропроводів. Місцеві опори виникають у таких місцях повітропроводів, де відбуваються раптові зміни швидкості повітряного потоку за величиною або за напрямком. За своєю фізичною природою ці опориє втратами енергії на непружні удари повітря.

Місцеві опори можна поділити на дві групи: у першій групі значення параметру витрати повітря до і після опору залишається постійним, в другій групі він змінюється.

Вираз для визначення втрат тиску повітряних мас при подоланні опору тертя можна отримати розглядаючи рівняння Бернуллі. Для двох перерізів повітропроводу (рис. 2.2) рівняння Бернуллі:

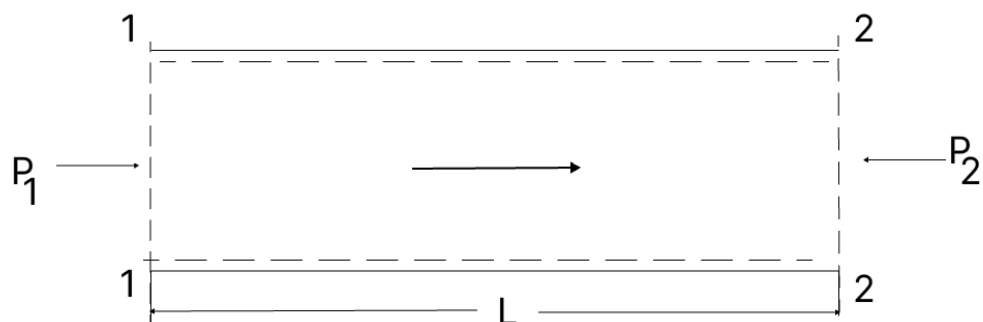


Рисунок 2.2 – Канал проходження повітряних мас.

$$P + \gamma z + \frac{\gamma \omega^2}{2g} = const \quad (2.19)$$

або може мати наступний вигляд:

$$P_1 + \gamma z_1 + \frac{\gamma \omega_1^2}{2g} = P_2 + \gamma z_2 + \frac{\gamma \omega_2^2}{2g} + \Delta p \quad (2.20)$$

де P_1, P_2 – тиск в областях перерізів 1-1 та 2-2;

z_1, z_2 – п'єзометричні відмітки центрів перерізів 1-1, 2-2;

Δp – втрати тиску на подолання тертя при русі повітряних мас від перерізу 1-1 до перерізу 2-2.

Для повітропроводу круглого перерізу, периметр якого становить $U = \pi d$ та $F = \pi d^2/4$, величина питомих втрат тиску на тертя становить:

$$R = 4\psi \frac{1}{d} \cdot \frac{\gamma \omega^2}{2g} \quad (2.21)$$

Величина $4\psi = \lambda$ – коефіцієнт опору тертя; для турбулентного режиму руху повітряних мас встановлюється лише експериментально. Існує декілька емпіричних формул, які охоплюють три можливі області турбулентного режиму:

- область гідравлічно-гладкої внутрішньої поверхні повітропроводів, яка характеризується тим, що товщина ламінарного граничного шару, який рухається безпосередньо біля поверхні, більше величини виступів нерівностей поверхні;

- перехідна область, в якій виступи нерівностей частково виходять за межі шару і потрапляють у ядро потоку повітряних мас;

- область нерівностей внутрішньої поверхні повітропроводів; товщина граничного шару у цій області менше виступів нерівностей, які потрапляють до ядра потоку повітряних мас.

Для області гідравлічно-гладкої внутрішньої поверхні коефіцієнт опору тертя не залежить від нерівностей внутрішньої поверхні повітропроводу і є функцією тільки від числа Рейнольдса, тобто $\lambda = f(Re)$.

Для визначення λ в цій області застосовуємо вираз:

$$\lambda = 0,316 \operatorname{Re}^{-0,25} \quad (2.22)$$

атакож формулу Г.А. Мурина [11]:

$$\lambda = \frac{1,01}{(\lg \operatorname{Re})^{2,5}} \quad (2.23)$$

Питомі витрати тиску на тертя в області режиму потоку повітряних мас, за якого внутрішня поверхня повітропроводу може вважатись гідравлічно-гладкою, пропорційні швидкості в ступені 1,75, тобто $R = a_1 \omega^{1,75}$.

При визначенні коефіцієнту опору тертя у перехідній області необхідно враховувати його залежність від числа Re та від величини відносної нерівності $\varepsilon = k/d$ (де k – абсолютна шорсткість), тобто $\lambda = f(\operatorname{Re}, \varepsilon)$. Одна із запропонованих формул Б.Н. Лобаєвим [12] має наступний вигляд:

$$\lambda = \frac{1,42}{\left(\lg \frac{\operatorname{Re}}{\varepsilon}\right)^2} \quad (2.24)$$

Якщо підставити замість Re його значення та виразити швидкість через витрату повітря та площу його поперечного перерізу, отримаємо:

$$\lambda = \frac{1,42}{\left(\lg 1,274 \frac{L}{kv}\right)^2} \quad (2.25)$$

В цій області турбулентного режиму, де на рух повітря впливає лише нерівність внутрішньої поверхні стінок повітропроводу, коефіцієнт опору тертя не залежить від числа Re і є лише функцією відносно шорсткості, тобто $\lambda = f(\varepsilon)$. Для визначення λ широко використовується вираз:

$$\lambda = \frac{1,42}{\left(1,74 + 2 \lg \frac{d}{2k}\right)^2} \quad (2.26)$$

Питомі втрати тиску на тертя у цій області турбулентного режиму пропорційні квадрату швидкості руху повітряних мас $R = a_2 \omega^2$.

Перехід від однієї області турбулентного режиму до другої залежить від значення критерію Рейнольдса та відносної шорсткості.

2.2.2 Місцеві опори в повітропроводах.

Місцеві опори виникають у місцях порушення нормального руху повітряного потоку. Ці порушення пов'язані з відривом потоку від поверхні стінок повітропроводу і вихроутворенням у місцях зміни конфігурації повітропроводу та зустрічі перешкод. Найбільш поширені порушення повітряного потоку пов'язані з розширенням, звуженням та вигином потоку, протіканням потоку крізь запірні або дросельні пристрої, розгалуженням одного потоку на декілька або злиття декількох потоків в один. У всіх перерахованих випадках відбувається перебудова поля швидкостей і утворення на межі повітряного потоку вихорів. На це витрачається певна кількість енергії, тому рух повітряного потоку через місцеві опори завжди пов'язаний з втратою тиску.

Втрати тиску на подолання місцевих опорів спостерігається вздовж всього повітропроводу, тому вони не можуть бути відокремлені від втрат тиску на тертя, однак з метою зручності аеродинамічного розрахунку місцеві опори вважаються зосередженими в одному перерізі повітропроводу.

Теоретично розрахувати втрати тиску на місцеві опори можливо лише для вельми обмеженого числа випадків, на практиці їх зазвичай визначають експериментально; при цьому виявляється, що втрати тиску пропорційні квадрату швидкості. Це дає підставу виражати місцеві опори в одиницях

динамічного тиску повітряного потоку в повітропроводі і застосовувати для розрахунку місцевих опорів наступну формулу:

$$\Delta p_{\text{мс}} = \zeta \frac{\rho \omega^2}{2g} \quad (2.27)$$

де ζ - коефіцієнт місцевого опору.

Коефіцієнт ζ при турбулентному режимі руху залежить від геометричної форми місцевого опору і не залежить від числа Рейнольдса.

2.2.2.1 Прямий вхід повітря в повітропровід.

Аеродинамічне відображення руху повітря в повітропроводі поблизу вхідного перерізу (рис. 2.3) залежить від двох чинників: від відносної товщини стінки вхідної кромки повітропроводу $\delta_{\text{ст}}/d$ і від того, закладений повітропровід в огорожу чи ні. Якщо повітропровід закладено в огорожу, аеродинаміка потоку повітря на вході визначається відносною відстанню вхідної кромки до поверхні огорожі b_3/d .

Під час входу повітря в повітропровід під впливом відцентрових сил відбувається відрив потоку від внутрішньої поверхні стінки і на деякій відстані від вхідного перерізу утворюється найменший переріз потоку, або його стиснення. Потім потік знову розширюється до повного перерізу повітропроводу. Відрив потоку від стінок повітропроводу спричиняє вихроутворення, що є основною причиною втрат тиску повітряного потоку на вході. Найбільше значення коефіцієнта місцевого опору прямого входу спостерігається, якщо кромка стінки повітропроводу повністю гостра ($\delta_{\text{ст}}/d=0$), і при нескінченно великій відстані вхідного перерізу від поверхні огорожі ($b_3/d=\infty$). У цьому випадку $\zeta = 1$, а відносна відстань до найбільш стисненого перерізу, що дорівнює $d_{\text{п}} = 0,5d$, становить $b_c = 0,4d$.

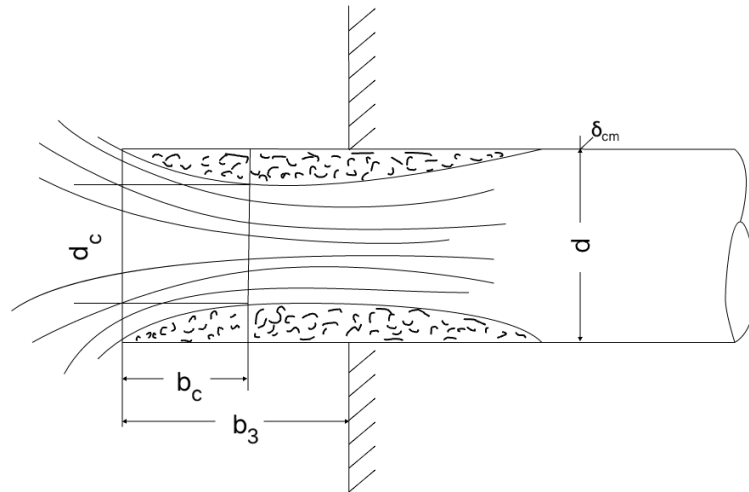


Рисунок 2.3 – Аеродинамічне відображення руху повітря поблизу вхідного перерізу

Якщо вхідна кромка стінки повітропроводу не надто тонка або закруглена, коефіцієнт ζ різко зменшується. Так, вже при $\delta_{cm}/d = 0,05$, $\zeta = 0,5$, при закругленні кромки радіусом $r = 0,1d$ $\zeta = 0,1$, при $r = 0,2d$ $\zeta = 0,04$.

2.2.2.2 Вхід повітря в повітропровід через конфузур.

