

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та природокористування
Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та природокористування

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГЕРБА ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 621.224:620.92(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ УМОВ РОБОТИ ТА КОНСТРУКЦІЙ
ГІДРАВЛІЧНИХ ТУРБІН ШНЕКОВОГО ТИПУ МАЛИХ
ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

19 – Архітектура та будівництво
192 – Будівництво та цивільна інженерія

Подається на здобуття ступеня доктора філософії. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____



Науковий керівник:

Рябенко Олександр Антонович

д.т.н., професор

Рівне – 2025

АНОТАЦІЯ

Герба О.В. Удосконалення умов роботи та конструкцій гідравлічних турбін шнекового типу малих гідроелектростанцій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія.

Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне, 2025.

Сучасні виклики в енергетичному секторі, зокрема зростаючі потреби у відновлюваних джерелах енергії, забезпечення енергетичної безпеки України та зниження залежності від традиційних ресурсів, обумовлюють необхідність впровадження інноваційних технологій у сфері малої гідроенергетики. Одним із перспективних напрямів є створення турбін, здатних ефективно працювати у водному та повітряному середовищах, що забезпечує універсальність їх застосування у сфері відновлюваної енергетики.

Метою дослідження є підвищення ефективності роботи малих гідравлічних турбін шнекового типу шляхом удосконалення їх конструктивних параметрів та умов взаємодії з водним потоком, що створює передумови для розширення сфер застосування таких турбін в автономних енергетичних системах, водогосподарських об'єктах і гідротехнічних спорудах.

Для досягнення поставленої мети проаналізовано сучасний стан малої гідроенергетики, розроблено та експериментально досліджено вдосконалені конструкції турбін, а також сформульовано науково обґрунтовані рекомендації щодо підвищення ефективності їх роботи. Структура дослідження включає вступ, сім розділів, висновки, список використаних джерел і додатки.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, висвітлено мету та основні завдання дисертаційної роботи, окреслено об'єкт, предмет і методи

дослідження, сформульовано наукову новизну та зазначено особистий внесок автора.

В **першому** розділі «Стан, перспективи та технологічні рішення малої гідроенергетики України» представлено огляд сучасного стану малої гідроенергетики, її ролі в загальній енергетичній системі та перспектив розвитку в контексті глобальних тенденцій переходу до відновлюваних джерел енергії. Розглянуто основні проблеми, з якими стикається галузь, включаючи технічні обмеження, економічні аспекти та екологічні виклики.

Досліджено технологічні рішення провідних виробників, з акцентом на адаптації турбін до природних умов та оптимізації енергетичного перетворення через використання завихрення потоку.

На основі аналізу запропоновано модернізацію обладнання та інженерну модель турбіни, що мінімізує енергетичні втрати й підвищує продуктивність. Результати формують основу для ефективного використання гідроресурсів і визначають напрям подальших досліджень у галузі малої гідроенергетики.

Другий розділ «Конструювання вдосконалених типів шнекових турбін» містить детальне обґрунтування вдосконалених конструктивних рішень для трьох типів спіралеподібних турбін (захищені одним патентом), які належать до класу шнекових турбін, з акцентом на їхню ефективність у різних середовищах експлуатації.

Розглянуто запатентовані три основні варіанти турбін, які реалізують спільний принцип дії, спрямований на поступове стискання і прискорення потоку для ефективного перетворення кінетичної енергії у механічну. При цьому кожна конструкція має індивідуальні геометричні та функціональні особливості:

- турбіна з лопатями за принципом золотої спіралі дозволяє рівномірно розподіляти навантаження з концентрацією його поблизу корпусу (у зоні більшого діаметра), що сприяє поступовому нарощуванню потужності та підвищенню ефективності енергоперетворення;

- турбіна з прямими спіралеподібними лопатями, що збільшуються в об'ємі, забезпечує оптимальну взаємодію з потоком, рівномірний розподіл навантаження та високу стабільність роботи, що дозволяє досягти високого коефіцієнта корисної дії;

- турбіна з прямими спіралеподібними лопатями та звуженим корпусом має полегшену конструкцію, яка зменшує загальну масу, сприяє швидшому старту в умовах слабого потоку та мінімізує енергетичні втрати.

Застосування різних профілів лопатей та маховикового ефекту корпусу дозволяє знизити стартову швидкість потоку, забезпечити стабільність обертання та зменшити енергетичні пульсації.

Третій розділ «Експериментальна установка та досліджувані турбін» присвячено детальному опису лабораторної установки, що використовувалася для проведення експериментальних досліджень роботи турбін у водному та повітряному потоках. Розглянуто методику підготовки експериментальних турбін, їх конструктивні особливості, параметри тестування та умови проведення досліджень у лабораторних умовах.

Особливу увагу приділено модернізації установки: інтеграції випробувального модуля, що забезпечує комплексне тестування турбін у режимах змінних гідродинамічних і електричних параметрів, а також дообладнанню сучасними вимірювальними приладами – лазерним тахометром для вимірювання обертів і мультиметром для фіксації згенерованої напруги.

У межах дослідження було розроблено спеціальний пристрій для зміни напрямку потоку під кутом 90° до площини лопатей турбіни. Його конструктивною особливістю є збільшений вхідний діаметр із поступовим звуженням до виходу, що створює додаткове стискання потоку і збільшує його швидкість перед взаємодією з робочими елементами турбіни.

Розглянуто характеристику генераторів, що застосовувалися для тестувань, їхню потужність і можливості інтеграції в дослідницьку установку. Описано методи збору та аналізу даних, спрямовані на мінімізацію похибок і забезпечення високої точності вимірювань. Представлено алгоритми оцінки

ефективності роботи турбін, які включають аналіз вихідних характеристик, порівняння результатів та ідентифікацію ключових факторів впливу на продуктивність турбін у різних умовах.

Четвертий розділ «Лабораторні дослідження запроектованих турбін у повітряному потоці» присвячено дослідженню роботи спіралеподібних турбін у повітряному потоці, з акцентом на їх аеродинамічну ефективність та експлуатаційні характеристики. Розглянуто механізми генерування обертового моменту, вплив конструктивних параметрів на втрати енергії та оптимальні умови для роботи в змінних потоках.

Експериментальні випробування за допомогою модернізованого модуля з компресорним обладнанням підтвердили здатність турбін функціонувати при змінному тиску, що обґрунтовує напрями конструктивної оптимізації.

Удосконалена методика порівняння результатів дозволила оцінити ефективність турбін. Ключовим рішенням стало вдосконалення геометрії лопатей та корпусу, що забезпечило стабільність обертання через маховиковий ефект.

Результати підтвердили вплив конструктивних змін на стабільність роботи та рівень електричної генерації, ставши основою для оптимізації турбін у нестабільних режимах роботи повітряного й водного середовища.

П'ятий розділ «Конструкція турбіни гвинтового типу» присвячено опису конструктивних особливостей турбіни гвинтового типу з класу шнекових турбін та процесу її проектування. Розглянуто ключові етапи розробки, включаючи визначення оптимальних параметрів на основі аналізу недоліків конструкцій спіралеподібних турбін, що впливали на їхню продуктивність.

Особливу увагу приділено вдосконаленню геометрії корпусу та лопатей турбіни з метою мінімізації гідродинамічних втрат і підвищення ефективності енергетичного перетворення. Впровадження криволінійних заокруглень у зоні злиття лопатей із корпусом дозволило зменшити турбулентність потоку та забезпечити рівномірний розподіл навантаження на робочі органи турбіни.

На основі аналізу результатів досліджень спіралеподібних турбін у повітряному потоці було розроблено вдосконалену турбіну гвинтового типу. Для неї підготовлено комплект технічної документації, необхідної для патентування.

Шостий розділ «Лабораторні дослідження турбін у водному потоці» присвячено аналізу результатів експериментальних досліджень п'яти варіантів турбін у водному потоці за умов різної та вирівняної маси. Встановлено, що збільшення маси турбін сприяє стабільнішому обертанню, вищому моменту інерції та ефективнішому перетворенню кінетичної енергії, тоді як легкі турбіни забезпечують швидший запуск, але гіршу роботу при високих навантаженнях.

Дослідження роботи турбін при кутах подачі потоку 45° і 90° показали, що подача під кутом 90° забезпечує менші енергетичні втрати, стабільність обертання та вищий коефіцієнт перетворення енергії, тоді як при 45° спостерігається зниження ефективності, особливо за максимального навантаження. Підвищення напору позитивно впливає на продуктивність турбін.

Отримані результати дозволили сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації маси турбін, кута подачі потоку та режимів роботи для підвищення ефективності турбін у малих гідроустановках.

Сьомий розділ «Рекомендації щодо застосування розроблених турбін на основі аналізу лабораторних досліджень» підсумовує результати досліджень, визначає наукову новизну роботи та оцінює можливості практичного застосування розроблених технічних рішень. Проаналізовано закономірності впливу напору, кута подачі потоку, навантаження і маси турбін на їхню ефективність у змінних умовах експлуатації.

Доведено, що підвищення напору та подача потоку під кутом 90° сприяють лінійному зростанню напруги та коефіцієнта корисної дії. Найкращі результати продемонструвала гвинтова турбіна, яка забезпечила стабільну генерацію за змінного навантаження.

Сформовано практичні рекомендації щодо вибору та експлуатації турбін для підвищення ефективності малих гідроустановок і адаптації їх до нестабільних умов потоку, що є важливим для підвищення ефективності автономних джерел енергії. Окремо підкреслено потенціал застосування розроблених технічних рішень у суміжних галузях, зокрема в альтернативній енергетиці, аеродинамічних системах та механічному енергоперетворенні.

У **висновках** узагальнено основні результати дослідження, окреслено перспективи подальших наукових розробок і визначено потенційні напрями використання вдосконалених турбін у відновлювальній енергетиці та інших технічних сферах.

Отримані результати апробовані на наукових конференціях, тематичних семінарах та опубліковані у фахових наукових журналах. Запропоновані технічні рішення захищені патентами на корисну модель. Подальші дослідження будуть спрямовані на адаптацію розроблених конструкцій до реальних експлуатаційних умов, підвищення їхньої довговічності та розширення сфери застосування у відновлювальній енергетиці.

Ключові слова: мала гідроенергетика, шнекові турбіни, спіралеподібні турбіни, конструкція, лабораторні дослідження, моделювання, гідродинаміка, гідравліка, енергетичні установки, відновлювальна енергетика, трубопровід, турбулентний потік.

ABSTRACT

Herba O.V. Improvement of Operating Conditions and Design of Screw-Type Hydraulic Turbines for Small Hydropower Plants. – Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for doctor of philosophy degree in specialty 192 – Construction and civil engineering (19 – Architecture and construction).

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, 2025.

Modern challenges in the energy sector, particularly the growing need for renewable energy sources, the assurance of Ukraine's energy security, and the reduction of dependence on traditional resources, highlight the necessity of implementing innovative technologies in the field of small-scale hydropower. One of the promising directions is the development of turbines capable of operating efficiently in both water and air environments, offering versatile applications in renewable energy systems.

The objective of this research is to increase the efficiency of small screw-type hydraulic turbines by improving their design parameters and interaction conditions with the water flow. This creates the prerequisites for expanding their use in autonomous energy systems, water management infrastructure, and hydraulic engineering facilities.

To achieve this goal, the current state of small hydropower was analyzed, advanced turbine designs were developed and experimentally investigated, and scientifically grounded recommendations for improving their performance were formulated. The structure of the study includes an introduction, seven chapters, conclusions, references, and appendices.

The introduction justifies the relevance of the research topic, outlines the aim and main objectives of the dissertation, defines the object, subject, and methods of the study, presents the scientific novelty, and identifies the author's personal contribution.

The **first** chapter, «The State, Prospects, and Technological Solutions of Small Hydropower in Ukraine», provides a comprehensive overview of the sector,

its role in the overall energy system, and development prospects in the context of the global transition to renewable sources. It discusses key problems facing the industry, including technical limitations, economic factors, and environmental challenges. Technological solutions from leading manufacturers are examined with an emphasis on turbine adaptation to natural conditions and optimization of energy conversion via flow vortexing. Based on the analysis, modernization of equipment and an engineering turbine model are proposed to minimize energy losses and increase efficiency. The results lay the foundation for effective use of water resources and define the direction for further research in small hydropower.

The **second** chapter, «Design of Improved Types of Screw Turbines», provides a detailed justification of improved structural solutions for three types of spiral turbines, emphasizing their efficiency under different operating conditions. It describes three patented models based on a shared principle of gradually compressing and accelerating the flow to efficiently convert kinetic energy into mechanical energy. Each turbine has unique geometric and functional features:

- A turbine with blades based on the golden spiral principle allows for uniform load distribution with concentration near the casing (in the zone of larger diameter), promoting gradual power increase and improved energy conversion;
- A turbine with expanding straight spiral blades ensures optimal flow interaction, even load distribution, and stable operation, resulting in a high efficiency factor;
- A turbine with straight spiral blades and a tapered casing features a lightweight design that reduces overall mass, enables faster startup under weak flow conditions, and minimizes energy losses.