Щоб зменшити опір входу, спричинений раптовим звуженням потоку і вихроутворенням, улаштовують плавний перехід від більшого перерізу до меншого у вигляді конфузора (рис. 2.4). Коефіцієнт місцевого опору такого входу залежить від кута звуження конфузора α і його відносної довжини b_k/d . Кожній довжині конфузора відповідає таке значення кута звуження, за якого коефіцієнт опору ζ набуває мінімального значення. Практично можна вважати, що для досить широкого діапазону $b_k/d = 0,1 \div 1,0$ оптимальні значення кута звуження знаходяться у межах $40-60^\circ$. За таких значень кута і відносної довжини $b_k/d = 0,2$ коефіцієнт опору виходить рівним $0,2$.

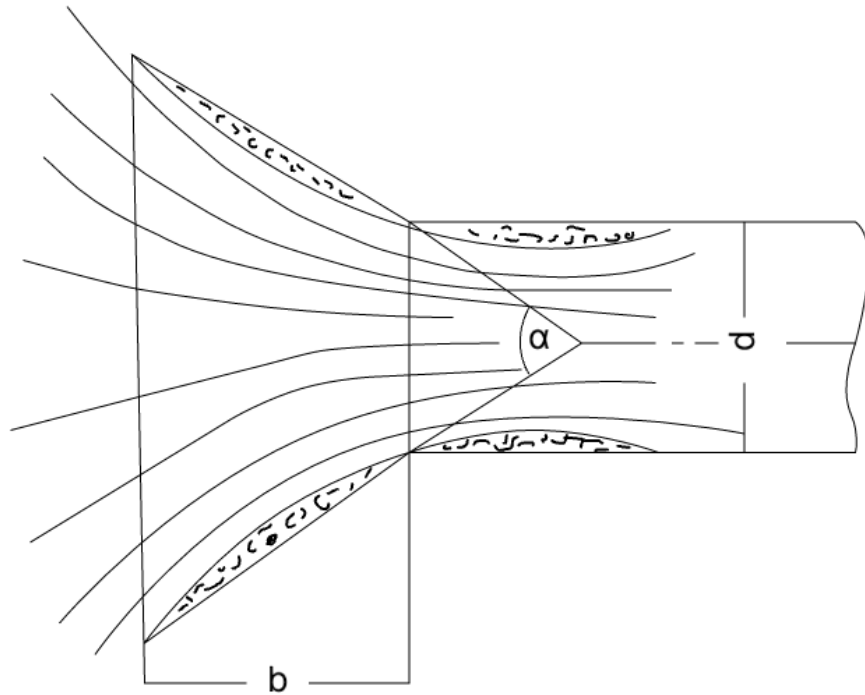


Рисунок 2.4 – Вхід повітря в повітропровід через конфузур.

2.2.2.3 Поступове розширення повітропроводу у вигляді дифузора

Дифузор (рис. 2.5) встановлюється для тих самих цілей, що й конфузур – забезпечити плавний перехід від меншого перерізу до більшого і цим самим знизити втрати тиску. При плавному збільшенні перерізу зростає турбулентність потоку, але величина середньої швидкості зменшується.

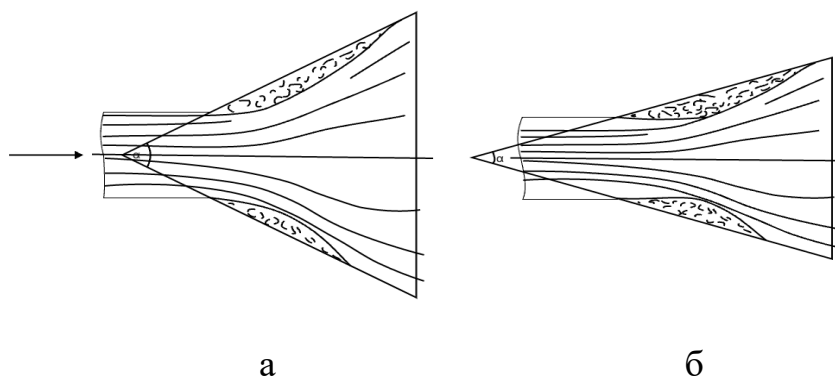


Рисунок 2.5 – Поступове розширення повітропроводу у вигляді дифузора (а – з великим кутом розширення, б – з малим кутом розширення).

За результатами досліджень і теоретичних розрахунків можна зробити висновок, що при збільшенні до певних меж кут розширення ($\alpha < 8 \div 10^\circ$) загальний коефіцієнт опору дифузора, приведений до швидкості у вузькому (початковому) перерізі, менший, ніж для такої самої довжини відрізка повітропроводу, що має площу поперечного перерізу, яка дорівнює площі початкового перерізу дифузора. Починаючи з деякого значення, подальше збільшення значення кута розширення спричиняє значне зростання коефіцієнта опору дифузора, який стає у багато разів більшим, ніж опір відрізка повітропроводу тієї ж довжини. Збільшення коефіцієнта опору дифузора пояснюється не стільки посиленням турбулентності потоку, скільки відривом граничного шару від стінок дифузора і пов'язаним і з цим вихроутворенням. Коефіцієнт опору дифузора залежить від таких факторів, як кут розширення α , ступінь розширення, форма поперечного перерізу, умови входу, режим потоку повітряних мас (число Re).

Оскільки для багатьох випадків (особливо за малих значень кутів розширення) втрати тиску на тертя становлять значну частку в сумарних втратах тиску, коефіцієнт місцевого опору дифузора розраховується як сума $\zeta = \zeta_{\text{розш}} + \zeta_{\text{тр}}$, в якій $\zeta_{\text{розш}}$ є коефіцієнтом місцевого опору через розширення, а за допомогою $\zeta_{\text{тр}}$ оцінюються втрати тиску на опір тертя.

І. Є. Ідельчик [13] запропонував розраховувати втрати при поступовому розширенні за формулою раптового розширення (2.28), враховуючи коефіцієнти пом'якшення або повноти удару ($\varphi_{\text{розш}}$), які визначаються через вираз:

$$\varphi_{\text{розш}} = k_{\varphi} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{1,25} \quad (2.28)$$

де: k_{φ} – коефіцієнт, який залежить від форми дифузора.

Коефіцієнт опору тертя дифузора круглого перерізу виражається через наступну формулу:

$$\zeta_{\text{тр}} = \frac{\lambda}{8 \sin \frac{\alpha}{2}} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right). \quad (2.29)$$

2.3 Природна тяга. Чинники, що впливають на кількісну величину параметрів природної тяги. Методи вимірювання та розрахунки

Природна тяга – це рух повітря по повітропроводу (каналі) під впливом природних чинників: різниці питомої ваги повітря, дії вітру, капежу. Різниця тисків при природній тязі називається депресією природної тяги. Енергія, яку отримує одиниця об'єму повітря від джерел, що спричиняють явище природної тяги, називається депресією природної тяги.

Основною причиною виникнення природної тяги є різниця питомої ваги повітря у повітропроводі (каналі). Прикладом цього є наведений приклад теоретичного обґрунтування явища природної тяги (рис. 2.6). Два вертикальних повітропроводу заповнені повітрям різної питомої ваги γ_1 та γ_2 та розділені суцільною перекладкою.

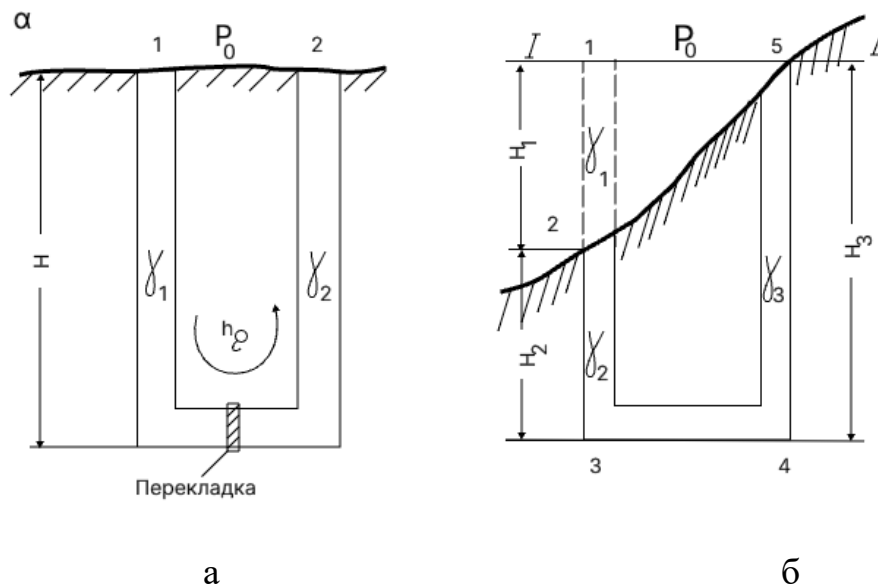


Рисунок 2.6 – Схема до визначення природної тяги у двох сполучних каналах повітропроводу за однакових (а) і різних (б) позначках їх висоти.

За умов, що $\gamma_1 > \gamma_2$, визначимо аеростатичний тиск на перекладку, що розділяє повітропроводи.

Тиск на перекладку зі сторони першого каналу дорівнює:

$$P_1 = P_0 + H \cdot \gamma_1 \quad (2.30)$$

а зі сторони другого каналу:

$$P_2 = P_0 + H \cdot \gamma_2 \quad (2.31)$$

де P_0 – атмосферний тиск;

H – висота каналу.

Різниця тисків становитиме:

$$P_1 - P_2 = H \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) \quad (2.32)$$

Якщо прибрати перекладку, що розділяє канали, то повітря почне циркулювати під дією різниці тисків, тобто з'явиться природна тяга, значення параметру депресії якої буде дорівнювати:

$$h_{п.т.} = H \cdot (\gamma_1 - \gamma_2) \quad (2.33)$$

При різних значеннях висоти повітропроводів необхідно порівнювати тиск каналів повітря однакової висоти. Так, для схеми, що зображена на рис. 2.6, б, депресію природної тяги можна виразити у наступному вигляді:

$$h_{п.т.} = H_1 \cdot \gamma_1 + H_2 \cdot \gamma_2 - H_3 \cdot \gamma_3 \quad (2.34)$$

Таким чином, ефект природної тяги створюється, якщо середня питома вага повітря у двох сполучених вертикальних або похилих повітропроводів різна. При цьому рух повітря відбувається від каналу з більшою питомою вагою до каналу з меншою питомою вагою повітря. Такий самий напрямок має і депресія природної тяги.

Схема створення природної тяги в єдиному вертикальному або похилому каналі повітропроводу, за умов змішання повітряних мас між собою одночасно на декількох горизонтах, зображена на (рис. 2.7). У таких випадках на кожному горизонті діє своя природна тяга, яка визначається питомою вагою повітря на ділянках, розташованих вище цього горизонту. Депресія природної тяги залежить від висоти повітропроводу H і питомої ваги повітряних мас на різній зазначеній висоті визначення. Залежно від умов депресія природної тяги може досягати 20-25 % депресії звичайного вентилятора.

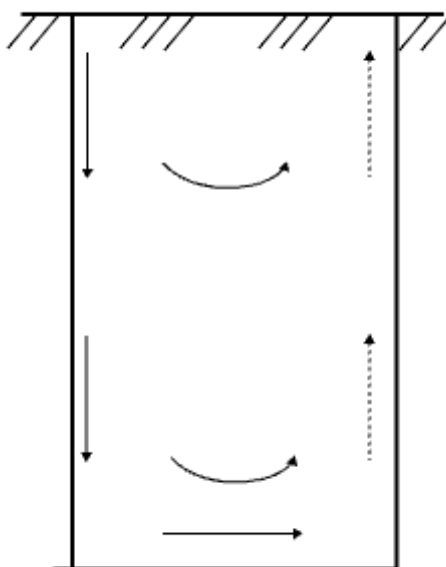


Рисунок 2.7 – Схема до визначення депресії природної тяги при одночасному змішанню повітряних мас між собою на різних горизонтах.

2.3.1 Математичне уявлення параметрів депресії природної тяги.

Особливістю прояву природної тяги є те, що енергія різниці гідростатичних тисків передається потоку повітряних мас не в якійсь одній точці, а по всій його довжині, у результаті чого, депресію природної тяги не можна виміряти в якомусь одному місці потоку, тому теоретично представити кількісний розрахунок даного параметру можливо наступними декількома способами.

2.3.1.1 Вимірювання параметрів природної тяги V-подібним рідинним депресіометром або мікроманометром.

Якщо до обох сторін перекладки, що розділяє між собою канали повітропроводу, під'єднати депресіометр, то останній виміряє депресію природної тяги h_c (рис. 2.8, а). При цьому, місце розташування перекладки у системі повітропроводу не має значення. Так, при розташуванні перекладки у системі повітропроводу у положенні А (рис. 2.8, б), депресія природної тяги визначається за формулою:

$$h_{п.т.1} = H(\gamma_1 - \gamma_2) \quad (2.35)$$

Якщо перекладка розташована у положенні В (рис. 2.8, б), тиск на її верхню частину поверхні становитиме:

$$P_{в.ч.} = P_0 + H_{1-2}\gamma_1 \quad (2.36)$$

а тиск на нижню частину поверхні:

$$P_{н.ч.} = P_0 + H\gamma_2 - H_{2-3}\gamma_1 \quad (2.37)$$

Отже різниця тисків, а тому і депресія природної тяги, за умов розташування перекладки у положенні В (рис. 2.8, б), становитиме:

$$h_{п.т.2} = (P_0 + H_{1-2}\gamma_1) - (P_0 + H\gamma_2 - H_{2-3}\gamma_1) = H(\gamma_1 - \gamma_2) \quad (2.38)$$

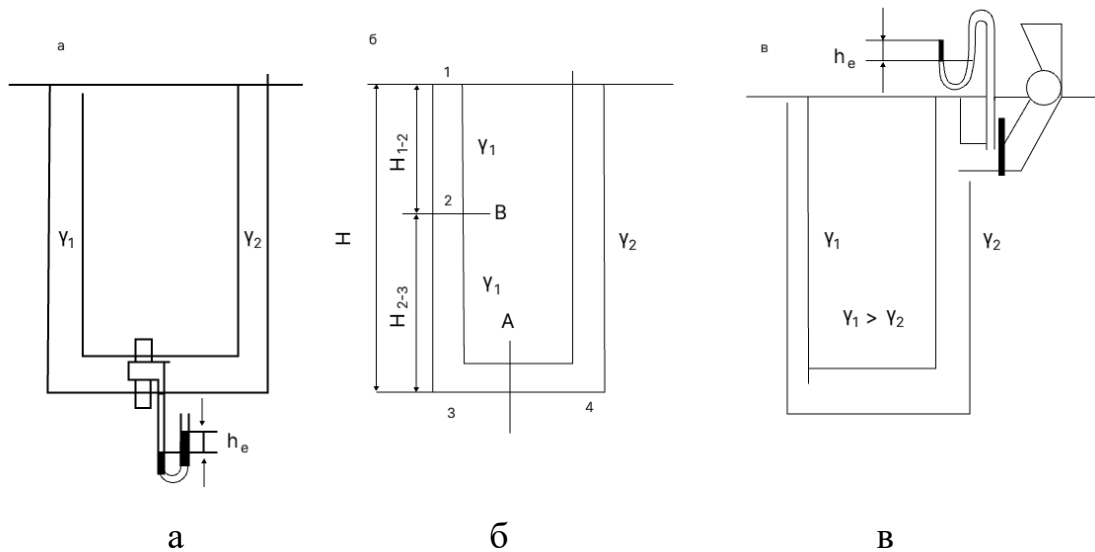


Рисунок 2.8 – Схема до вимірювання депресії природної тяги з використанням перекладки, яка розділяє канали повітропроводу.

Для вимірювання депресії також може бути використана заслінка вентилятора (рис. 2.8, в). Для цього зупиняється вентилятор, заслінкою повністю перекривається канал вентилятора, закривається вихід каналу повітропроводу, одне коліно депресіометра з'єднується з каналом вентилятора зі сторони повітропроводу, а друге відкривається в атмосферу. У цьому разі депресіометр вимірює депресію природної тяги. Вимірювання необхідно проводити швидко, щоб об'ємна вага повітря в повітропроводі не встигла змінитися.

Якщо напрямок природної тяги збігається з напрямком дії вентилятора, то її депресія вимірюється наступним чином. Відкривається отвір каналу повітропроводу і паралельно зупиняється вентилятор, після чого отвір поступово закривається. За деякого проміжного положення ляд, що перекривають отвір каналу, рух повітря в повітропроводі припиниться, і депресія вентилятора дорівнюватиме значенню депресії природної тяги.

Депресію природної тяги можна визначити напівемпіричним методом. Він ґрунтується на тому, що значення параметрів повітряної тяги в повітропроводі за працюючого і зупиненого вентилятора описується наступними рівняннями:

$$h_{\text{в}} \pm h_{\text{п.т.}} = R_0 \cdot Q_{\text{п.в.}}^2 \quad (2.39)$$

$$h_{\text{п.т.}} = R_{\text{с}} \cdot Q_{\text{з.в.}}^2 \quad (2.40)$$

$h_{\text{в}}$ – депресія вентилятора;

$h_{\text{с}}$ – депресія природної тяги;

R_0 – аеродинамічний опір в повітропроводі;

$Q_{\text{п}}$ – витрата повітря у висхідному потоці повітря у повітропроводі при працюючому вентиляторі;

$Q_{\text{з.в.}}$ – витрата повітря у висхідному потоці повітря у повітропроводі при зупиненому вентиляторі.

2.3.1.2 Гідростатичний метод розрахунку параметрів депресії природної тяги.

У каналі повітропроводу вертикальної висоти H виокремимо елемент dz , який обмежений перерізами 1-1 та 2-2, так щоб у межах визначеного елемента об'ємна вага повітря становила $\gamma = \text{const}$ (рис. 2.9). Тоді приріст гідростатичного тиску на висоті dz виражатиметься у вигляді:

$$dp = \gamma dz \quad (2.41)$$

Завдання полягає у визначенні тиску P_1 або у збільшенні параметрів тиску ΔP на висоті H при граничних умовах: $z = 0, P = P_0, z = H, P = P_1$. Для вирішення рівняння 2.41 необхідно знати залежності $\gamma(z)$ або $\gamma(P)$. Зазвичай

знаходять залежності об'ємної ваги від тиску, використавши рівняння газового стану:

$$pV = R_{\Gamma}T \quad (2.42)$$

де $V = \frac{1}{\gamma}$ - питомий об'єм повітря, м³/кг;

R_{Γ} – газова постійна, що дорівнює для невологого (сухого) повітря 29,27 м/град;

T – абсолютна температура, К;

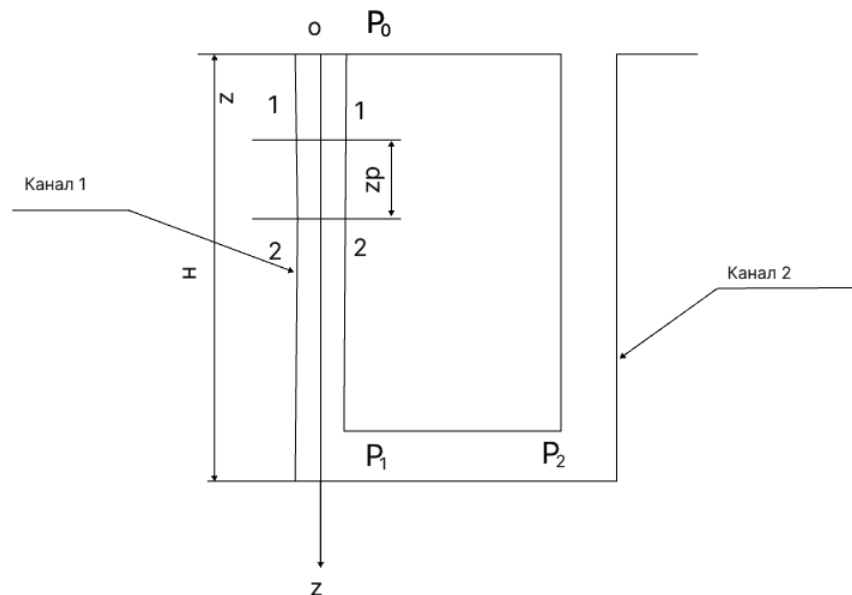


Рисунок 2.9 – Схема до розрахунку збільшення тиску.

Із рівності (2.42) отримаємо:

$$\gamma = \frac{p}{RT} \quad (2.43)$$

Рівняння (2.41), враховуючи рівність (2.43), буде мати наступний вигляд:

$$\frac{dp}{p} = \frac{dz}{RT} \quad (2.44)$$

Замінюючи з деяким наближенням у рівнянні (2.44) T на T_{cp}^1 – середню температуру повітря в каналі №1 повітропроводу у межах $z=0$ до $z=H$ та інтегруючи від P_0 до P_1 і від 0 до H , отримаємо:

$$\ln \frac{P_1}{P_0} = \frac{H}{RT_{cp}^1} \quad (2.45)$$

Із рівності (2.45) визначаємо тиск P_1 на висоті H :

$$P_1 = P_0 e^{\frac{H}{RT_{cp}^1}} \quad (2.46)$$

Збільшення тиску у каналі №1 повітропроводу буде дорівнювати:

$$\Delta P_1 = P_1 - P_0 = P_0 \left(e^{\frac{H}{RT_{cp}^1}} - 1 \right) \quad (2.47)$$

Аналогічним способом розраховуємо тиск у точці 2 га висоті H і збільшенні тиску ΔP_2 .

$$P_2 = P_0 e^{\frac{H}{RT_{cp}^2}} \quad (2.48)$$

$$\Delta P_2 = P_2 - P_0 = P_0 \left(e^{\frac{H}{RT_{cp}^2}} - 1 \right) \quad (2.49)$$

де T_{cp}^2 – середню температуру повітря в каналі №2 повітропроводу у межах $z=0$ до $z=H$, К.