The use of different blade profiles and the flywheel effect of the casing helps reduce the startup flow speed, ensures rotation stability, and decreases energy pulsations.

The **third** chapter, «Experimental Setup and Turbine Models», presents a detailed description of the laboratory installation used to conduct experimental research on turbine performance in both water and air flows. It outlines the

methodology for preparing turbine models, their structural features, test parameters, and the conditions under which the experiments were carried out.

Special attention is given to the modernization of the setup, including the integration of a test module enabling complex testing under variable hydrodynamic and electrical parameters, as well as the addition of modern measuring devices such as a laser tachometer and multimeter to record generated voltage.

As part of the research, a special device was developed to redirect the flow at a 90° angle to the plane of the turbine blades. Its structural feature is an increased inlet diameter with gradual narrowing toward the outlet, which creates additional flow compression and increases its speed before interacting with the turbine's working elements.

The characteristics of the generators used during testing are examined, along with their power and integration potential within the research installation. Methods of data collection and analysis are described, aimed at minimizing errors and ensuring high measurement accuracy. Algorithms for evaluating model performance are presented, including analysis of output characteristics, comparison of results, and identification of key factors influencing turbine productivity in different conditions.

The **fourth** chapter, «Laboratory Studies of Designed Turbine Models in Air Flow», focuses on the operation of spiral turbines in air flow, emphasizing their aerodynamic efficiency and operational characteristics. Mechanisms for generating torque, the influence of design parameters on energy losses, and optimal operating conditions in variable flows are discussed.

Experimental tests using a modernized module with compressor equipment confirmed the models' ability to function under varying pressure, supporting the direction of structural optimization.

An improved comparison methodology enabled evaluation of model efficiency. A key improvement was the optimization of blade and casing geometry, which ensured rotational stability via the flywheel effect.

The results confirmed the impact of design changes on stability and electricity generation levels, forming the basis for optimizing turbines under unstable air and water flow conditions.

The **fifth** chapter, «Design of the Screw-Type Turbine», is devoted to the structural features of the screw-type turbine and the design process. Key stages of development are considered, including the determination of optimal parameters based on analysis of deficiencies in spiral turbine designs that affected their productivity.

Particular attention is paid to optimizing the geometry of the turbine casing and blades to minimize hydrodynamic losses and enhance energy conversion efficiency. The introduction of curved transitions in the blade-to-casing joint area reduced flow turbulence and ensured uniform load distribution across turbine components.

Based on the analysis of results from air flow tests of spiral turbines, an improved screw turbine model was developed. A complete set of technical documentation for patenting was prepared.

The **sixth** chapter, «Laboratory Studies of Turbine Models in Water Flow», analyzes the experimental results of five turbine models tested in water under varying and balanced mass conditions. It was established that increased turbine mass promotes more stable rotation, higher inertia, and more effective kinetic energy conversion, while lighter models allow for quicker startup but perform worse under high load conditions.

Experiments with flow angles of 45° and 90° showed that a 90° flow angle results in lower energy losses, more stable rotation, and higher energy conversion efficiency, whereas the 45° angle led to decreased efficiency, especially under maximum load. Increased head pressure positively affected turbine performance.

The obtained results allowed for the development of practical recommendations on optimizing model mass, flow angle, and operating modes to increase turbine efficiency in small hydropower plants.

The **seventh** chapter, «Recommendations for the Application of Turbine Models Based on Laboratory Research», summarizes the research results, outlines the scientific novelty of the work, and assesses the practical applicability of the developed technical solutions. It analyzes the influence of head pressure, flow angle, load, and turbine mass on efficiency under changing operational conditions.

It is proven that increasing head pressure and directing flow at a 90° angle lead to a linear increase in voltage and efficiency. The screw-type turbine demonstrated the best performance, ensuring stable generation under variable loads.

Practical recommendations were formulated for selecting and operating turbines to increase the efficiency of small hydropower systems and to adapt them to unstable flow conditions – an important factor in improving autonomous energy sources. The potential for applying the developed technical solutions in related fields, including alternative energy, aerodynamic systems, and mechanical energy conversion, is emphasized.

The conclusions summarize the main research findings, outline prospects for future scientific developments, and identify potential directions for the use of improved turbines in renewable energy and other technical domains.

The obtained results were presented at scientific conferences, thematic seminars, and published in peer-reviewed scientific journals. The proposed technical solutions are protected by utility model patents. Further research will focus on adapting the developed designs to real operating conditions, increasing their durability, and expanding their application in renewable energy.

Keywords: Small hydropower, screw turbines, helical turbines, design, laboratory research, modeling, hydrodynamics, hydraulics, energy systems, renewable energy, pipeline, turbulent flow.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії, розділи в монографіях:

1. Рябенко О. А., Галич О. О., Сунічук С. В., Тимощук В. С., Філіпович Ю. Ю., Герба О. В. Розділ 24. Гідроенергетичний потенціал малих річок Українського полісся. *Підвищення ресурсного потенціалу Українського Полісся* : монографія / за ред. д.т.н., проф., акад. НААН В. А. Сташука, д.с.-г.н., проф. В. С. Мошинського, д.т.н., проф. А. М. Рокочинського [та ін.]. Рівне : НУВГП, 2024. 792 с. С. 580–583. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/30397/3/Monografiya_Polissya_%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80_3-482-792.pdf (38,837 д.а.; особистий внесок: опис гвинтових турбін 0,113 д.а.).

Публікації у фахових виданнях України:

2. Герба О. В. Використання турбін зі спіралеподібними лопатями. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер. Технічні науки* : зб. наук. праць. 2023. Вип. 4(104). 163 с. С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt420231> (0,457 д.а.).

3. Герба О. В. Дослідження енергетичних характеристик спіралеподібних турбін для систем охолодження ядерних установок. *Технічні науки та технології* : науковий журнал. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. No 4(38). 366 с. С. 359–366. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-359-366](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-359-366) (0,598 д.а.).

4. Герба О. В. Лабораторні дослідження моделей турбін для малих гідроелектростанцій у водному потоці під кутом 90° до лопатей. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер. Технічні науки* : зб. наук. праць. 2024. Вип. 4(108) С. 47–58 DOI: <https://doi.org/10.31713/vt420246> (0,444 д.а.).

5. Герба О. В. Турбіни гвинтового типу: Інновації у будівництві енергетичних установок : зб. наук. праць Українського державного

університету залізничного транспорту. Харків : УкрДУЗТ, 2025. Вип. № 211. С. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327108> (0,552 д.а.).

Публікації за матеріалами конференцій:

6. Герба О. В. Визначення оптимальних параметрів турбіни зі спіралеподібними лопатями для малих гідроелектростанцій. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки* : зб. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти (м. Рівне, Україна, 11–12 травня 2023 року). Рівне : НУВГП, 2023. 763 с. С. 19–21. (0,116 д.а.).

7. Герба О. В. Експериментальні дослідження моделей турбін малих гідроелектростанцій. *Моделювання, керування та інформаційні технології* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Рівне, Україна, 7–9 листопада 2024 року). Рівне : НУВГП, 2024. 367 с. С. 91–94. DOI: <https://doi.org/1031713/MCIT.2024.024> (0,353 д.а.).

Патенти на корисні моделі:

8. Турбіна зі спіралеподібними лопатями: пат. 150304 Україна: МПК F03D1/00. № u202104720; заявл. 17.08.2021; опубл. 26.01.2022, Бюл. № 4. 4 с. (Герба О. В.).

9. Турбіна гвинтового типу: пат. 156567 Україна: МПК F03D1/00, F03D9/00. № u202400504; заявл. 30.01.2024; опубл. 10.07.2024, Бюл. № 28. 4 с. (Герба О. В., Ключа О. О.).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1. СТАН, ПЕРСПЕКТИВИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ МАЛОЇ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ	30
1.1. Актуальність, переваги та перспективи розвитку малої гідроенергетики в контексті гідроенергетичного потенціалу малих річок України	30
1.2. Існуючий стан використання малих гідроелектростанцій та перспективи їх розвитку в Україні	34
1.3. Типи малих ГЕС та класифікація гідротурбін	42
1.4. Обладнання малих гідроелектростанцій	48
1.4.1. Турбіни різних виробників	48
1.4.2. Конструктивні особливості, обладнання та аналіз технологічних рішень гідротурбін.....	61
Висновки до розділу 1	65
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУЮВАННЯ ВДОСКОНАЛЕНИХ ТИПІВ ШНЕКОВИХ ТУРБІН.....	67
2.1. Конструктивні рішення та особливості спіралеподібних турбін	67
2.2. Турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі	71
2.3. Турбіна з спіралеподібними лопатями які збільшуються в об'ємі	73
2.4. Турбіна з спіралеподібними лопатями та звуженням корпусу	75
Висновки до розділу 2	77
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА ДОСЛІДЖУВАЛЬНІ ТУРБІНИ.....	79
3.1. Фізичні характеристики середовищ для експериментальних досліджень	79
3.2. Опис лабораторної установки для дослідження розроблених турбін ...	81
3.3. Особливості випробувального модуля для досліджень турбін у повітряному потоці.....	85
3.4. Особливості випробувального модуля для досліджень турбін у водному потоці.....	87

3.5. Виготовлення пристрою який направлятиме водний потік під кутом 90° до лопатей турбін	98
3.6. Виготовлення розроблених турбін та підготовка до проведення лабораторних досліджень	103
3.7. Регулювання ваги та балансування турбін для забезпечення точності експериментальних досліджень.....	109
3.8. Генератори.....	111
Висновки до розділу 3	113
РОЗДІЛ 4. ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОЕКТОВАНИХ ТУРБІН В ПОВІТРЯНОМУ ПОТОЦІ	115
4.1. Планування експериментів в повітряному потоці запроєктованих спіралеподібних турбін	115
4.2. Дослідження турбін у повітряному потоці	118
4.2.1. Дослідження турбіни I.....	118
4.2.2. Дослідження турбіни II	120
4.2.3. Дослідження турбіни III	122
4.2.4. Дослідження турбіни III ₁	125
4.3. Аналіз отриманих результатів досліджень спіралеподібних турбін у повітряному потоці.....	126
Висновки до розділу 4	129
РОЗДІЛ 5. КОНСТРУЮВАННЯ ШНЕКОВОЇ ТУРБІНИ ГВИНТОВОГО ТИПУ	132
5.1. Передумови до створення шнекової турбіни гвинтового типу.....	132
5.2. Конструктивні особливості шнекової турбіни гвинтового типу.....	133
5.3. Динамічна взаємодія потоку з робочими органами турбіни.....	135
5.4. Патентування конструкції шнекової турбіни гвинтового типу	139
Висновки до розділу 5	140

РОЗДІЛ 6. ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШНЕКОВИХ ТУРБІН У ВОДНОМУ ПОТОЦІ	143
6.1. Планування лабораторних експериментів запроєктованих шнекових турбін у водному потоці.....	143
6.2. Експериментальні дослідження турбін з різною вагою в направленому водному потоці під кутом 45° до лопатей	151
6.3. Експериментальні дослідження турбін з однаковою вагою у направленому водному потоці під кутом 45° до лопатей.....	159
6.4. Експериментальні дослідження турбін з однаковою вагою у направленому водному потоці під кутом 90° до лопатей.....	167
Висновки до розділу 6	173
РОЗДІЛ 7. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ТУРБІН НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	175
7.1. План проведення аналізу експериментальних даних.....	175
7.2. Аналіз взаємозв'язку рівня води у верхньому б'єфі та вихідної електричної напруги.....	177
7.3. Аналіз витрати води залежно від режимів напору водяного потоку на лопаті турбін	182
7.4. Аналіз ефективності роботи турбін за ККД.....	185
7.5. Порівняльний аналіз та обґрунтування вибору конструкцій для роботи у потоці з низьким напором	188
7.6. Рекомендації щодо практичного застосування досліджених турбін...	191
Висновки до розділу 7	194
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	197
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	205
ДОДАТКИ.....	217

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ

- d – діаметр турбіни, м;
- d_0 – діаметр на вході потоку в направляючий пристрій, м;
- d_c – діаметр на виході потоку з направляючого пристрою, м;
- N – потужність турбіни, Вт;
- Q – витрата води визначена за допомогою трикутного водозливу, $\text{м}^3/\text{с}$;
- Q_1 – витрата води визначена за допомогою програмного забезпечення, $\text{м}^3/\text{с}$;
- Q_2 – витрата води через пристрій для спрямування потоку, $\text{м}^3/\text{с}$;
- v – швидкість потоку води, $\text{м}/\text{с}$;
- D – діаметр направляючої камери потоку, м;
- S_k – площа перерізу направляючої камери потоку, м^2 ;
- S – площа перерізу на вході в турбіну для проходження потоку, м^2 ;
- S_1 – площа перерізу на виході з турбіни для проходження потоку, м^2 ;
- θ – кут вирізу трикутного водозливу, град.;
- h – рівень води у верхньому б'єфі, м;
- h_1 – рівень води на п'єзометрі, м;
- h_0 – рівень води у верхньому б'єфі, при якому проходить страгування турбіни, м;
- p_1 – тиск повітряного потоку, 2 атм;
- p_2 – тиск повітряного потоку, 4 атм;
- p_3 – тиск повітряного потоку, 6 атм;
- P_1 – електричне навантаження в режимі холостого ходу, потужність 0 Вт;
- P_2 – електричне навантаження потужністю 21Вт;
- P_3 – електричне навантаження потужністю 42Вт;
- P_4 – електричне навантаження потужністю 63Вт;
- P_g – потужність генератора, Вт;
- n – кількість обертів турбіни у повітряному потоці, об/хв;
- n_1 – кількість обертів турбіни в режимі холостого ходу, об/хв;
- n_2 – кількість обертів турбіни під навантаженням (21 Вт), об/хв;
- n_3 – кількість обертів турбіни під навантаженням (42 Вт), об/хв;

n_4 – кількість обертів турбіни під навантаженням (63 Вт), об/хв;
 U – вироблена електрична напруга генератором у повітряному потоці, В;
 U_1 – вироблена генератором електрична напруга без навантаження, В;
 U_2 – вироблена генератором напруга під навантаженням (21 Вт), В;
 U_3 – вироблена генератором напруга під навантаженням (42 Вт), В;
 U_4 – вироблена генератором напруга під навантаженням (63 Вт), В;
 I – сила струму, А;
 R – опір, Ом;
 ω – кутова швидкість, рад/с.

g – прискорення вільного падіння, приблизно 9.81 м/с²;
 π – константа, приблизно 3.14159;
 ε – коефіцієнт стиснення;
 φ – коефіцієнт швидкості;
 ζ – коефіцієнт місцевого опору отвору;
 μ – коефіцієнтом витрати;
 Re – число Рейнольдса;
 p_p – кількість пар полюсів генератора;
 k_e – коефіцієнт електричної пропорційності;
 Π – коефіцієнт корисної дії турбіни.

I – турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі вагою 922 грами;
 I_2 – турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі вагою 1092 грами;
 Π – турбіна з спіралеподібними лопатями що збільшуються в об'ємі вагою 925 грами;
 Π_2 – турбіна з спіралеподібними лопатями що збільшуються в об'ємі вагою 1089 грам;
 Π_3 – турбіна з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу вагою 755 грами;

III₁ – турбіна з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу вагою 923 грами;

III₂ – турбіна з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу вагою 1090 грам;

IV – турбіна гвинтового типу вагою 1096 грам;

V – шнекова турбіна вагою 690 грам;

V₂ – шнекова турбіна вагою 1092 грами.

ОЕС – об'єднана енергетична система.

ГЕС – гідро електростанція.

ТЕС – теплова електростанція.

АЕС – атомна електростанція.

СЕС – сонячна електростанція.

ВЕС – вітрова електростанція.

МЕА – міжнародне енергетичне агентство.

ВЕР – всесвітня енергетична рада.

ККД – коефіцієнт корисної дії.

НКРЕКП – Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг.

СГАВ – спеціальні графіки аварійного відключення.

ВДЕ – відновлювані джерела енергії.

РВБ – рівень води у верхньому б'єфі.

РНБ – рівень води у нижньому б'єфі.

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition.

ЕРС – електрорушійна сила.

ВСТУП

Актуальність теми

Глобальні виклики сучасності, зокрема зростання енергетичних потреб, вичерпність традиційних енергоресурсів, нестабільність енергетичних ринків та наслідки військових дій на території України, актуалізують необхідність прискореного впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергетичну систему країни. Особливої ваги набуває розробка та впровадження інноваційних технологій, орієнтованих на локальне, автономне і децентралізоване енергозабезпечення.

Одним із найбільш перспективних напрямів у цьому контексті є розвиток малої гідроенергетики, яка поєднує переваги високої ефективності, екологічної безпеки, довгострокової стабільності та доступності для регіонального застосування. Малі гідроелектростанції (МГЕС) здатні забезпечувати надійне електропостачання віддалених, гірських і сільських територій без суттєвих витрат на будівництво централізованої інфраструктури.

Крім того, з огляду на енергетичну безпеку країни та необхідність підвищення маневреності і стійкості Об'єднаної енергетичної системи України, розвиток МГЕС із застосуванням новітніх гідравлічних рішень, включаючи високоефективні конструкції турбін, набуває стратегічного значення. Застосування шнекових та спіралеподібних турбін, які здатні працювати в умовах невеликого напору й змінної витрати води, є особливо доцільним у малих річках, дренажно-каналній мережі та водогосподарських системах.

Аналіз світового досвіду, зокрема практики країн Європейського Союзу, засвідчує, що майже повністю використано економічно доцільний гідроенергетичний потенціал малих водотоків. Успішне впровадження таких систем доводить їхню ефективність у зменшенні залежності від імпортованих

енергоресурсів, підвищенні стійкості до кризових явищ та створенні нових робочих місць у регіонах.

У цьому контексті дослідження, спрямовані на удосконалення умов роботи та конструкцій гідравлічних турбін шнекового типу, є своєчасними та важливими як для розвитку інженерної науки, так і для практичного забезпечення потреб сталої енергетики України в умовах воєнного часу та відбудови [1].

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності роботи гідравлічних турбін шнекового типу шляхом удосконалення їх конструктивних параметрів та умов взаємодії з водним потоком, що створює передумови для розширення сфер застосування таких турбін в автономних енергетичних системах, водогосподарських об'єктах і гідротехнічних спорудах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розвинути теоретичні основи аналізу гідропотенціалу малих річок України та технічного стану МГЕС, визначити їхню енергоефективність і потребу в модернізації;

- дослідити технологічні рішення провідних виробників гідротурбін, виявити недоліки та визначити напрями вдосконалення конструкцій;

- розробити новий тип шнекової турбіни, що забезпечує поступове стискання потоку з метою підвищення швидкості на виході та ефективного використання кінетичної енергії;

- удосконалити лабораторну установку необхідним обладнанням для забезпечення випробувань турбін у водному та повітряному потоці, а також за різних режимів навантаження й напору;

- розробити та виготовити пристрій для спрямування водного потоку під кутом 90° до площини лопатей турбіни;

- провести експериментальні випробування трьох спіралеподібних турбін шнекового типу в повітряному потоці та визначити їхню ефективність;

–порівняти результати випробувань спіралеподібних турбін у повітряному потоці та сформувати технічні рекомендації щодо їх конструктивного вдосконалення;

–на основі рекомендацій щодо вдосконалення конструкцій спіралеподібних турбін розробити та підготувати до патентування вдосконалену модель гвинтової турбіни для роботи у водному та повітряному середовищах;

–визначити вплив маси турбін на їхню ефективність у водному потоці при куті подачі 45° до площини лопатей;

–оцінити ефективність роботи турбін за різних кутів подачі потоку 45° і 90° при однаковій масі турбін в умовах змінного напору та навантаження;

–удосконалити аналіз взаємозв'язків між гідродинамічними умовами та ефективністю роботи турбін шляхом дослідження впливу напору на витрату води, генерацію напруги та коефіцієнт корисної дії з урахуванням кута подачі потоку, рівня навантаження та маси турбін;

–сформувати науково-технічні рекомендації щодо практичного застосування турбін з урахуванням їхніх технічних та експлуатаційних особливостей.

Об'єктом дослідження є процес перетворення енергії водного потоку в механічну роботу в умовах низьконапірної гідроенергетики України.

Предметом дослідження виступають конструктивні особливості, гідродинамічні параметри та енергетична ефективність гвинтових, шнекових і спіралеподібних турбін, призначених для використання у малих гідроелектростанціях та автономних енергосистемах.

Для вирішення поставлених завдань використано комплексний підхід, який включає такі методи:

–аналітичний огляд і аналіз літературних джерел та існуючих технологічних рішень у сфері малої гідроенергетики;

–чисельне моделювання процесів перетворення енергії у турбінах із використанням спеціалізованого програмного забезпечення;

–експериментальні дослідження характеристик розроблених моделей турбін у лабораторних умовах із застосуванням водного та повітряного потоків;

–порівняльний аналіз ефективності нових конструкцій у співставленні з традиційними шнековими турбінами.

Наукова новизна отриманих результатів:

Вперше:

– розроблено та запатентовано в межах одного патенту на корисну модель три типи спіралеподібних турбін шнекового типу, що працюють на єдиному принципі дії, спрямованому на поступове стискання потоку для підвищення його швидкості та ефективного перетворення кінетичної енергії у механічну, при цьому обґрунтовано доцільність використання різних профілів лопатей, що забезпечує адаптацію конструкції турбін до широкого спектра гідродинамічних умов, і запропоновано конструктивну інтеграцію корпусу турбіни як маховика, що сприяє стабілізації частоти обертання ротора та зменшенню енергетичних пульсацій у системі.

– розроблено конструкцію гвинтової турбіни як підвиду шнекових турбін з удосконаленими геометричними характеристиками, що передбачають збільшення маси корпусу та впровадження криволінійних заокруглень у зоні з'єднання лопатей із корпусом. Технічне рішення ґрунтується на результатах експериментальних досліджень ефективності спіралеподібних турбін у повітряному потоці та спрямоване на підвищення стабільності гідродинамічного потоку, зниження турбулентних втрат і зростання загальної енергетичної продуктивності установки. Розробка супроводжується повним комплектом технічної документації, необхідної для оформлення патентного захисту.

Удосконалено:

– конструктивні елементи лабораторної установки шляхом доповнення її вимірювальним обладнанням і випробувальним модулем, яке в доповнення

до існуючих, дає змогу досліджувати роботу турбін у водному та повітряному потоці за різних режимів електричного навантаження і напору;

- виготовлено конструкцію пристрою для спрямування водного потоку під кутом 90° до лопатей турбіни, що дає змогу дослідити вплив перпендикулярного потоку на її роботу, а також проаналізувати конструкційні параметри, що забезпечують оптимальне енергетичне перетворення в умовах змінної гідродинаміки;

- методичний підхід до порівняння експериментальних результатів роботи спіралеподібних турбін у повітряному потоці, що дозволило встановити залежність ефективності генерації напруги від тиску повітря та сформувані конструктивні рекомендації щодо підвищення стабільності й продуктивності турбін. Зокрема, обґрунтовано доцільність оптимізації геометрії лопатей у зоні їх з'єднання з корпусом та модифікації профілю корпусу з метою зниження енергетичних втрат і підвищення ефективності роботи турбін як у повітряному, так і у водному потоці;

- методика комплексного аналізу дозволила поглиблено вивчити взаємозв'язки між гідродинамічними умовами та ефективністю роботи турбін через визначення впливу напору на витрату води, генерацію напруги та коефіцієнт корисної дії з урахуванням кута подачі потоку, рівня навантаження і маси турбін. Особливу увагу приділено оцінці поведінки турбін у режимах змінного навантаження та нестабільного потоку, що є критично важливим для оптимізації експлуатації малих гідроустановок.

Набули подальшого розвитку:

- теоретичні засади дослідження малої гідроенергетики України, що включають аналіз природного гідроенергетичного потенціалу малих річок, класифікацію малих ГЕС з урахуванням їх енергетичної ефективності та необхідності модернізації, а також оцінку рівня їхнього технологічного оснащення, що дає змогу оптимізувати вибір обладнання залежно від умов експлуатації та сприяти підвищенню ефективності використання доступних ресурсів;

– концепція проектування гідротурбін з позицій оптимізації енергетичної гідровіддачі шляхом узагальнення технічних рішень, запропонованих провідними виробниками та винахідниками. Це дозволило виявити переваги й недоліки існуючих конструкцій, що стало підґрунтям для формування інженерних рекомендацій щодо створення нової турбіни, здатної ефективно використовувати явище природного завихрення водного потоку з метою підвищення її енергетичної віддачі.;

– науково-прикладні засади експериментального випробування спіралеподібних турбін у повітряному потоці, що полягає у встановленні залежності ефективності їхньої роботи від тиску повітря та підтвердженні здатності конструкцій адаптуватися до змінних аеродинамічних умов, що дозволяє оптимізувати геометричні та робочі параметри турбін з метою підвищення ефективності енергетичного перетворення;

– науково-методичний підхід до оцінки впливу маси турбін на ефективність їхньої роботи у водному потоці під кутом 45° до площини лопатей. Це дозволило визначити чіткий зв'язок між масою турбіни та стабільністю її функціонування, що є важливим для адаптації конструкцій до змінних гідродинамічних умов і підвищення енергоефективності;

– підхід до оцінки ефективності роботи турбін шляхом поєднання умов експериментів: вирівнювання маси турбін та аналізу їх функціонування за різних кутів подачі потоку (45° і 90°). Це дозволило ідентифікувати оптимальні конструктивні рішення для експлуатації турбін у змінних гідродинамічних умовах та за різного рівня навантаження;

– обґрунтування науково-технічних рекомендацій щодо практичного застосування турбін у малих гідроустановках із урахуванням їхніх технічних та експлуатаційних особливостей, зокрема впливу електричного навантаження, рівня напору та гідродинамічних умов. Дослідження дозволило уточнити підходи до вибору конструкцій, спрямованих на зниження енергетичних втрат і підвищення стабільності роботи турбін.