Для розрахунку депресії природної тяги необхідно за формулами (2.47) (2.49) визначити тиск P_1 і P_2 у нижніх частинах сполучених стовпів повітря рівної висоти H , що відлічується від рівня рівного атмосферного тиску. Для схеми, зображеної на рис.2.9:

$$h_e = P_1 - P_2 \quad (2.50)$$

або враховуючи рівності (2.47) та (2.49)

$$h_e = \Delta P_1 - \Delta P_2 \quad (2.51)$$

Із рівняння (2.51) слідує, що депресія природної тяги дорівнює різниці збільшення тиску у двох сполучених каналах повітря.

Підставивши значення ΔP_1 і ΔP_2 із рівностей (2.46) та (2.48) у рівність (2.51) отримаємо:

$$h_e = P_0 \left(e^{\frac{H}{RT_{cp}^1}} - e^{\frac{H}{RT_{cp}^2}} \right). \quad (2.52)$$

2.4 Вплив природної тяги на роботу вентилятора.

Депресія природної тяги є позитивною, якщо вона діє в тому самому напрямку, що й вентилятор, і негативною, якщо їхня дія протилежна. Характеристика природної тяги в системі координат (Q, h) зображується прямою, паралельною до осі Q (рис. 2.10). Сумарна характеристика вентилятора і природної тяги визначатиметься деякою узагальненою характеристикою, одержуваною шляхом алгебраїчного підсумовування їхніх депресій за постійної витрати повітря (рис. 2.10, криві 3 і 4).

Кількість повітря, що надходить у повітропровід, визначається абсцисою точки перетину сумарної характеристики вентилятора і природної тяги та характеристики повітропроводу (точки a, b, c). Залежно від знака h_e , тобто від напрямку дії природної тяги, вона може як допомагати роботі вентилятора ($Q_1 > Q_0$) так і ускладнювати її ($Q_1 < Q_0$).

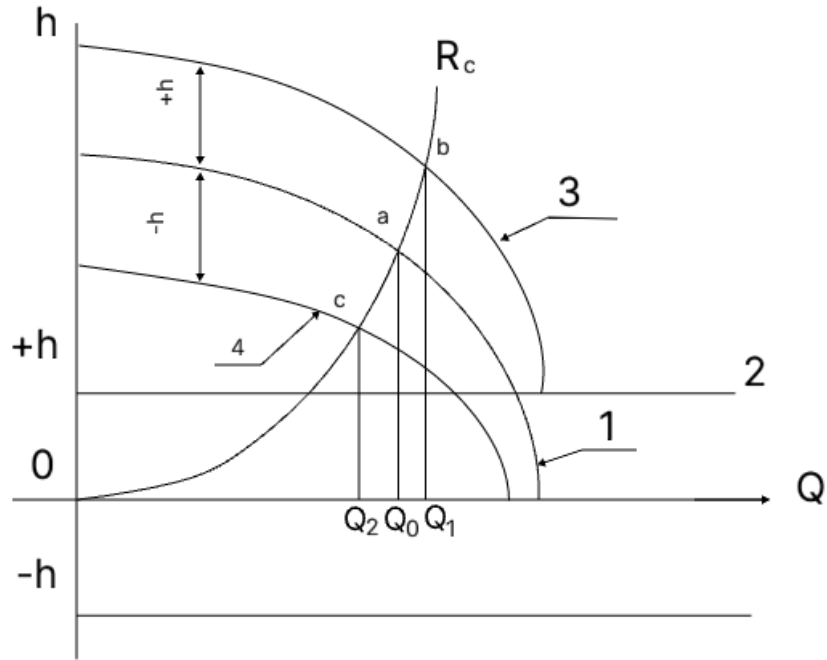


Рисунок 2.10 – Спільна робота вентилятора та природної тяги

У загальному випадку депресія вентилятора визначається за формулою:

$$h_B = h_0 \pm h_e \quad (2.53)$$

де h_0 – депресія, яка витрачається на подолання усіх опорів руху повітря у повітропроводі.

Із рівняння (2.53) можна зробити висновок, що за позитивної природної тяги ($h_e > 0$) депресія вентилятора може бути зменшена на величину h_e .

Висновки за розділом 2

У другому розділі представлено математичне дослідження фізичних процесів вихрового ефекту та природної тяги; описані конструктивні особливості розташування повітропроводу задля підвищення параметрів швидкості та направлення повітряних мас у каналах.

Виявлено, що аеродинамічні характеристики повітряних мас, які переміщуються каналами повітропроводу, залежать як від конструктивних особливостей повітропроводу, так і від зовнішніх факторів (тиску, температури, вологості повітря). Аналізуючи фізичні процеси повітряних мас, можна зробити висновок, що кінетична енергія повітря має найвищий енергетичний показник за умов ізоляції повітряного потоку від зовнішніх факторів.

Теоретичні дослідження різних форм повітропроводів для збільшення швидкості повітря і його спрямування, показали, що використання конструктивних особливостей у вигляді конфузора, зменшує втрати тиску при плавному звуженні, а також підвищує показник швидкості та упорядковує рух повітряних мас, змінюючи ламінарний потік у турбулентний.

РОЗДІЛ 3

ПОВІТРЯНИЙ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОР НАПІВЗАКРИТОГО ТИПУ

Повітряний електрогенератор напівзакритого типу належить до техніки автономного виробництва електроенергії і може бути використаний для електрозабезпечення будь-яких об'єктів, які віддалені від мереж і джерел традиційного виробництва електроенергії.

Не дивлячись на досить потужне впровадження в експлуатацію відкритих лопатевих вітряків у всьому світі для отримання «чистої» електричної енергії від дії природного явища «вітру» пошуки більш надійних, а головне більш незалежних від зовнішніх факторів впливу і більш економічно ефективних пристроїв тривають. Запропонований пристрій автономного забезпечення електричною енергією базується на ефектах «природної тяги» та «вихроутворення», які встановлюється у будь-яких вертикальних трубах, в основі яких виконані отвори.

3.1 Початковий варіант проєктування «Повітряного електрогенератору напівзакритого типу».

Повітряний електрогенератор напівзакритого типу на початковому етапі проєктування складався з циліндричної вертикальної труби (рис. 3.1, 1), з внутрішньої сторони якої були передбачені гвинтоподібні треки (рис. 3.1, 2) для утворення вихороподібного руху повітряних мас зі збільшенням швидкості, на верхній рамі закріплений всмоктувальний конфузор-прискорювач (рис. 3.1, 3), з якого прискорений повітряний потік потрапляє через переріз входу потоку (рис. 3.1, 5) від внутрішнього підсилювача (рис. 3.1, 3) на вертикально розміщений «ротор Оніпка» (рис. 3.1, 4) з вершиною конічного корпусу направленою доверху, шоста позиція (рис. 3.1, 6) демонструє переріз виходу основного потоку з вежі 1 (рис. 3.1, 1); вал «ротора Оніпка» (рис. 3.1, 7) через муфту (рис. 3.1, 8) з'єднаний з електрогенератором (рис. 3.1, 9), що розташований на нижній рамі разом з

нижнім направляючим відбивачем; 10 позиція відображає фундамент повітряного генератора напівзакритого типу.

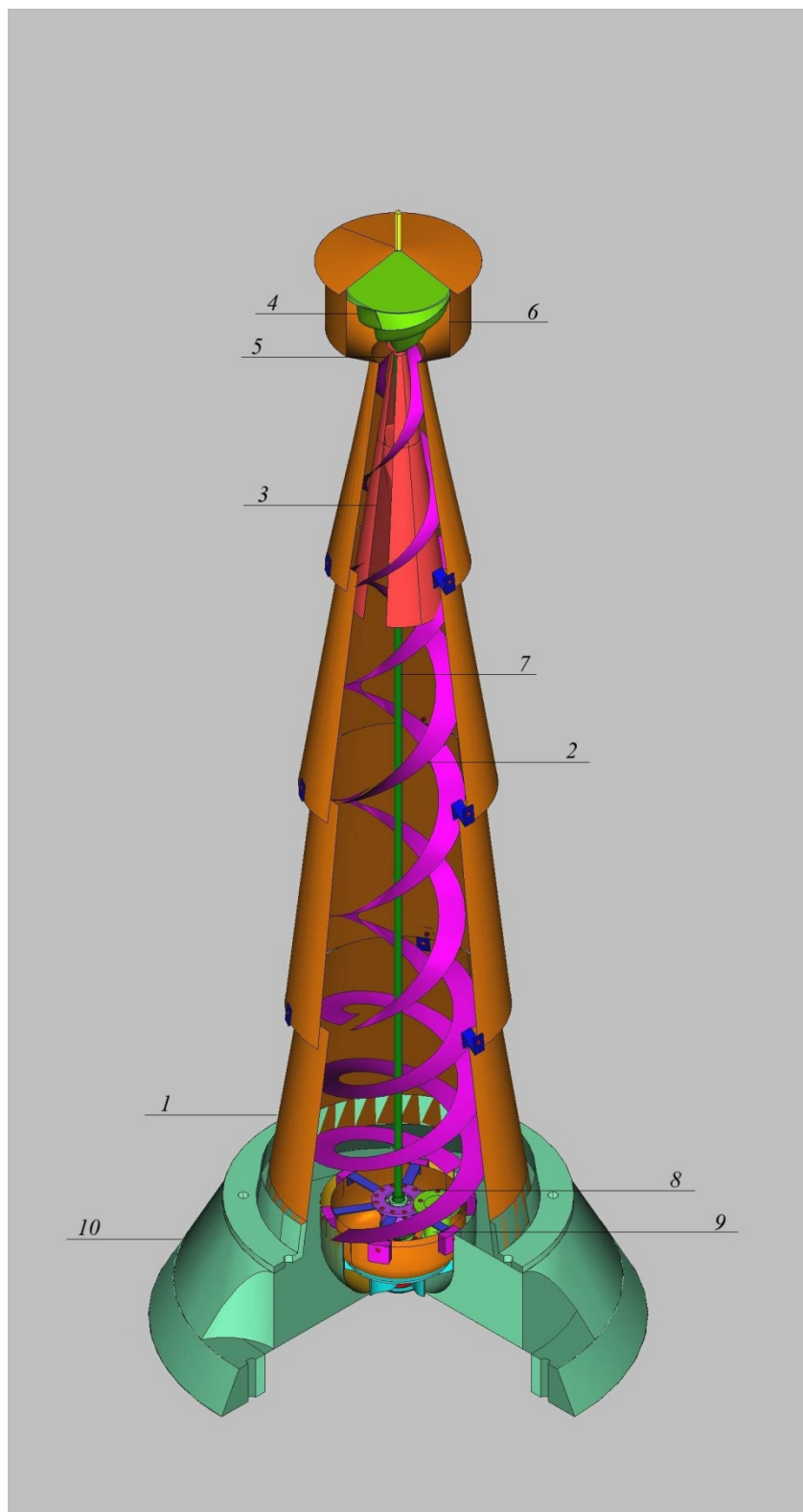


Рис. 3.1 – Перша варіація повітряного електрогенератору напівзакритого типу.

3.1.1 Аналіз технічних характеристик «ротора Оніпка».

У запропонованому повітряному пристрої генерації електричної енергії у якості турбіни використаний винахід українського вченого Олексія Федоровича Оніпка – «ротор Оніпка». На рис. 3.1.1 зображено креслення «ротора Оніпка», де навколо конусоподібного корпусу 1 розташована спіралеподібна лопать з боковими поверхнями 3 та 4, які утворюють у місці їх дотику вершину 5.

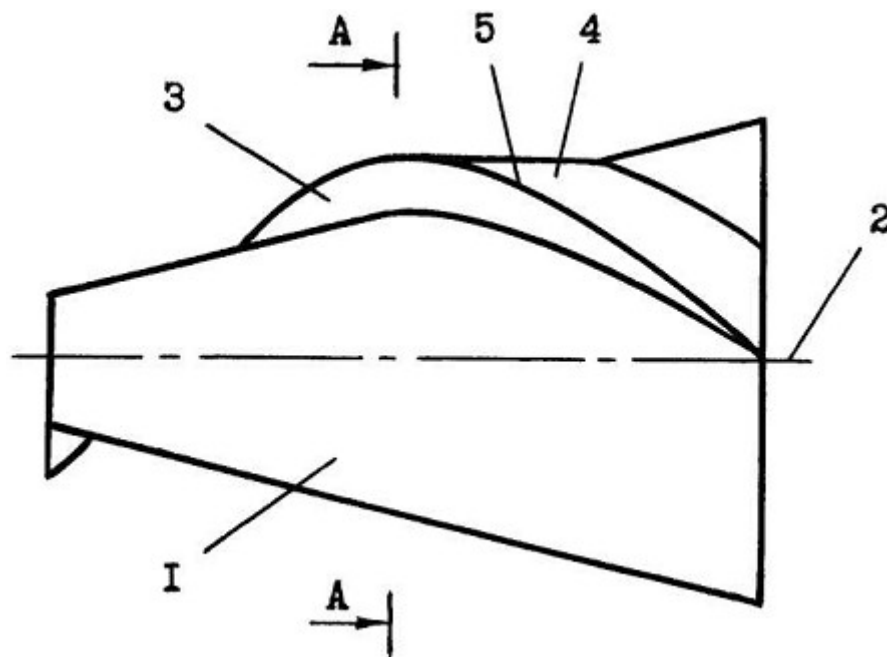


Рис.3.2 – Схематичне зображення «ротора Оніпка».

На відміну від традиційних вітрових турбін, де застосовують різні лопаті, у даному випадку вчений запропонував використовувати об'ємні спіралі, які мають різний діаметр і можуть встановлюватися на різній висоті. Висока продуктивність обумовлена «природною» нестандартною формою внутротурбіни, яка здатна генерувати електричну енергію навіть при невеликих швидкостях повітряних мас – від 0,3 м/с, у той час звичайні вітрові генератори за даних умов залишаються бездіяльні.

Характеристика вітрового «ротора Оніпка»:

- охоплює широкий діапазон потужностей від 50 до 10 000 Вт;

- пристрій пристосований до різкої зміни швидкості і напрямку повітряних мас;
- шумове забруднення незначне, тому може бути встановлений поблизу помешкань;
- високий коефіцієнт перетворення кінетичної енергії вітру в механічну, а після – в електричну;
- відмінною рисою, окрім використання ефекту підйомної сили лопаті, додатково використовується енергія тиску повітря;
- аеродинамічні характеристики робочої поверхні турбіни значно перевершують ефективну площу класичної лопаті аналогічного діаметру;
- турбіна має широкий спектр матеріалів, з яких виготовляються її складові частини: метал, композит, пластмаса.

На рис. 3.3 зображена 3-D модель «ротора Оніпка», яка виконана у програмі «Solidworks».

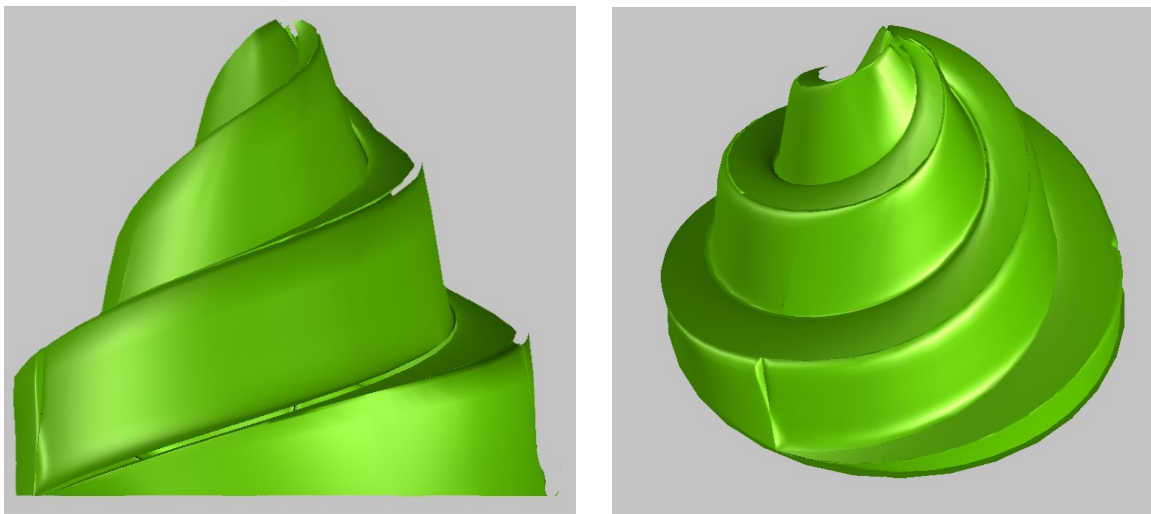


Рис. 3.3 – 3-D модель «ротора Оніпка».

3.1.2 Конструкційні особливості та технічні характеристики ротору «біляче колесо».

У запропонованому повітряному пристрої генерації електроенергії також можна використати турбіну у вигляді «білячого колеса» (рис. 3.4).

Основна функція турбіни полягає в перетворенні кінетичної енергії рухомого потоку повітря в механічну енергію обертання. Основним елементом турбіни є ротор, який являє собою комплекс пластмасових лопатей, що з'єднані з валом, який за допомогою приводу пов'язаний з іншими елементами двигуна.

Коли повітря надходить у вхідний отвір турбіни, воно потрапляє на лопаті ротора, при цьому повітряний потік піддається впливу сили тертя і тиску, що призводить до обертання ротора. Швидкість обертання ротора залежить від швидкості та потужності потоку повітря.



Рис.3.4 – Ротор «біляче колесо».

3.1.3 Конструкційні рішення підвищення аеродинамічних параметрів повітряного потоку.

Головною умовою працездатності заявленого пристрою є залежність:

$$P(r, z) + \frac{\rho V_{z(\text{вих})}^2}{2} \geq p_{\text{атм}} \quad (3.1)$$

за умов, що вся енергія потоку з компонентами швидкості V_{ϕ} повністю перейде у корисну роботу, а величина $P(r,z)$ – тиск за ротором енергетичного пристрою. Залежність (3.1) виконується за умов створення вихороподібного повітряного потоку у спеціальному профілі вертикальної площини, в середині якого формується смерчеподібний потік, спрямований до центральної осьової зони ротора. Рух повітряних мас у пристрої розглядається як суцільний, який прискорюється до верхньої точки осі ротора.

3.1.3.1 Конструктивні особливості корпусу запропонованого пристрою генерації електричної енергії.

Для постійної орієнтації повітряних мас та стабілізації їх величини, які залежать від природно-техногенних факторів та процесів розриву суцільності за рахунок місцевих опорів, запропоновано використання конусоподібного чотирьохярусного корпусу. Повітряний потік, видозмінюючи свій рух у вихороподібний, спрямовується до центрального конфузору, збільшуючи швидкість за рахунок звуження каналу. За аналітичним дослідженням запропонованої моделі, максимальна величина прискорення повітряного потоку складала 32% на виході установки без монтажу центрального конфузора та гвинтоподібних треків. Математичне дослідження повітряного потоку у запропонованій моделі корпусу установки представлено на рис. 3.5. 3-D модель запропонованого корпусу представлена на рис. 3.6.

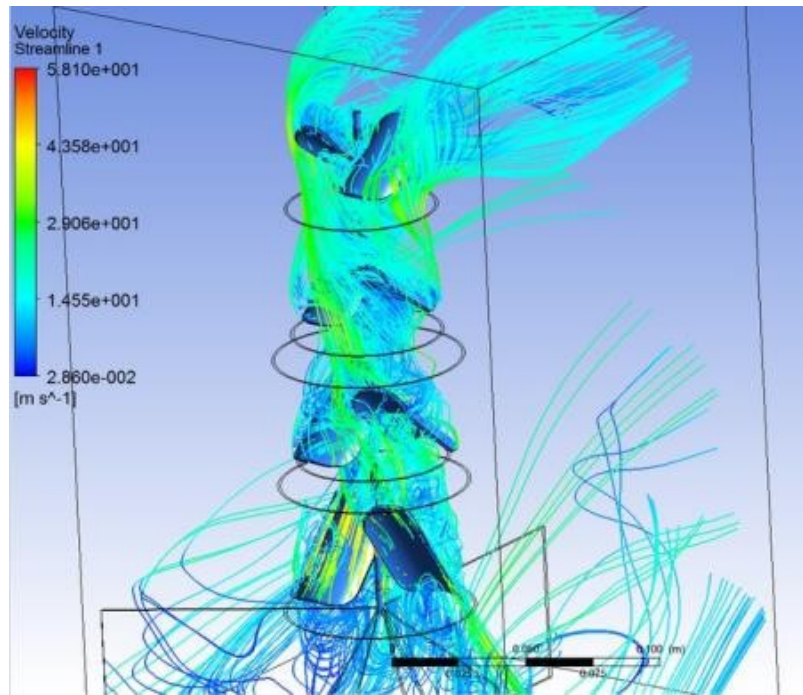


Рис. 3.5 – Аналіз повітряного потоку у конусоподібному вертикальному корпусі.