Практичне значення роботи

Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні нових малих гідроелектростанцій, а також при модернізації та підвищенні ефективності існуючих енергетичних об'єктів. Використання вдосконалених конструкцій шнекових турбін сприятиме зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню коефіцієнта корисної дії турбін та забезпеченню стабільного виробництва електроенергії в умовах низьконапірних водотоків.

Запропоновані технічні рішення можуть бути впроваджені у практичні проекти з реконструкції та відновлення об'єктів малої гідроенергетики, що сприятиме розвитку автономних енергосистем, зокрема у віддалених регіонах. Крім того, розроблені конструктивні модифікації турбін можуть знайти застосування у суміжних галузях, таких як вітроенергетика, транспортні системи та промислові технології, що потребують ефективного перетворення енергії потоків.

Особистий внесок здобувача

Основні результати дослідження отримані автором самостійно. Зокрема, проведено аналіз наукової літератури за тематикою дослідження, що дозволило визначити сучасний стан розвитку малої гідроенергетики та перспективи застосування шнекових турбін. Здійснено аналітичну оцінку існуючих конструкцій, їхньої ефективності, гідравлічних характеристик та особливостей експлуатації, на основі чого сформульовано технічні пропозиції щодо вдосконалення конструкцій турбін з урахуванням умов їх практичного застосування.

Розроблено та запатентовано конструктивні рішення для шнекових турбін: трьох видів спіралеподібних турбін та турбіни гвинтового типу. Запропоновані технічні рішення спрямовані на підвищення гідравлічної ефективності, оптимізацію енергетичних характеристик та забезпечення адаптивності до широкого спектру умов експлуатації.

Автором самостійно розроблено та виготовлено експериментальний пристрій для дослідження турбін у повітряному та водному потоках, який інтегровано до лабораторної установки для проведення випробувань.

Автором самостійно розроблено, виготовлено та інтегровано до лабораторії Національного університету водного господарства та природокористування випробувальний модуль для дослідження турбін у повітряному та водному потоках. В рамках цієї установки реалізовано моніторинг параметрів потоку та електричних характеристик за допомогою SCADA-системи, що забезпечило збір, обробку й архівування даних у режимі реального часу.

У процесі дослідження організовано та виконано серію експериментальних випробувань вдосконалених турбін шнекового типу. На основі даних, отриманих із SCADA - системи, здійснено моделювання гідродинамічних режимів, що дозволило встановити кількісні залежності між напором, витратою, навантаженням і рівнем енергогенерації.

За результатами досліджень проведено аналіз ефективності конструктивних рішень, виявлено закономірності роботи досліджених турбін і запропоновано рекомендації щодо їх практичного впровадження у малу гідроенергетику.

Апробація результатів дослідження

Основні положення та результати дослідження були апробовані шляхом представлення через публікації, в розділі монографії, у рецензованих фахових наукових журналах та доповідей на профільних науково-практичних конференціях. Отримані результати експериментальних досліджень обговорювалися з експертами енергетичної галузі та представниками наукової спільноти, що підтверджує їхню наукову новизну та практичну значущість. Підтвердженням інноваційного характеру розробок та їхньої технічної цінності є отримання двох патентів на корисну модель.

З метою практичного впровадження розроблених технічних рішень ТОВ «АГРАРНИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ КОНСАЛТИНГ» ініціювало організацію

робіт зі створення мікро-ГЕС, призначених для забезпечення автономного енергопостачання об'єктів вуличного освітлення, рибогосподарських підприємств, а також для задоволення потреб розвитку енергетичної інфраструктури органів місцевого самоврядування.

Виготовлення конструкцій мікро-ГЕС для комерційного використання здійснюється на виробничих потужностях ТОВ ВКФ «БУДКОМПЛЕКТ», зокрема для підвищення ефективності автономного енергопостачання об'єктів туристично-рекреаційних комплексів, приватних домогосподарств, органів місцевого самоврядування та інших споживачів енергетичних послуг.

Структура і обсяг роботи

Дисертація складається з анотації, вступу, семи розділів, загальних висновків, списку використаної літератури (111 найменувань) та трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 223 сторінки, з яких 204 сторінки основного тексту, 12 сторінок списку використаної літератури та 7 сторінок додатків. Основний текст дисертації містить 87 рисунків та 20 таблиць.

Таким чином, робота є актуальним науково-прикладним дослідженням, спрямованим на підвищення ефективності шнекових турбін, що може знайти широке застосування не лише у сфері малої гідроенергетики, а й у будівельній та інженерній галузях, зокрема в автономних енергетичних системах та об'єктах інженерної інфраструктури.

РОЗДІЛ 1

СТАН, ПЕРСПЕКТИВИ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ МАЛОЇ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

1.1. Актуальність, переваги та перспективи розвитку малої гідроенергетики в контексті гідроенергетичного потенціалу малих річок України

Мала гідроенергетика є одним із найбільш освоєних напрямків використання відновлювальних джерел енергії. Вона дає змогу ефективно використовувати гідроенергетичний потенціал малих річок, притоків, а також систем водопостачання та іригації. Це дозволяє як інтегрувати енергію в централізовану енергосистему, так і забезпечувати локальне електропостачання у віддалених регіонах, особливо в країнах, що розвиваються, де обмежена інфраструктура централізованого енергопостачання.

Серед переваг малих МГЕС можна виділити невеликі інвестиційні витрати і короткі терміни будівництва, що сприяє швидкому отриманню прибутку, мінімальний вплив на довкілля, адже немає потреби у створенні великих водосховищ та масштабних затоплень територій, близькість до споживача та висока надійність.

Розвиток малої гідроенергетики також має довгострокові економічні переваги завдяки можливості диверсифікації енергетичних джерел та багатоцільового використання потенціалу малих річок.

Незважаючи на те, що економічні характеристики малих ГЕС поступаються великим, інтерес до них зростає. Основною причиною цього є відносно низькі капіталовкладення, які можуть бути покриті за рахунок приватного сектору, фермерських господарств та малих підприємств. Такі станції економічно вигідніші у країнах, що розвиваються, де низька вартість робочої сили зменшує витрати на будівельні роботи [2].

У даний час немає загальноприйнятого для всіх країн поняття малої гідроелектростанції, однак у багатьох країнах в якості основної характеристики такої ГЕС прийнята її встановлена потужність [3].

Ринок великих ГЕС визначають кілька виробників основного обладнання та велике число постачальників допоміжних компонентів і систем. На відміну від цього ринок малих гідроспоруд представлений значною кількістю виробників обладнання, яке більш технологічно для застосування величезного розмаїття конструкцій і нових матеріалів [2].

Малі гідроелектростанції можуть експлуатуватися до 50 років без істотних витрат на заміну обладнання. Інвестиційні витрати на будівництво малих ГЕС мають значні відмінності між промислово розвиненими і країнами, що розвиваються. В країнах, що розвиваються, наприклад, у зв'язку з низькою вартістю робочої сили витрати на загально будівельні роботи істотно менше, ніж у промислово розвинених країнах. При умовно рівній вартості обладнання і монтажних робіт будівництво гідроенергетичного комплексу в країнах, що розвиваються може бути економічно більш виправданим, ніж в розвинених країнах [3].

За прогнозами, до 2030 року виробництво електроенергії на малих ГЕС досягне 770-780 ТВт-год, що становитиме понад 2% світового виробництва електроенергії. Хоча темпи розвитку цієї галузі дещо сповільняться через обмеженість доступних гідроресурсів, мала гідроенергетика залишатиметься конкурентоспроможним і важливим компонентом відновлювальної енергетики [4].

Таким чином, мала гідроенергетика демонструє значний потенціал для сталого розвитку енергетичної галузі, особливо в умовах зростаючої потреби в локальному та екологічно чистому електропостачанні.

Наразі гідроенергетика залишається одним із найефективніших напрямків використання відновлюваних джерел енергії у світі, базуючись на перетворенні потенціальної та кінетичної енергії водного потоку в електричну. Незважаючи на багаторічний досвід використання малої гідроенергетики, цей

сектор енергетики продовжує активно розвиватися.

Згідно зі Звітом про розвиток малої гідроенергетики у світі [5], близько 66% глобального потенціалу малої гідроенергетики залишається невикористаним. Станом на 2021 рік загальна встановлена потужність малих гідроелектростанцій (МГЕС) потужністю до 10 МВт у світі досягала 78 ГВт.

До шістки країн-лідерів з виробництва електроенергії на малих ГЕС із встановленою потужністю до 10 МВт входять Китай (36 ГВт), Японія (2747 МВт), США (2191 МВт), Туреччина (961 МВт) Італія (769 МВт), і Норвегія (709 МВт) [4].

Гідроенергетичний потенціал малих гідроелектростанцій України оцінюється в 375 МВт, що становить лише 0,5% від загальносвітової встановленої потужності [5; 6].

В Інституті відновлюваної енергетики НАН України проведено масштабні дослідження природного та технічного потенціалів річок України з урахуванням соціально-екологічних вимог та природоохоронних обмежень. Аналіз охоплював усю територію країни, яка була умовно розділена на шість гідрологічних зон:

1. Українські Карпати – регіон із значним гідроенергетичним потенціалом завдяки річкам із високою швидкістю потоку та великим перепадом висот;
2. Західна зона – включає басейни річок Дністер, Прут і Західний Буг, що мають середній рівень потенціалу;
3. Поліська зона – характеризується рівнинними річками із низьким енергетичним потенціалом через невеликий перепад висот;
4. Правобережно-Дніпровська зона – включає басейни правих притоків Дніпра з помірним потенціалом;
5. Лівобережно-Дніпровська зона – охоплює ліві притоки Дніпра, які мають переважно низький потенціал через рівнинний рельєф;
6. Сіверсько-Донецько-Приазовська зона – регіон із низьким гідроенергетичним потенціалом [7].

Для всіх гідрологічних зон України було систематизовано характеристики річкового стоку за весь період спостережень. Розрахунки виконувались з використанням гідрологічної інформації по 273 пунктах виміру середньорічних витрат стоку малих річок, яка була отримана від Центральної геофізичної обсерваторії Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ЦГО) за період спостережень 1950–2010 років, та була доповнена довідниковими даними [8]. Загальна кількість гідрологічних пунктів під час досліджень була рівна 320, досліджувалося 166 річок.

Розрахункові дослідження, проведені за методикою, викладеною у роботі [8], дозволили оцінити технічний потенціал гідроенергетичних ресурсів малих річок всієї території України. Загальне значення потенціалу становить 1270 млн кВт·год/рік, що відповідає встановленій потужності малих гідроелектростанцій у 375 МВт. Розподіл технічного гідроенергетичного потенціалу за гідрологічними зонами України наочно представлено на рис. 1.1 [8].