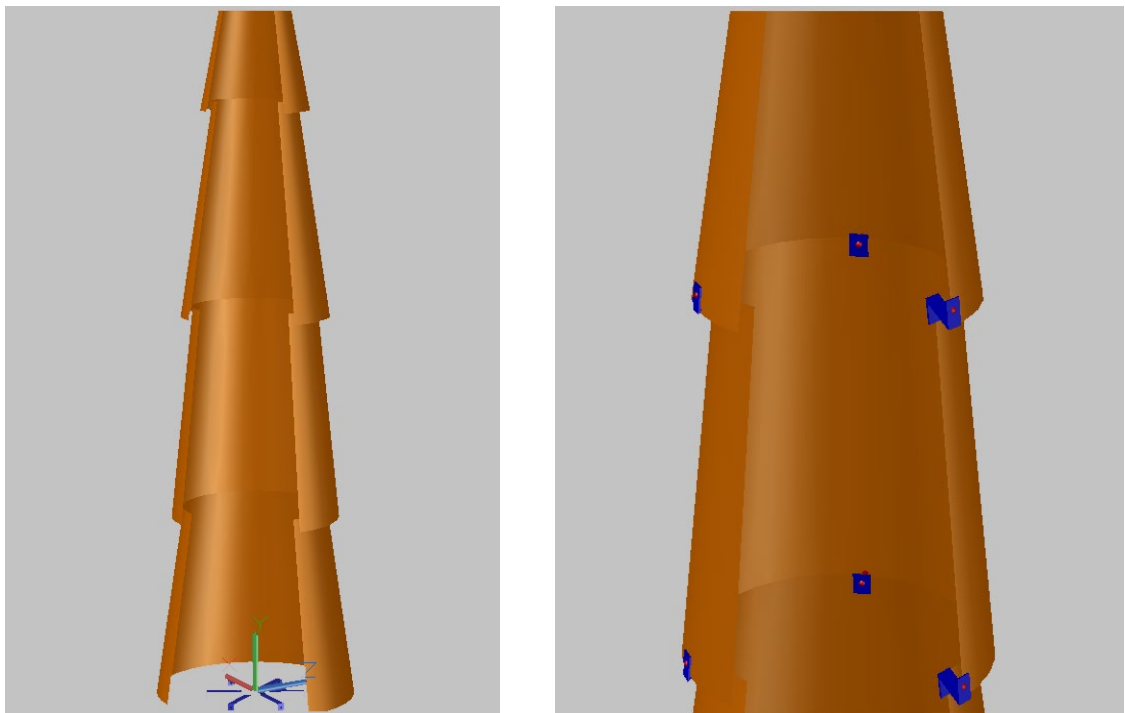


Рис. 3.6 – 3-D модель запропонованого корпусу.

3.1.3.2 Гвинтоподібні треки.

Для підвищення аеродинамічних характеристик спрямованого повітряного потоку можна використати гвинтоподібні треки (рис. 3.4). Вони вмонтовуються вздовж внутрішньої обтічної сторони корпусу повітряного генератору для зміщення (прискорення) повітряних мас доверху, перетворюючи ламінарну течію повітря у турбулентну, тим самим створюючи траєкторію руху повітряного потоку подібну до природних смерчів. Головне завдання треків – спрямування повітряного потоку до центрального конфузору, збільшуючи початкову швидкість повітряних мас.

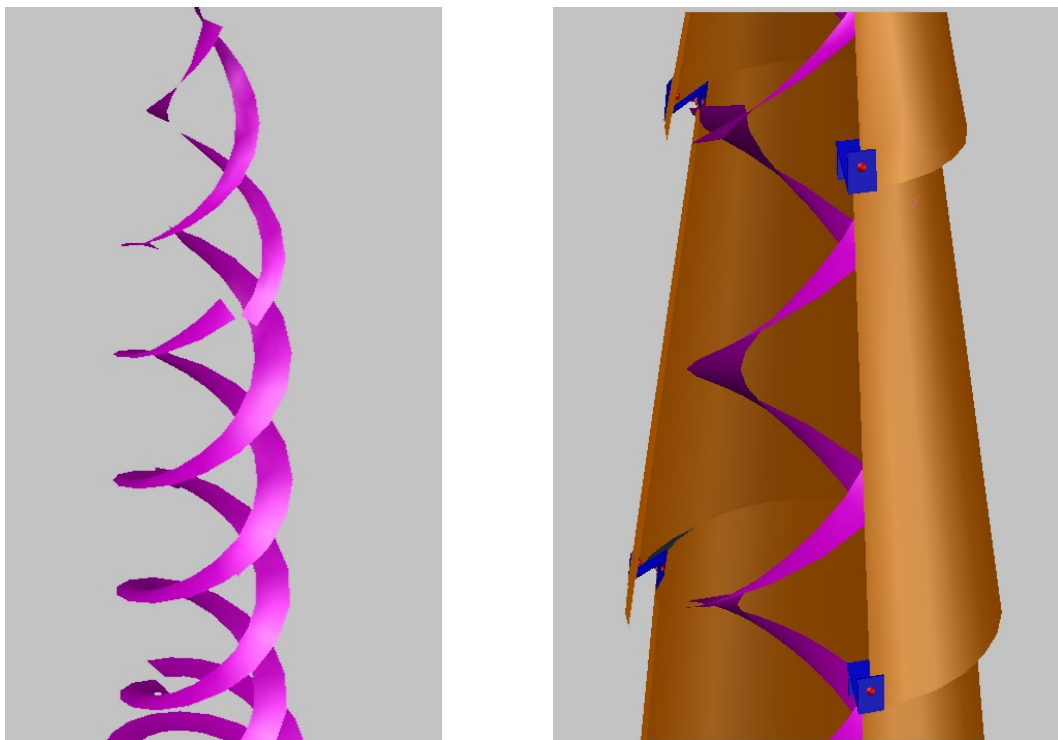


Рис. 3.4 – Гвинтоподібні треки.

3.1.3.3 Центральний конфузор.

Конфузор – це частина повітропроводу, в якому утворюється з'єднання і плавний перехід від каналу більшого перерізу до меншого. Швидкість переміщення повітряних мас в конфузорі обумовлено тим, що динамічний

тиск потоку підвищується, а статичний навпаки – зменшується. Отже, у цій частині повітропроводу швидкість повітряних мас збільшується.

Принцип дії конфузору полягає в ефекті Вентурі, в основі якого лежить падіння тиску газу, коли повітряний потік проходить крізь звужену частину повітропроводу. Ефекту Вентурі відповідає наступне рівняння, яке описує взаємозв'язок між швидкістю, тиском та висотою двох перерізів каналу:

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (3.2)$$

де: v – швидкість повітряного потоку, м/с;

p_1, p_2 – тиск, відповідно, у широкій та вузькій частинах каналу, Па;

ρ – щільність повітря, кг/м³.

Під час проведення експериментів, враховуючи наявність даного ефекту в частинах пристрою електрогенерації, можливо визначити витрату:

$$\begin{cases} Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \\ p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) \end{cases} \quad (3.3)$$

то:

$$Q = A_1 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right)}} = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right)}} \quad (3.4)$$

де: A_1, A_2 – площі поперечного перерізу повітряних потоків, відповідно, у широкій у вузькій частинах каналу.

На рис. 3.5 зображений центральний конфузор, виконаний у програмі «Solidworks».

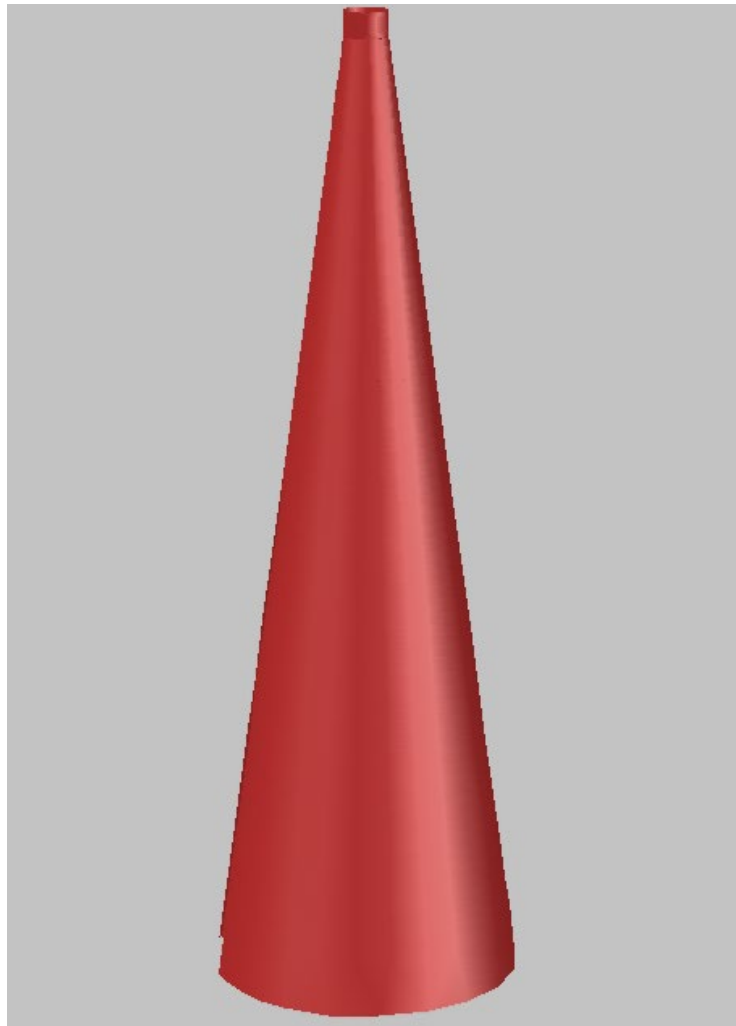


Рис. 3.5 – Центральний конфузор повітряного електрогенератору напівзакритого типу.

Сукупність наведених додаткових ознак пристрою перетворюють турбулентний рух «протягу» повітря на спрямований обертально-поступальний, крім того, додатковий позитивний ефект полягає у тому, що ліквідує залежність умов експлуатації від зовнішніх факторів температури, вологості повітря, напрямку руху вітру.

3.1.2 Розрахунки очікуваної потужності початкового варіанту проєктування «Повітряного електрогенератора напівзакритого типу».

Проведено розрахунок мінімальної потужності, яка може бути отримана за рахунок посилення швидкості потоку повітря, забезпеченого

внутрішніми гвинтоподібними треками, та утворення ефекту «протягу» в середині вежі завдяки сукупності конструктивних особливостей, які заявлені.

Початкові дані для розрахунку зазначені в таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 – Вихідні дані.