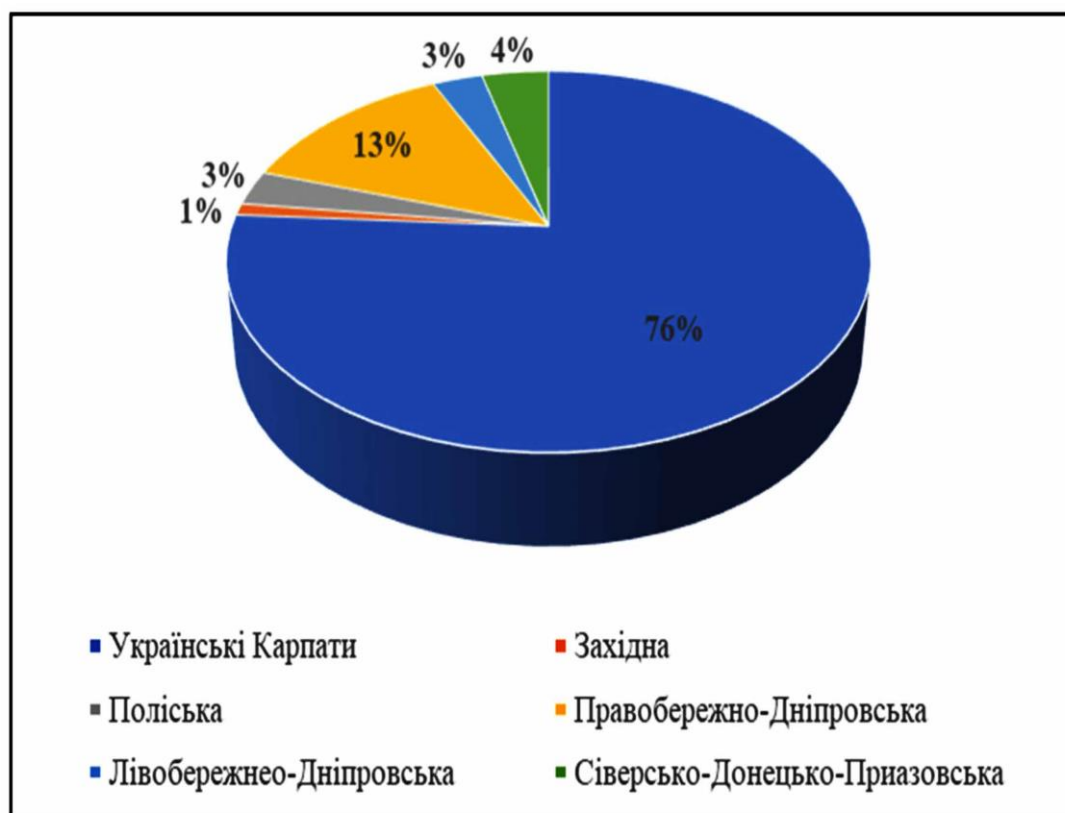


Рис. 1.1. Розподіл за гідрологічними зонами технічного гідроенергетичного потенціалу малих річок України

Дослідження технічного потенціалу гідроресурсів малих річок України виявили, що найбільша його частка зосереджена в Карпатському регіоні, який становить 76% від загального потенціалу. На другому місці за величиною знаходиться Правобережно-Дніпровська гідрологічна зона із показником 13%, тоді як на Лівобережній частині України цей потенціал становить лише 7% [8]. Хоча Західна та Поліська гідрологічні зони мають сумарний технічний потенціал лише 4%, будівництво малих ГЕС у цих регіонах є важливим для забезпечення їх комплексного розвитку. Створення малих гідроелектростанцій у цих районах сприяє розосередженню джерел енергії, підвищує енергетичну безпеку та сприяє стійкому розвитку місцевих громад.

Таким чином, попри нерівномірний розподіл гідроенергетичного потенціалу між регіонами України, ефективне його використання може зробити значний внесок у забезпечення локального енергопостачання та зменшення залежності від централізованих джерел енергії.

1.2. Існуючий стан використання малих гідроелектростанцій та перспективи їх розвитку в Україні

Незважаючи на нерівномірний розподіл гідроенергетичних ресурсів, енергія води використовувалася в Україні з давніх часів. На початку 1920-х років в Україні діяло 84 гідроелектростанції загальною встановленою потужністю 4000 кВт. До кінця 1929 року їх кількість збільшилася до 150, а сумарна потужність досягла 8400 кВт. Серед найбільших станцій того часу були Вознесенська (840 кВт), Бузька (570 кВт), Сутиська (1000 кВт) та інші. У 1934 році було введено в експлуатацію Корсунь-Шевченківську ГЕС потужністю 2650 кВт [8; 9].

Зокрема, в Українському Поліссі у 1939–1940 роках будувалися малі гідроелектростанції з використанням наявних гідротехнічних споруд, таких як греблі млинів, а також інколи встановлювалися гідротурбіни на млинах. У цей період були зведені такі станції, як Боярська в Київській області (15 кВт),

Літвіновичеська в Сумській області (35 кВт), Будищанська в Чернігівській області (60 кВт) та інші [8].

Наступні десятиліття електрифікація сільського господарства базувалася на розширенні потужностей та покращенні техніко-економічних показників малих гідроелектростанцій. На початку 1950-х років в Україні було вже 956 малих ГЕС загальною встановленою потужністю близько 30 тис. кВт [8; 9]. Однак, у зв'язку з розвитком централізованого електровиробництва та електропостачання, а також тенденцією до концентрації виробництва електроенергії на великих ТЕС і ГЕС, будівництво нових малих ГЕС було припинено. Багато з них було демонтовано, законсервовано, а сотні малих ГЕС зруйновано. Проте в цей період (1960-ті роки) в межах Українського Полісся було побудовано комплекс Київських ГЕС та ГАЕС з потужністю 408,5 МВт та 235,5 МВт відповідно.

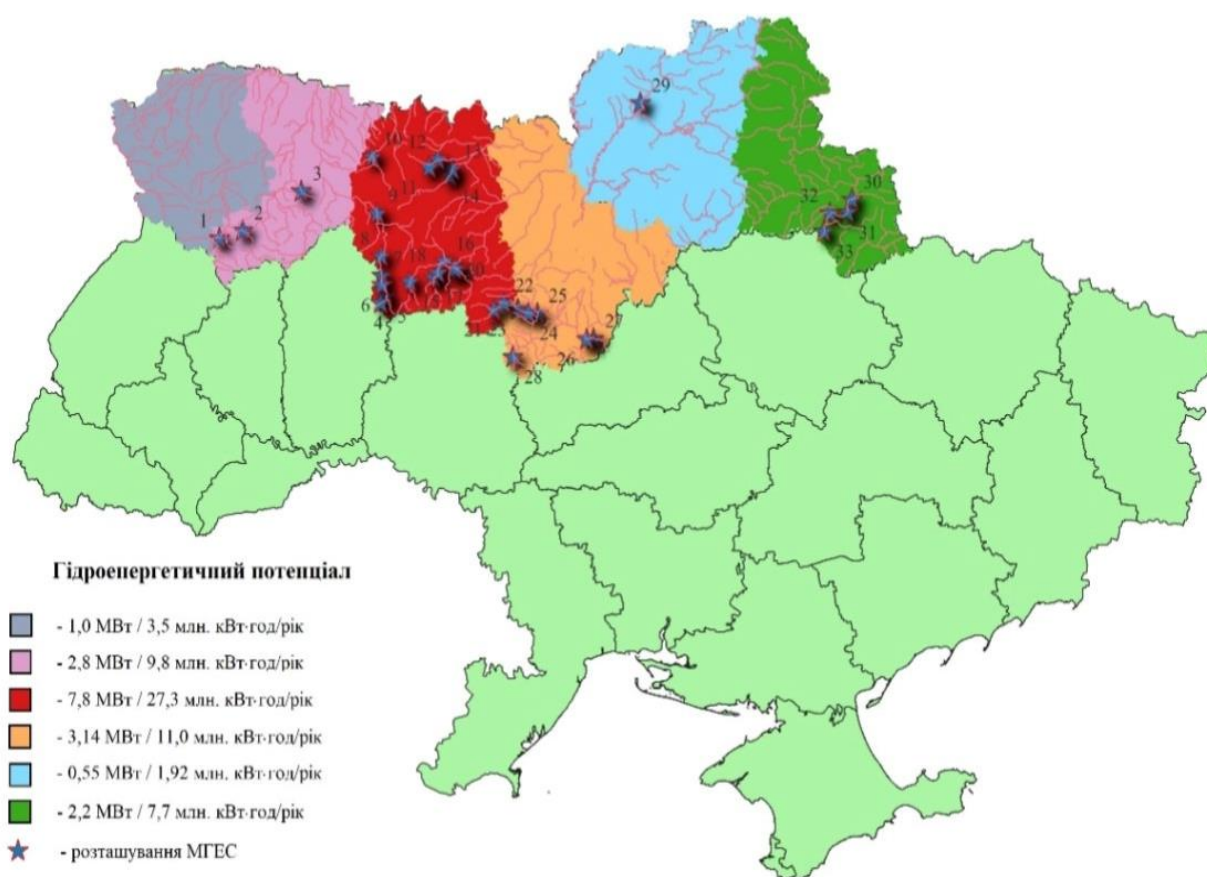
На початок 90-х років в Україні залишалось лише 49 діючих малих ГЕС, більшість з яких потребувала значної реконструкції [9; 10]. В рамках державних програм постійно розробляються проекти модернізації та реконструкції діючих малих ГЕС, будівництва нових малих ГЕС у районах з децентралізованим енергопостачанням, а також створення малих гідроелектростанцій у регіонах з централізованим енергопостачанням на існуючих перепадах річок, водотоків і водосховищ [9; 11].

Потенційні запаси енергетичних ресурсів річки називаються гідроенергетичним (загальним) потенціалом. Гідроенергетичний потенціал, з урахуванням втрат при його освоєнні, називається технічним потенціалом. Практичне значення має економічний (доцільний) потенціал, який представляє частину технічного потенціалу, що є доцільною для використання з урахуванням сучасного розвитку енергетики та перспектив на найближче майбутнє [12]. Енергетичний потенціал малих річок Українського Полісся наведено в таблиці 1.1 та зображено на рис. 1.2 [6; 13].

Таблиця 1.1

*Розподіл загального гідроенергетичного потенціалу малих річок
Українського Полісся*

Область	Технічний потенціал малих ГЕС	
	Потужність, МВт	Виробіток електричної енергії, млн кВт·год/рік
Волинська	1,0	3,5
Рівненська	2,8	9,8
Житомирська	7,8	27,3
Київська	3,14	11,0
Чернігівська	0,55	1,92
Сумська	2,2	7,7
Усього по Полісся	17,49	61,22



*Рис. 1.2. Гідроенергетичний потенціал та розташування малих ГЕС в
районах Українського Полісся [6; 13]*

Гідроенергетичний потенціал Житомирської області є порівняно високим серед інших областей Українського Полісся: тут протікає близько десяти середніх і багато малих річок, а також понад сорок водосховищ з сумарною площею дзеркала води 6756 га і корисною ємністю усіх водосховищ 135,66 млн м³. Однак на сьогоднішній день цей потенціал використаний лише на 60% [14]. У 1950-х роках на греблях в області було зведено більше 20 малих гідроелектростанцій загальною встановленою потужністю близько 5,0 МВт, які належали Міністерству сільського господарства колишньої УРСР, а точніше – колгоспам [14]. Значна частина з них зараз відновлена, але частина була зруйнована. Крім того, на річках Ірша, Уборть, Жерев, Случ, Словечна, Стружка в межах Житомирської області зведено греблі, на яких пропонується побудувати ряд малих гідроелектростанцій загальною потужністю 15–20 МВт [14].

Хоча зона Українського Полісся не має значних гідроенергетичних ресурсів порівняно з іншими гідрологічними зонами [8], розвиток малої гідроенергетики тут можливий завдяки наявним греблям на малих річках, загатам водяних млинів із водоскидами. Такі споруди можна використовувати як водозабори для малих ГЕС, що спрощує будівництво і скорочує терміни введення в експлуатацію. Малі гідроелектростанції мають високу окупність (у межах 2–3 років), тому їх експлуатація є економічно вигідною [14].

Наразі в областях, що входять до Українського Полісся, функціонує 33 малі гідроелектростанції (рис. 1.2, табл. 1.2) [13]. Проте їхній технічний стан викликає занепокоєння. Основне гідросилове, гідротехнічне та електротехнічне обладнання зазнало значного зношення. Існують проблеми із гідротехнічними спорудами напірного фронту, що можуть призводити до аварійних ситуацій. Спостерігається заростання та замулення водойм, зростає відбір води з водосховищ на неенергетичні цілі, а також відбуваються розмиви кріплень берегових і водозливних частин нижніх б'єфів.

Таблиця 1.2

*Список об'єктів малої гідроенергетики, розташованих в районі
Українського Полісся*

№ з/п	Назва	Встановлена потужність N, МВт	Річка
1	2	3	4
Рівненська область			
1	Млинівська ГЕС	0,38	Іква
2	Хрінницька ГЕС	0,9	Стир
3	ГЕС Рівневтормет	0,08	Замчисько
Житомирська область			
4	Пединківська ГЕС	0,4	Случ
5	Любарська ГЕС	0,2	Случ
6	Чортійська ГЕС	0,32	Случ
7	Миропільська ГЕС	0,58	Случ
8	МГЕС Баранівка	0,38	Случ
9	МГЕС Чижівка	0,62	Случ
10	Лопатицька ГЕС	0,25	Уборть
11	Лугинська ГЕС	0,26	Жерев
12	Повчанська ГЕС	0,15	Жерев
13	Бардівська ГЕС	0,18	Уж
14	Коростенська ГЕС	0,15	Уж
15	Чуднівська ГЕС	0,13	Тетерів
16	Мікро ГЕС Житомир	0,19	Тетерів
17	ГЕС Рудня-Городище	0,19	Гнилопять
18	Троянівська ГЕС	0,15	Гнилопять
19	Ліщинська ГЕС	0,09	Гуйва
20	Млинищенська ГЕС	0,18	Гуйва
21	Трубіївська ГЕС	0,13	Раставиця
22	Голуб'ятинська ГЕС	0,15	Раставиця
Київська область			
23	Дулицька ГЕС	0,16	Раставиця
24	Матюшівська ГЕС	0,1	Раставиця
25	ГЕС Гідро-Інвест	0,93	Рось
26	Дибинецька ГЕС	0,6	Рось
27	Богуславська ГЕС	1,7	Рось
28	МГЕС Гідроенерггоресурс	0,13	Роська
Чернігівська область			
29	Седнівська ГЕС	0,18	Снов

продовження табл. 1.2

1	2	3	4
Сумська область			
30	Низівська ГЕС	0,6	Псел
31	Ворожбянська ГЕС	0,4	Псел
32	Михайлівська ГЕС	0,26	Псел
33	Бобрівська ГЕС	0,25	Псел

Згідно з даними таблиці 1.2, технічний потенціал потужності та виробітку енергії в зоні Українського Полісся є відносно невеликим. Однак використання гідроенергетичних ресурсів малих річок у цьому регіоні є доцільним, враховуючи можливість отримання дешевої та екологічно чистої відновлюваної енергії, забезпечення енергопостачання локальних споживачів і скорочення довжини ліній електропередачі (ЛЕП). Крім того, відповідно до рішення Ради Міністрів Енергетичного Співтовариства D/2012/04/MC-EnC, Україна зобов'язалася до 2020 року забезпечити 11% енергії з відновлювальних джерел у загальній структурі енергопостачання. Мала гідроенергетика відіграє ключову роль у досягненні цих цілей, визначених Європейським Співтовариством [15].