ρ	Середня величина щільності повітря на рівні землі, $\text{кг(с)} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$	0,125
V_B	Мінімальна швидкість потоку повітря при штилі (за шкалою Бофорта) на вході у «вікна» і кільцеві отвори, м/с	0,2
ΣF_B	Загальна площа «вікон» і кільцевих отворів, м^2	0,9
ΣF_p	Загальна площа входу на ротор з конфузора $\varnothing 0,1$ м, м^2	0,00785
$f_{\text{вх.к}}$	Площа входу в конфузор $\varnothing 0,3$ м, м^2	0,07065
$f_{\text{вих.к}}$	Площа виходу з конфузора $\varnothing 0,1$ м, м^2	0,00502
$K_{\text{ав}}$	Коефіцієнт аеродинамічних втрат	0,415

Розрахунки коефіцієнтів прискорення виконані за формулами і наведені в таблиці 3.2:

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти прискорення.

$K_{\text{пр.к}}$	Коефіцієнт прискорення для конфузора	$K_{\text{пр.к}} = \frac{f_{\text{вх.к}}}{f_{\text{вих.к}}}$	14
$K_{\text{пр.м}}$	Коефіцієнт прискорення для всієї вежі	$K_{\text{пр.м}} = \frac{\Sigma F_B}{\Sigma F_p}$	115

Очікувана швидкість повітря на виході з конфузора:

$$V_k = V_B \cdot K_{\text{пр.к}} = 2,8 \text{ (м/с)} \quad (3.5)$$

Очікувана швидкість повітря на виході до лопатей ротора:

$$V_p = V_B \cdot K_{\text{пр.м}} = 23 \text{ (м/с)} \quad (3.6)$$

Повна потужність електрогенератора розрахована за формулою:

$$N_{\text{пп}} = \frac{\rho \cdot \sum F_p \cdot (V_k + V_p)^3}{2} = 5,37(\text{кВт}) \quad (3.7)$$

З врахуванням аеродинамічних втрат потужності $N_{\text{ав}}$, які дорівнюють:

$$N_{\text{ав}} = K_{\text{ав}} \cdot N_{\text{пп}} = 2,13 (\text{кВт}) \quad (3.8)$$

Мінімальна реальна потужність складатиме:

$$N_{\text{рп}} = N_{\text{пп}} - N_{\text{ав}} = 3,14 (\text{кВт}) \quad (3.9)$$

Результати розрахованої потужності дають можливість використати принципову схему при розробці конструкцій повітряних генераторів напівзакритого типу для повної лінійки електропотужностей (від 3 до 315 кВт).

При здійсненні в представленій конструкції початкового зразка повітряного електрогенератора, в якому закладене штучне утворення стартового (додатково до природного) обертального руху повітря, що потрапляє через кільцевий колектор від спеціального вентилятора.

Приклад розрахунку отриманої стабільної потужності при прийнятій швидкості виходу потоку повітря з кільцевого колектора на треки секцій і конфузора $V_c=1$ м/с при $K_{\text{пр.к}} = 14$.

Швидкість повітря при виході з конфузора на лопаті ротора складатиме:

$$V_k = V_c \cdot K_{\text{пр.к}} = 14 (\text{м/с}) \quad (3.10)$$

Очікувані потужності електрогенератора мають бути при $V_c=1$ м/с:

$$N_{\text{оп(1)}} = \frac{0,125 \cdot 0,05 \cdot 14^3}{2} \approx 0,86 (\text{кВт}) \quad (3.11)$$

$$N_{\text{ав(1)}} = 0,415 \cdot 0,86 \approx 0,36 (\text{кВт}) \quad (3.12)$$

$$N_{\text{рп(1)}} = 0,86 - 0,36 \approx 0,5 (\text{кВт}) \quad (3.13)$$

При збільшенні показника швидкості виходу потоку повітряних мас до 2 м/с та 5 м/с, очікувані потужності електрогенератора становитимуть (табл.3.3):

Таблиця 3.3 – Очікувані потужності електрогенератора за різними показниками V_c .

$V_c=1$ м/с	$N_{оп(1)} \approx 0,86$ кВт	$N_{ав(1)} \approx 0,36$ кВт	$N_{рп(1)} \approx 0,5$ кВт
$V_c=2$ м/с	$N_{оп(2)} \approx 6,86$ кВт	$N_{ав(2)} \approx 2,86$ кВт	$N_{рп(2)} \approx 4,0$ кВт
$V_c=5$ м/с	$N_{оп(5)} \approx 107,18$ кВт	$N_{ав(5)} \approx 44,48$ кВт	$N_{рп(5)} \approx 62,7$ кВт

Отримані розрахункові результати потужності повітряного електрогенератора напівзакритого типу свідчать про те, що питомі потужності, отримані на принципово новому (напівзакритому) пристрої, складатимуть $N_{пв} = \frac{0,5 \text{ кВт}}{0,005 \text{ м}^2} = 100 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$, що більше ніж у трьохлопатевих вітряків в 2,5 разів.

3.2 Експериментальне дослідження «пілотного» зразку повітряного електрогенератора напівзакритого типу.

3.2.1 Конструктивні зміни.

На етапі теоретичного дослідження та розрахунків початкового варіанту запропонованого пристрою були змінені конструктивні рішення розташування деяких основних вузлів електрогенератора (рис. 3.6). Так як станція представлена, як автономна система електропостачання будівель (споруд), то запропоновані зміни зменшили габаритні показники пристрою, а також збільшили аеродинамічні параметри повітряного потоку, який є енергоносієм у даному винаході.

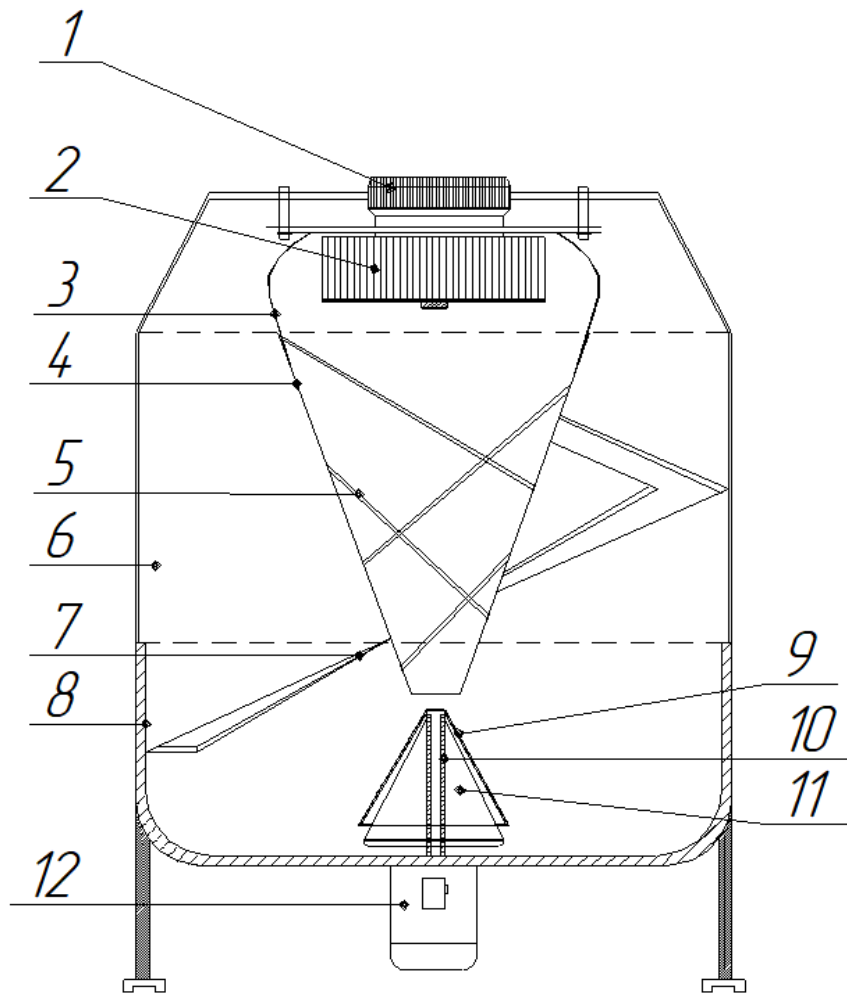


Рис. 3.6 – Кінцева модифікація повітряного електрогенератору напівзакритого типу.

Повітряний електрогенератор напівзакритого типу у кінцевій модифікації складається з електродвигуна (рис. 3.6, 1), який приводить у дію вентилятор (рис. 3.6, 2), створюючи спрямований турбулентний потік повітряних мас до ротора «Онiпка» (рис. 3.6, 11). Від вентилятора, повітряний потік проходить крізь конфузор (рис. 3.6, 4) з гвинтоподібними треками (рис. 3.6, 5), за допомогою конструктивних особливостей яких збільшується швидкість, а повітряні маси переходять з ламінарного режиму до турбулентного, впорядковуючись за необхідною траєкторією. Обертаючись ротор «Онiпка» спрямовує повітря крізь відбивачі (рис. 3.6, 8,9) до секції байпаса (рис. 3.6, 6) з треками (рис. 3.6, 7), звідки повітряний

потік у турбулентному режимі потрапляє знову до вентилятора, збільшуючи параметр його швидкості, тим самим підвищуючи показники кінетичної енергії повітря, яке збільшує оберти ротора «Онiпка», який з'єднаний з електрогенератором (рис. 3.6, 12).

3.2.2 Експериментальні випробування та дослідження повітряного електрогенератора напівзакритого типу.

При експериментальному дослідженні повітряного електрогенератора напівзакритого типу було використано різні модифікації як ротора «Онiпка», так і застосування відбивачів у різних основних вузлах пристрою, задля створення зворотно-обертально-поступального руху повітряних мас для збільшення кінцевих показників – кількості обертів «ротора Онiпка».

На рис. 3.7 та 3.8 представлений ротор «Онiпка»; кут нахилу шнеків 45° .



Рис. 3.7 – Ротор «Онiпка» з кутом нахилу шнеків 45° .