Збільшення виробництва енергії на малих ГЕС останніми роками дещо уповільнилося через скорочення кількості потенційних інвесторів та зменшення гідроенергетичних ресурсів, спричинене змінами клімату. Проте стратегічні напрями розвитку малої гідроенергетики визначено у Енергетичній стратегії України до 2030 року та Енергетичній стратегії України до 2035 року, де встановлено такі ключові цілі [8; 11; 16]:

- відновлення малих ГЕС з гідротехнічними спорудами, що збереглися;
- реконструкція діючих малих ГЕС для підвищення їхньої ефективності;
- будівництво нових малих ГЕС на основі існуючих водосховищ господарського призначення;
- створення нових гідроелектростанцій на річках Тиса, Дністер та їхніх притоках для комплексного енергозабезпечення західних регіонів та захисту територій від паводків;

– типізація та стандартизація проектних рішень для нових малих ГЕС, що дозволить оптимізувати використання типового гідроенергетичного та електричного обладнання і скоротити капітальні витрати.

Ці заходи спрямовані на забезпечення стабільного розвитку малої гідроенергетики в умовах сучасних викликів.

Довгострокові переваги експлуатації та будівництва малих гідроелектростанцій включають [8]:

- зниження паливної складової в енергосистемі, що сприяє енергетичній незалежності;
- мінімізація техногенного впливу на довкілля завдяки зменшенню використання органічного та ядерного палива;
- раціональне використання енергоресурсів шляхом зниження темпів споживання непоновлюваних джерел;
- збільшення надходжень до місцевих бюджетів за рахунок податкових зборів;
- створення нових робочих місць та сприяння зайнятості населення;
- відновлення природних екосистем, включаючи ландшафти та акваторії водотоків, що позитивно впливає на місцеве довкілля.

Затвердження у 2009 році «зеленого» тарифу стало важливим стимулом для розвитку використання відновлювальних джерел енергії в місцевих громадах. «Зелений» тариф є економічно-політичним інструментом, що сприяє залученню інвестицій у проекти електроенергетики, які використовують альтернативні відновлювальні джерела енергії (за винятком доменного і коксівного газів; для гідроенергії – лише малі гідроелектростанції) [12].

Держава гарантує викуп всієї виробленої електроенергії з відновлювальних джерел за «зеленим» тарифом через оптовий ринок електроенергії. Для малих ГЕС тариф діє до 2030 року, а його розмір залежить від встановленої потужності станції та року її введення в експлуатацію, визначається НКРЕКП [17].

Будівництво малих ГЕС сприяє децентралізації об'єднаної енергосистеми, що дозволяє вирішувати проблеми електропостачання у важкодоступних регіонах. Окрім цього, місцеві громади отримують додаткові доходи від податків, а також нові робочі місця. Особлива увага приділяється проектам, які передбачають реконструкцію існуючих гідротехнічних споруд водосховища або технічних систем водовідведення, а також будівництво нових малих ГЕС.

Дослідження, описані у роботі [18], проводилися на малих гідроелектростанціях з активною потужністю генераторів від 85 кВт до 2,5 МВт, обладнаних тиристорними та електромашинними системами збудження. Експерименти охоплювали різні типи станцій: пригреблеві, дериваційні та руслові, які працюють при напорах від 2 до 12 м. Участь у випробуваннях брали малі ГЕС, що належать до АТ «Вінницяобленерго», АТ «Сумиобленерго» та АТ «Чернігівобленерго» [18].

Метою експерименту було моделювання роботи малої ГЕС в ізольованому режимі – без підключення до енергосистеми України. Станція мала забезпечувати електроенергією лише декілька навколишніх населених пунктів, що імітувало умови повного «блекауту» – одного з найскладніших режимів роботи енергосистеми.

Однією з основних умов експерименту було тестування запуску малої ГЕС з повністю відключеного стану. Це відповідає сценарію раптового застосування спеціальних графіків аварійного відключення (СГАВ), які часто впроваджуються в сучасних умовах. Згідно з цими графіками, час реакції становить лише три хвилини, що не дозволяє ГЕС отримати попередження і вчасно переключитися на ізольовану роботу [18].

Результати експерименту підтвердили успішність такого режиму роботи, що свідчить про ефективність і доцільність використання малих гідроелектростанцій для забезпечення енергопостачання локальних споживачів навіть у кризових ситуаціях.

Серед ключових факторів, що стримують розвиток малої

гідроенергетики в Україні, експерти виділяють наступне [19]:

- недостатню поінформованість потенційних користувачів щодо переваг використання малих гідроенергетичних об'єктів;
- недостатнє вивчення гідрологічного режиму та обсягів стоку малих водотоків;
- низьку якість чинних методик і рекомендацій, що призводить до серйозних помилок у розрахунках;
- відсутність розроблених методик оцінки та прогнозування можливого впливу МГЕС на навколишнє середовище та господарську діяльність;
- слабку виробничу і ремонтну базу підприємств, що випускають гідроенергетичне обладнання для малих ГЕС;
- необхідність переходу від індивідуального проектування до серійного виробництва обладнання, що забезпечить масове будівництво малих ГЕС;
- відсутність якісно нових підходів до забезпечення надійності та зниження вартості обладнання, яке повинно відповідати сучасним вимогам і перевищувати характеристики застарілих об'єктів, що були виведені з експлуатації.

Усунення цих перешкод є важливою умовою для активізації розвитку малої гідроенергетики в Україні [19].

1.3. Типи малих ГЕС та класифікація гідротурбін

Малі гідроелектростанції мають змогу використовувати потенціал гідроенергетичних ресурсів малих і середніх річок, окремих ділянок великих річок, а також гідротехнічних об'єктів неенергетичного призначення: водосховища, перепади рівнів на ділянках іригаційних каналів, водопровідні споруди, судноплавні канали, перепади на відвідних трактах систем технічного водопостачання АЕС, ТЕС та очисних споруд.

Річки класифікують як малі, середні або великі залежно від географічних характеристик: довжини річки, площі басейну водозбору, об'єму стоку.

Альтернативним підходом є поділ річок за масштабами їх використання в різних галузях, таких як гідроенергетика, річковий транспорт або зрошення.

За природними ознаками до категорій малих і середніх річок відносять такі річки, водозбірна площа яких має сталість кліматичних, геологічних умов, рослинного покриву та рельєфу місцевості на всьому протязі. До категорії великих відносяться всі річки, що не володіють зазначеними властивостями, тобто такі умови водозбору, які постійно змінюються. У таблиці 1.3 наводиться можлива класифікація річок за вищенаведеними ознаками [20].

Таблиця 1.3

Класифікація річок за географічними ознаками та можливим господарським використанням.

Категорія річок	Географічні ознаки				Можливе господарське використання		
	Водозбірна площа басейну, км ²	Середня довжина річки, км	Середня глибина русла, м	Середня річна витрата води	ГЕС, МВт	Зрошення, тис. га	Глибина водного шляху, м
Малі річки							
1-ша	< 8	250	<0,5-1,0	< 8	<0,1	< 1	< 0,4-0,5
2-га	8-23	150-400	0,5-1,5	10-50	0,1-1	1-5	0,5-0,7
Середні річки							
1-ша	15-60	До 400	0,7-2,5	10-80	1-5	5-25	0,7-1
2-га	До 80	До 700	1-3	50-200	5-25	25-100	1-1,5
Великі річки							
	> 80	-	-	-	25-250	100-250	1,5-2

За своїм призначенням, режимом роботи і розташуванню в загальній схемі електропостачання споживачів, малі ГЕС поділяються на системні та автономні.

Верхня межа потужності малої гідроелектростанції (МГЕС) варіюється в різних країнах і визначається рядом факторів. Вона залежить від рівня розвитку енергетичного господарства, особливостей обґрунтування проектів малих ГЕС і процедурними аспектами ліцензування, обсягів доступного оборотного капіталу і реалізацією програм структурування малої

гідроенергетики. В табл. 1.4 наведено класифікацію гідроелектростанцій малої потужності [21].

Таблиця 1.4

Класифікація ГЕС малої потужності у світовій практиці

Країни і організації	Малі ГЕС, кВт	Міні-ГЕС, кВт	Мікро- ГЕС,
IN-SHP (Міжнародна мережа малої гідроенергетики)	501–10000	101–500	<100
UNIDO (Організація розвитку промисловості об'єднаних націй)	2001–10000	101–2000	<100
ESHA (Європейська асоціація малої гідроенергетики)	<15000	-	-
OLADE (Латиноамериканська енергетична організація)	501–5000	51–500	<50
Китай	501–	101–500	<100
Швеція	101–	-	-
США	<15000	501–2000	<500
Індія	<25000	<2000	<100
В'єтнам	501–5000	51–500	<50
Японія	<10000	-	-
Франція	2001–	501–2000	<500
Індонезія	<5000	-	-
Норвегія	<10000	-	-
Канада	<30000	<1000	-
Аргентина	<5000	<1000	-
Бразилія	<10000	-	-
Італія	<3000	-	-
Україна	<10000	<1000	<200

Окрім перерахованих типів гідроелектростанцій, варто виокремити ще одну категорію – мобільні ГЕС. Їхнє проектування та будівництво здійснюється за тими ж основними принципами, що й для великих ГЕС. Проте мікро-ГЕС, потужність яких становить кілька десятків кіловат, мають інші підходи до створення схем, складу та компонування гідротехнічних споруд. До цієї категорії відносяться різні типи компактних і блочних ГЕС, зокрема: безгреблеві, рукавні, переносні, вільно-потокові. Такі установки дозволяють гнучко адаптуватися до умов експлуатації і розширюють можливості

використання гідроенергетичних ресурсів у важкодоступних або ізольованих регіонах [20].

Відома і більш детальна класифікація ГЕС малої гідроенергетики залежно від їхньої встановленої потужності [21]:

- малі ГЕС – від 1 МВт до 10 МВт;
- міні ГЕС – від 100 кВт до 1 МВт;
- мікро ГЕС – від 5 кВт до 100 кВт;
- піко ГЕС – до 5 кВт.

По конструктивному виконанню ГЕС малої потужності прийнято поділяти на [23]:

– греблеві, використовують для створення напору греблі або будівлі ГЕС. В залежності від розташування ГЕС розрізняють пригребельні і руслові гідроелектростанції;

– дериваційні, які використовують потенційну енергію тиску води в трубопроводі або каналі;

– вільнопоточні, в яких встановлюється безпосередньо гідротурбіна в річковий потік без будь-яких гідротехнічних споруд і працює за рахунок його кінетичної енергії.

Малі ГЕС за рівнем напору поділяться на низьконапірні, середньонапірні та високонапірні. Граничні значення напору для кожної категорії в різних літературних джерелах різні.

Ряд зарубіжних і вітчизняних машинобудівних фірм та проектних організацій пропонують граничні значення напорів, ґрунтуючись на своїх розробках та характеристиках турбінного устаткування.

Узагальнюючи ці дані, можна наступним чином класифікувати МГЕС за напором [20]:

- низьконапірні $H < 20$ м;
- середньонапірні $H = 20 - 100$ м;
- високонапірні $H > 100$ м.

До складу гідроенергетичних об'єктів входять гідроагрегати, які

безпосередньо виробляють електричну енергію. Гідроагрегат складається з двох основних частин: гідротурбіни, що перетворює енергію потоку води в механічну енергію обертання, та електричного генератора, який перетворює цю механічну енергію в електричну [7].

Гідравлічна турбіна [24] – це механічний пристрій, призначений для перетворення енергії рухомої води (потенціальної, кінетичної або їх комбінації) у механічну енергію обертання робочого колеса, яка може використовуватися для приводу генераторів електроенергії або інших механізмів.

За принципом дії гідротурбіни прийнято поділяти на класи, системи, типи і серії. Існує два основних класи гідротурбін: активні й реактивні.

Якщо в гідротурбінах використовується лише кінетична енергія потоку, такі турбіни називаються активними. У них вода надходить на робоче колесо без надлишкового тиску, і майже весь наявний тиск перетворюється на швидкість для досягнення високого ККД.