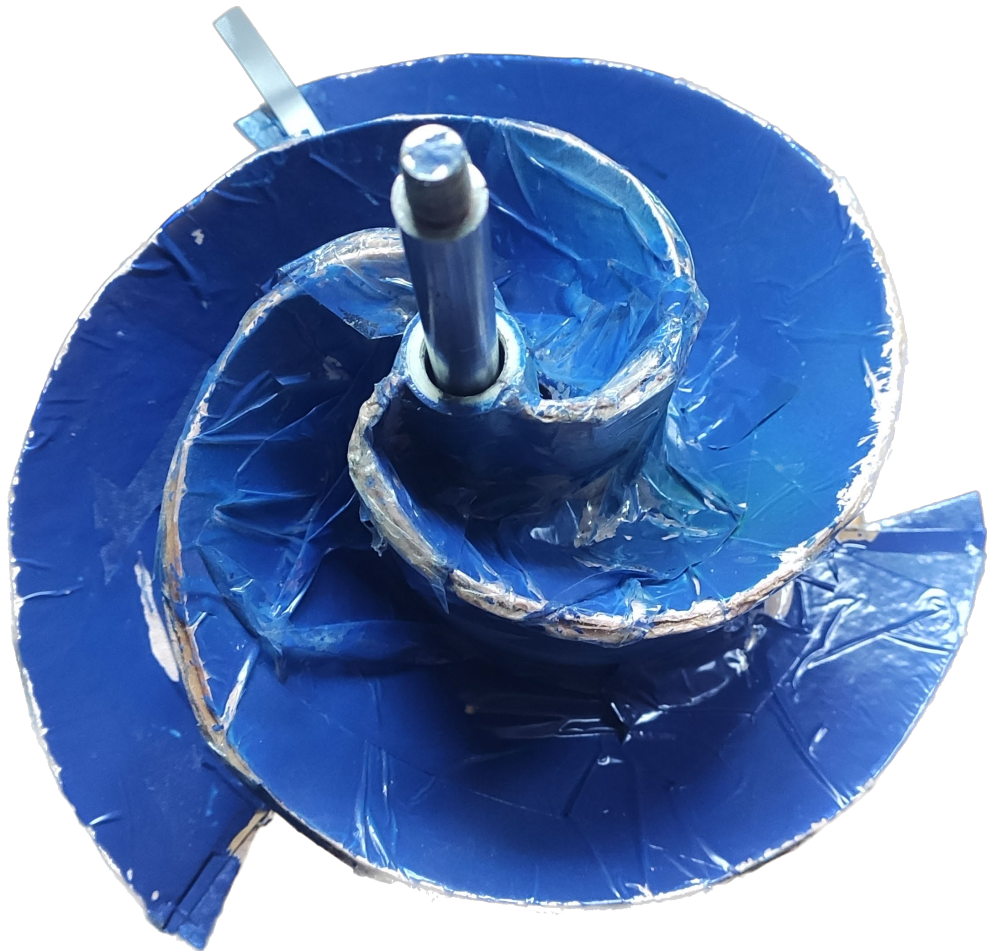


Рис. 3.8 – Ротор «Онiпка» з кутом нахилу шнеків 45°.

На рис. 3.9 представлений рото «Онiпка» з кутом нахилу шнеків 62 °. Експериментально доведено, що саме цей кут нахилу є оптимальним і показав найвищий КПД даного елементу пристрою. Для підвищення ефективності та зменшення опорів при потраплянні повітряного потоку на шнеки ротора «Онiпка» було застосовано обтікач, який підвищив ефективність на 10%.



Рис. 3.9 - Ротор «Оніпка» з кутом нахилу шнеків 62° .

На рис. 3.10 представлений конфузор з гвинтоподібними треками.



Рис. 3.10 – Конфузор з гвинтоподібними треками.

Запропоноване рішення використання гвинтоподібних треків у конфузори створює ефект «торнадо». Спрямований вихороподібний рух повітряних мас має більший показник енергетичної ефективності через певне особливе розподілення тиску та температури у повітряному потоці. При випробуванні байпаса (рис. 3.11) кількість обертів ротора «Онiпка» підвищилось, що однозначно демонструє позитивний енергетичний ефект.



Рис. 3.11 – Центральний конфузор з байпасом.

Перші експериментальні дослідження ефективності використання різних модифікацій повітряного електрогенератора напівзакритого типу для підвищення показника параметру обертів шнеків ротора «Онiпка» наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Експериментальне дослідження різних модифікацій.

Модифікація	Відстань між центральним конфузоровим та ротором «Онiпка», мм	Кiлькiсть обертiв «ротора» Онiпка, об/хв	Споживана електроенергiя, кВт·год
Без використання байпаса.	50	462,5	0,148-0,156
З використанням байпаса.	50	456-456	0,150
Без використання байпаса.	70	452	0,145
З використанням байпаса.	70	446	0,135-0,155
Без використання байпаса.	40	454	0,146
З використанням байпаса.	40	454-460	0,185
З використанням байпаса.	30	448	0,175-0,194

За вищезазначеними даними можна зробити висновок, що найоптимальнiшi конструктивнi рiшення це: вiдстань мiж центральним конфузоровим та ротором «Онiпка» - 50 мм, без використання центрального вiдбивача – байпаса.

Висновки за розділом 3

В основу запропонованого пристрою генерації електричної енергії поставлена задача розробки повітряного електрогенератора, в якому за рахунок введення в конструкцію додаткових елементів забезпечується зменшення аеродинамічного опору руху на вході і виході з пристрою.

Традиційні лопаті вітрогенераторів замінені на ротор «Оніпка», який має зовсім інше конструктивне виконання лопатей у вигляді шнеків. Особливістю запропонованого ротору є стартова швидкість обертання – 0,3 м/с, що дозволяє використання явища «повітряної» тяги, як основного фізичного процесу створення ефекту «протягу».

Конструктивні рішення у вигляді монтажу центрального конфузора та гвинтоподібних треків прийняті для створення вихороподібного руху повітряного потоку, дослідження у другому розділі якого дає змогу зробити висновки у підвищенні аеродинамічних параметрів повітряних мас, які є основним енергоносієм у даному пристрої.

Експериментально було досліджено запуск повітряного електрогенератора напівзакритого типу з виявленням припустимих позитивних і негативних ефектів конструктивних рішень виконання пристрою.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Дубинский М.Г. Течение вращающихся потоков газа в кольцевых каналах. Известия АН СССР, ОТН, 1955, № 11.
2. HILSCH R., Die Expansion von Gasen in Zentrifugalfeldals Kaelterprocess, Zeitschrift fur Natarforschung, Jan., 1946.
3. MACOTO SUSUKI, Theoretical and Experimental Studies on the Vortex Tube, Sci. Papers I. P. C. R., Vol. 54, No. 1, 1960.
4. REYNOLDS A. J., Energy Flows in a Vortex Tube, Z. Angew. Math. and Phys., Vol. 12, No. 4, 1961.
5. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. Москва: Машиностроение, 1969. 182 с.
6. KASSNER R. and KNOERNSCHILOE. «Friction Laws and Energy Transfer in Circular Flow, Technical Report». No. F-TR-2198-N8, GS-USAF, Wright Patterson Air Force Base, No. 78, March, 1948.
7. ECKERT E. R. G., and HARTNETT J. P., Experimental Study of the Velocity and Temperature Distribution in a High Velocity Vortex Type Flow, Stanford University Heat Transfer Institute Conference, June, 1956.
8. LAY J. E., An Experimental and Analytical Study of Vortex-Flow Temperature Separation by Superposition of Spiral and Axial Flows, Parts 1 and II, Journal of Heat Transfer. Trans. of the ASME, Series C, Aug., 1959.
9. BOURGEAT M., FABRI J., SCESTRUNCK R., Separation Thermiquedans les Fluides en Rotation, Publ. O. N. E. R. A., No. 102, 1961.
10. SCHOWALTER W. R., and JONSTONE H. F., Characteristics of the Mean Flow Patterns and Structure of Turbulence in Spinal Gas Streams, A. I. Ch. E. Journal. Vol. 6, No. 4, Dec., 1960.
11. Стефанов Е.В. Инженерные системы зданий. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Санкт-Петербург: Авок Северо-Запад, 2005. 399 с.

12. Лобаев Б.Н. Расчет воздухопроводов вентиляционных, компрессорных и пневмотранспортных установок. Киев: Госстройиздат УССР, 1959.183 с.
13. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1992. 672 с.
14. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Циленков; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. 335 с.
15. Рязанова Н.О. Нетрадиційна відновлювана енергетика: проблеми і перспективи / Н. О. Рязанова // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2017. – № 1. – С. 174–178.
16. RenewableEnergy // ScienceDirect: [Website]. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/renewable-energy> (viewed on: 27.11.2023).
17. Кузьміна М. Проблеми створення об'єктів відновлюваної енергетики [Електронний ресурс] / М. Кузьміна // Підприємництво, господарство і право. – 2018. – № 12. – С. 115–118. – URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pgip_2018_12_21 (дата звернення: 27.11.2023).
18. Савенко Б.М. Світовий досвід розвитку відновлювальної енергетики / Б. М. Савенко // Збалансоване природокористування. – 2015. – № 2. С. 46–48.
19. Аднан З. Перспективи розвитку поновлюваної енергетики в США / З. А. Аднан // Новини енергетики. – 2015. – № 12. С. 16–26.
20. Айер В. С. Безліч різноманітних доріг приведуть нас до сталої енергетики для всіх в 2030 / В. С. Айер // Новини енергетики. – 2014. – № 2. С. 6–8.
21. Gao, Linyue&Liu, Yang&Hu, Hui. (2019). An Experimental Investigation of Dynamic Ice Accretion Process on a Wind Turbine Blade Model Considering Various Icing Conditions. International Journal of Heat and Mass Transfer. 133. P. 930-939.

22. Nano Vent-Skin – YouTube URL: <http://nanoventskin.blogspot.com/>
3D animation of Nano Vent-Skin working.

23. Дерев'яно Д. Г. Оцінювання надійності електропостачання у локальних системах з установками відновлюваної енергетики / Д.Г. Дерев'яно, В. С. Панасенко, О. С. Масло // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2019. – Вип. 203. С. 49–50.

24. Миколюк О. А. Окремі аспекти інноваційного розвитку відновлюваної енергетики України / О. А. Миколюк, В. М. Бобровник // Інтелект ХХІ. – 2019. – № 3. С. 126–132.

25. Хілько В.А. Заходи підтримки відновлюваної енергетики в Україні / В. А. Хілько // Відновлювана енергетика. – 2021. – № 3. С. 6–17.

26. Аналіз еколого-економічних аспектів та перспектив розвитку альтернативної енергетики в Україні / В. Г. Петрук, О. В. Мороз, С. С. Коцюбинська, Д. В. Мацюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 4. С. 62–65.

27. Невідворотність переходу України до відновлюваної енергетики [Електронний ресурс] / Б. Г. Тучинський, С. О. Кудря, І. В. Іванченко, В. Ю. Іванчук // Відновлювана енергетика. – 2020. – № 4. С. 6–21.

28. Науково-технічний прогрес розвитку відновлюваної енергетики в Україні / Л. І. Никируй, О. В. Замуруєва, В. С. Федосов та ін // Наукові нотатки. – 2020. – Вип. 70. С. 18–26.

29. Осаул О.І., Карпенко Г.В., Авксент'єва А.П. Повітряний електрогенератор напівзакритого типу. The 2nd International scientific and practical conference “Current challenges of science and education” (October 16-18, 2023) MDPC Publishing, Berlin, Germany. - 2023. P. 150-152.

30. Avksentieva A., Karpenko H. Air power generator of semi-closed type. Nauka I Studia, Vol.11 (2023). URL: https://nauka-i-studia.eu/ojs/index.php/pl_ojs/issue/view/30