Реактивні турбіни, навпаки, частково або повністю використовують потенційну енергію потоку. У цих турбінах процес перетворення енергії на робочому колесі відбувається із залишковим тиском. Вони також використовують кінетичну енергію потоку, забезпечуючи ефективну передачу енергії через комбіноване використання тиску та швидкості [25].

До класу активних турбін належать системи ковшових, похило – струменевих турбін, шнекових турбін та турбін подвійної дії.

Клас реактивних турбін входять наступні системи: осьові-пропелерні і діагональні, поворотно – лопатеві, поворотно – лопатеві та радіально – осьові турбіни.

Всі турбіни умовно поділяються на малі, середні і великі. До малих турбін належать ті, у яких діаметр робочого колеса $D < 1,2$ м при низьких напорах і $D < 0,5$ м при високих, а потужність становить не більше 1000 кВт. До середніх – ті турбіни, у яких $1,2 < D < 2,5$ м при низьких напорах і $0,5 < D < 1,6$ м при високих, а потужність $1000 < N < 15000$ кВт. До великих турбін

відносяться ті, які мають D і N більше, ніж у середніх [25].

Сучасне гідротурбобудування орієнтоване на розвиток і вдосконалення за такими основними напрямками [25]:

- підвищення економічності та надійності під час експлуатації;
- збільшення швидкохідності гідротурбін для досягнення необхідної розрахункової потужності при менших габаритах і вазі агрегатів. Це сприяє зменшенню вартості енергетичного обладнання та спорудження ГЕС;
- поліпшення енергетичних характеристик, зокрема підвищення середнього експлуатаційного ККД гідроагрегатів;
- покращення кавітаційних характеристик, що зменшує руйнування проточних частин, дозволяє знизити рівень установки турбіни щодо нижнього б'єфу, та знижує витрати на будівництво;
- зниження пульсацій тиску в проточній частині (особливо за робочим колесом радіально-осьових турбін) і супутніх вібрацій агрегатів;
- збільшення одиничної потужності гідроагрегатів, що дозволяє зменшити їхню кількість, підвищити ККД і зменшити вартість обладнання та будівництва ГЕС.

Якщо для заданого діапазону напорів і умов роботи ГЕС можливо використання кількох типів гідротурбін або робочих коліс, то для визначення найкращого рішення потрібно виконати техніко-економічний аналіз різного енергетичного обладнання. Процес вибору оптимального варіанта передбачає:

- порівняння енергетичних характеристик (ККД, швидкохідність, кавітаційна стійкість);
- аналіз витрат на експлуатацію та обслуговування (очікуваний термін служби, вартість ремонту, споживання ресурсів для обслуговування);
- оцінка капітальних витрат (вартість обладнання, затрати на монтаж, будівельні роботи, пов'язані з адаптацією турбіни до умов ГЕС);
- розгляд екологічних аспектів (вплив на навколишнє середовище, рівень шуму, збереження природних ресурсів);
- моделювання роботи обладнання в реальних умовах (випробування

прототипів або використання наявних даних з інших ГЕС із подібними умовами).

На основі результатів техніко-економічного аналізу обирається турбіна чи робоче колесо, яке забезпечує найвищу енергоефективність за оптимальної вартості і мінімального впливу на довкілля.

1.4. Обладнання малих гідроелектростанцій

1.4.1. Турбіни різних виробників

Турбіна компанії Andritz Hydro

Зазначимо, що оптимальний вибір конструктивних параметрів для забезпечення виживання риби може дещо відрізнятися від тих дизайнерських міркувань, в яких головним завданням є максимізація енергетичного виробництва або мінімізація витрат.

Австрійська компанія Andritz Hydro [27] є одним із провідних світових постачальників електромеханічного обладнання та послуг для гідроелектростанцій. Вона займає ключові позиції у впровадженні сучасних технологій для підвищення ефективності роботи гідроенергетичних систем, водночас приділяючи особливу увагу екологічним аспектам експлуатації.

Одним із стратегічних напрямів діяльності компанії є розробка технологій, спрямованих на збереження життєздатності рибних популяцій, що взаємодіють із гідроенергетичними установками. Для цього Andritz Hydro застосовує комплексну стратегію fish-friendly, орієнтовану на мінімізацію механічних травм риб, які можуть виникати під час їх проходження через турбіни [28].

Fish-friendly технології в гідротурбінах. Ключовою складовою цієї стратегії є інтеграція конструктивних особливостей агрегатів, які допомагають зменшити механічний вплив на рибу під час її переміщення у водному потоці. Основними стресовими факторами, що можуть спричинити травмування, є: –

різкі перепади тиску, що можуть призвести до баротравм і фізіологічних пошкоджень організму риби. – контакт із лопатями турбіни, який потенційно спричиняє механічні ушкодження. – турбулентні зони потоку, що створюють сильні гідродинамічні навантаження та можуть негативно впливати на природні рухові рефлексії риб.

Інженерні рішення для підвищення виживаності риб. Для зниження ризиків травмування компанія Andritz Hydro впроваджує низку конструктивних удосконалень, серед яких:

- оптимізовані геометричні параметри лопатей, що зменшують зсувні навантаження та забезпечують плавний перехід водного потоку через турбіну;
- зменшення зон високого турбулентного навантаження, що дозволяє уникати хаотичних рухів води в області проходження риб;
- розробка гідродинамічно вивірених каналів проходу, що знижують можливість механічного контакту з обертовими частинами.

Баланс між енергоефективністю та екологічною безпекою. Важливо зазначити, що оптимальний вибір конструктивних параметрів для забезпечення виживання риби може суттєво відрізнятися від тих дизайнерських рішень, де головним завданням є максимізація енергетичного виробництва або мінімізація витрат. Досягнення балансу між ефективністю турбіни та її екологічною безпекою вимагає ретельного аналізу гідродинамічних процесів, розробки спеціальних технічних рішень та проведення масштабних експериментальних досліджень (рис. 1.3).

Технології fish-friendly, розроблені компанією, активно впроваджуються у гідроенергетичних проектах по всьому світу, сприяючи підвищенню екологічної стійкості гідроелектростанцій. У перспективі подальший розвиток цієї концепції може призвести до створення нових поколінь турбін, що поєднують високу енергетичну ефективність із мінімальним впливом на навколишнє середовище.

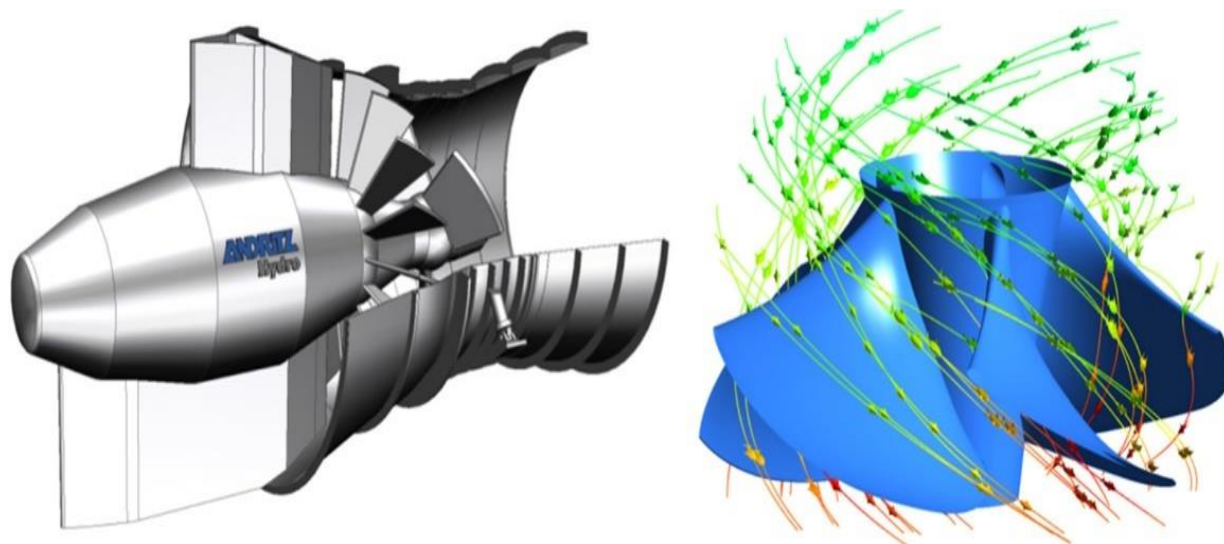


Рис. 1.3. Гідротурбіна fish-friendly компанії Andritz Hydro

Турбіна компанії Mavel

Компанія Mavel [29], яка є провідним світовим виробником гідротурбін, здійснює свою діяльність на сучасних виробничих потужностях у Чеській Республіці. Вона спеціалізується на розробці та виробництві гідротурбін і супутнього обладнання для гідроелектростанцій з потужністю від 30 кВт до 30 МВт.

Продуктовий ряд компанії охоплює широкий спектр гідротурбін, серед яких:

- поворотно-лопатеві турбіни, що забезпечують гнучке регулювання робочих параметрів;
- радіально-осьові турбіни, які використовуються у гідроелектростанціях з середнім напором;
- ковшові турбіни, оптимальні для високонапірних ГЕС;
- модульні гідротурбіни, що демонструють високу адаптивність у малих гідроенергетичних системах.

Одним з інноваційних рішень компанії Mavel є модульна мікротурбіна (рис. 1.4), спеціально розроблена для гідровузлів з низьким напором і невеликою витратою води. Ця гідротурбіна використовує технологію сифона

і оснащена робочим колесом поворотно-лопатевого типу з чотирма регульованими вручну лопатями. Робоче колесо з'єднується з асинхронним генератором через передачу або безпосередньо, що дозволяє оптимізувати обертання гідротурбіни та генератора відповідно до умов конкретної ГЕС, забезпечуючи максимальну ефективність при змінних експлуатаційних умовах.

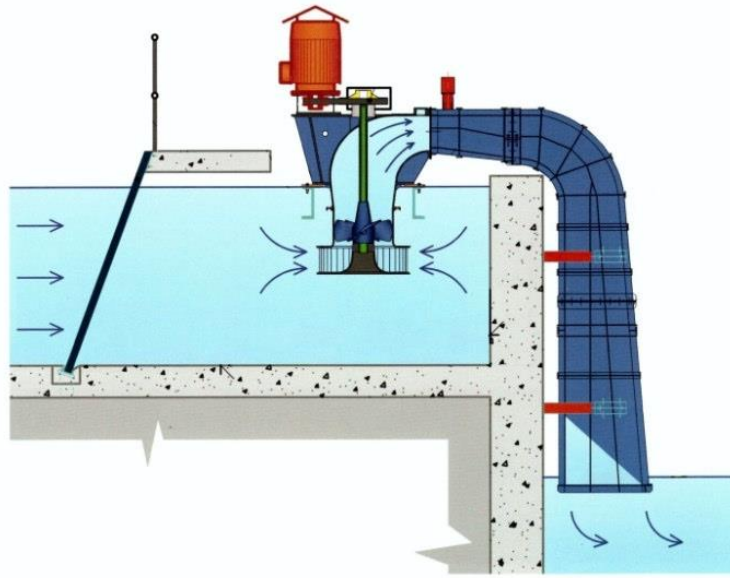


Рис. 1.4. Модульна гідротурбіна сифонного типу

За останні 20 років компанія Mavel встановила понад 65 мікротурбін у таких країнах, як Болгарія, Чеська Республіка, Фінляндія, Італія, Японія, Латвія, Німеччина, Польща, Словаччина, Словенія, США та Україна [7].

До переваг гідротурбін Mavel (TM Micro) слід віднести такі характеристики, як модульна конструкція, що дозволяє зручне та швидке встановлення без необхідності в окремій машинній залі, а також можливість ручного налаштування лопатей робочого колеса для досягнення оптимальних експлуатаційних параметрів. Використання технології сифону забезпечує високу ефективність турбіни, а надійна конструкція гарантує стабільну роботу в умовах різних гідравлічних режимів [30].

Комплектація гідротурбіни Mavel включає:

–гідротурбіну;

- генератор;
- тяговий механізм;
- автоматизовану систему керування, що дозволяє ефективно управляти процесом виробництва енергії та забезпечує високу автоматизацію експлуатації (рис. 1.5).



*Рис. 1.5. Гідроелектростанція Olawa II
(3 x TM10 Modular Micro $H = 4,0 \text{ m}$; $Q = 11,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $N = 300 \text{ kW}$)[31].*

Впровадження технологій Mavel в Україні. Гідроагрегати компанії Mavel були встановлені після реконструкції на Новошицькій малій гідроелектростанції, розташованій на річці Бистриця Тисменицька поблизу села Новошичі в Дрогобицькому районі Львівської області.

Цей проект демонструє успішне впровадження сучасних технологій для підвищення ефективності виробництва енергії на малих гідроелектростанціях в Україні. Реалізація таких інженерних рішень сприяє розвитку автономної генерації електроенергії у віддалених регіонах та забезпечує екологічну стійкість вітчизняних ГЕС.

Турбіна виробництва WTW Poland sp. z o.o.

Польська компанія WTW є провідним польським виробником турбін, а також механічного і електричного обладнання для малих гідроелектростанцій, що почала свою діяльність з 1986 року [32]. Проекти гідротурбін розробляються з використанням сучасних програм для 3D-моделювання, що

дозволяє точно розраховувати та оптимізувати конструкцію турбін і іншого обладнання для електростанцій. Для виготовлення турбін та комплектуючих використовуються матеріали і компоненти від провідних світових виробників, що гарантує високу якість та надійність продукції.

Завдяки реалізації проекту ЄС «Впровадження інноваційного виробництва гідротурбін на WTW Poland sp. z o. o. In Bartoszyce», було розроблено для виробництва, новий тип водяної турбіни AX3L (рис. 1.6), з новаторською конструкцією, яка характеризується [33]:

- інноваційна конструкція турбіни AX3L – є результатом власного винаходу WTW (авторське право № PAT.224665);
- підвищена міцність турбіни, збільшує гарантійний термін експлуатації до 10 років;
- можливість отримання максимальної енергоефективності водного потоку, починаючи від величини перепаду схилу в 1,5 м;
- відсутність перевантаження підшипників надмірною напругою;
- більш високе теплове розширення валу;
- підвищена стабільність роботи турбіни;
- збільшені періоди між необхідністю технічного обслуговування турбіни, завдяки можливості постійного контролю ресурсу підшипників;
- зменшення виникнення небажаних вібрації на валу.

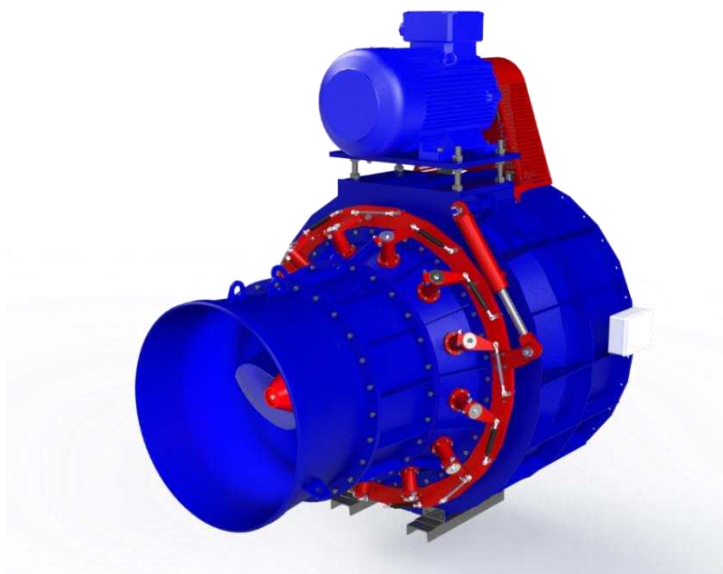


Рис. 1.6. Турбіна AX3L з горизонтальним валом

Ця сучасна турбіна (Рис. 1.6) з прямим осьовим потоком води характеризується підвищенням ККД порівняно з класичними рішеннями. Застосовані технічні рішення дозволяють отримати більшу швидкість потоку через турбіну (при тому ж діаметрі ротора) [33]. Турбіна AX3L рекомендована для низьконапірних електростанцій з напорами 1,5–5,0 м, витратами води 2–14 м³/с, потужністю до 600 кВт і діаметром робочого колеса 830–1640 мм.. Лопаті ротора виготовлені з нержавіючої сталі. Робочі лопатки і маточина робочого колеса виготовлені з чавуну кулястої форми. Турбіна оснащена датчиками температури підшипників, датчиками вібрацій підшипників, датчиком оборотів та потенціометрами [33].

Всмоктувальна турбіна Шаубергера

Досить перспективні та актуальні гіпотези та моделі створював маловідомий винахідник Шаубергер [34], який проголосив: «У здоровому механізмі немає жодних прямих ліній і правильних кіл». Цим він хотів сказати, що дизайн та форма його винаходів засновані на абсолютно іншому способі моделювання. Він відмовився від мертвих Евклідових фігур. Діючі та функціональні конструкції та форми його винаходів складаються із закручених спіралей та вигинів, доступних елементів «неевклідової» геометрії, що переважають у природі. Завдяки об'єднанню таких спіральних конфігурацій та яйцеподібних форм у його винаходах виробляються різні життєствердні форми енергії, на відміну від тих, які сьогодні генеруються традиційними механізмами та досить часто руйнують життя навколишнього середовища. Ці види енергій та сили здатні не тільки реабілітувати, стабілізувати природні процеси, а й сприяти розвитку нашої цивілізації. Широке застосування їх життєдайної енергії могло б багато в чому сприяти відновленню екологічного балансу Землі, який так відчутно вивела з ладу бездумна людська діяльність [35].

Шаубергер доводив, що сучасні механізми діють за допомогою відцентрового руху, що спричиняє опір реактивному руху, завдяки чому значення швидкості обертання зводиться в квадрат. У певному сенсі це може

інтерпретуватись як надпотужне природне гальмування. З використанням його патентованих гвинтів всмоктування (рис. 1.7, 1.8) [36] робота та ефективність збільшені в тому самому відношенні через молекулярні процеси, підвищеної якості, що в результаті може бути вироблення енергії понад одиницю.

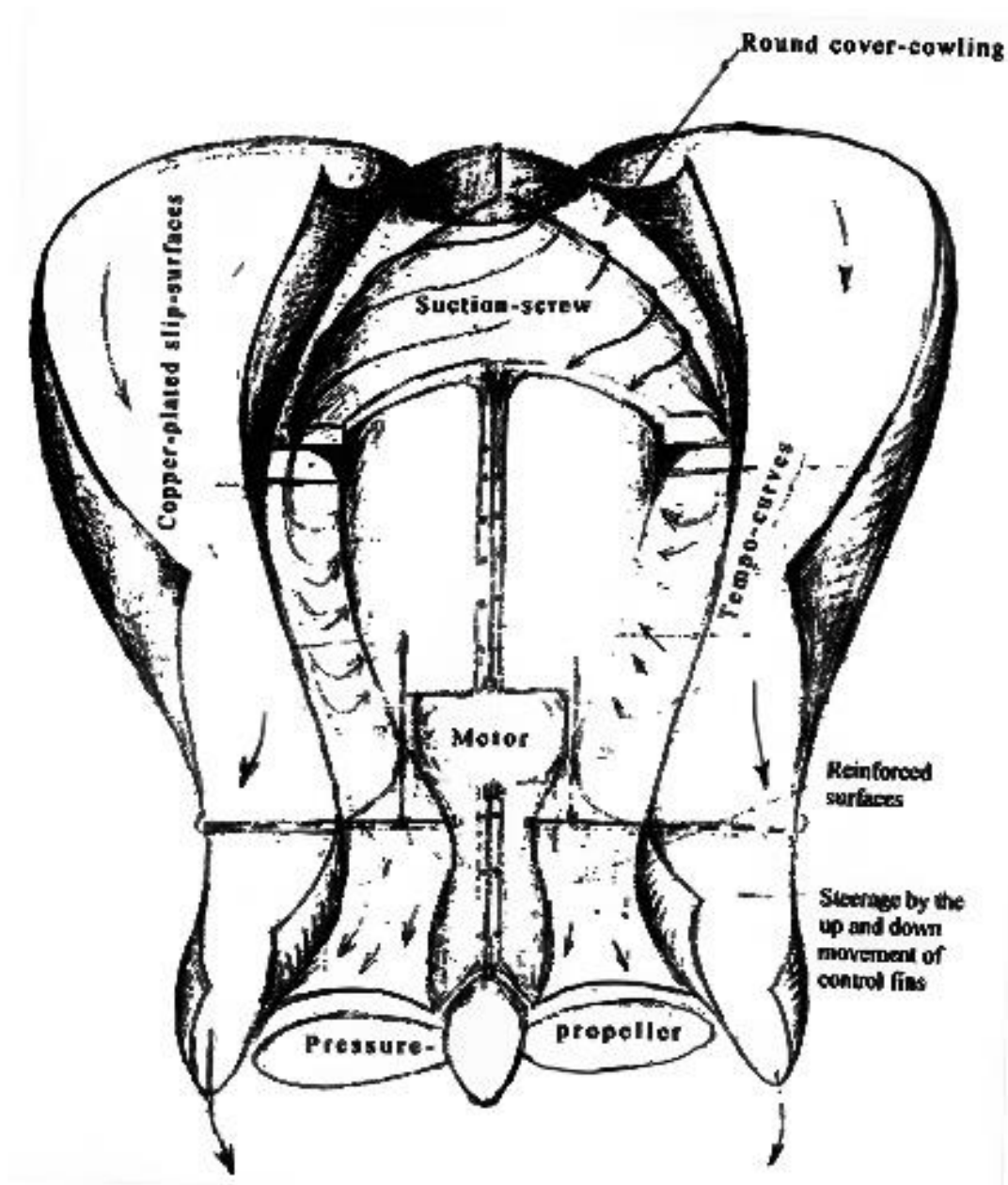


Рис. 1.7. Ескіз всмоктувальної турбіни Шаурбергера (турбіна-Форель) [36]

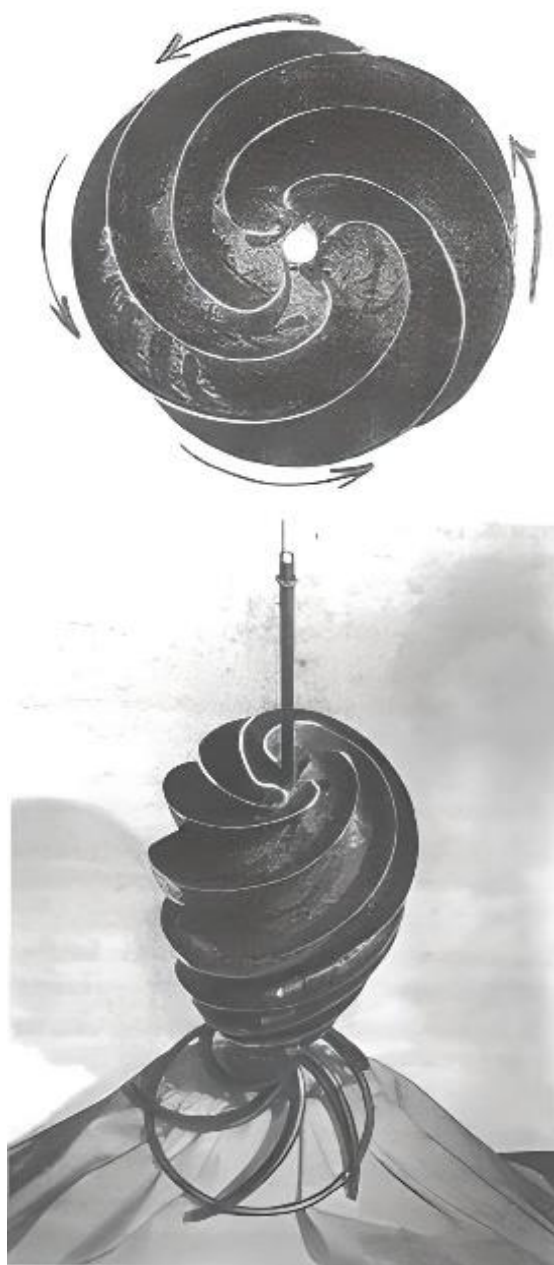


Рис. 1.8. Ескіз ротора всмоктувальної турбіни Шаурбергера [36]

Ротор гвинта всмоктування, що звужується до основи. Незважаючи на те, що він працює під водним тиском, потік речовини, що проходить через нього, не руйнується завдяки тому, що тут переважає доцентровий рух, що викликає зниження температурного градієнта. Вода таким чином стає насичена магнітними зарядами та містить аморфні структури, а вміст пов'язаного кисню у ній перевищує кількість ніж у вільно-динамічній системі. У круглих трубах наших водопроводів вода не може завихрюватися належним чином, вона стає безсмачною та неживою. [35]

Турбіна «Ротор Оніпка»

Досить схожим на дослідження Віктора Шаубергера виявився винахід українського вченого Олексія Оніпка [37], відомий як ротор Оніпка [38]. Особливістю його конструкції є незвичайна форма, яка забезпечує високу ефективність роботи пристрою, одночасно роблячи його практично безшумним. Оніпко відмовився від традиційних лопатей, запропонувавши замість них об'ємні спіралі різного діаметра, які можна розміщувати на різних висотах (рис. 1.9). Висока продуктивність цього пристрою стала результатом інноваційної форми, яку сам учений називає «природною». Завдяки такому дизайну, ротор здатний генерувати електричну енергію навіть при невеликих потоках середовища, що робить його надзвичайно ефективним і адаптованим до різних умов експлуатації.

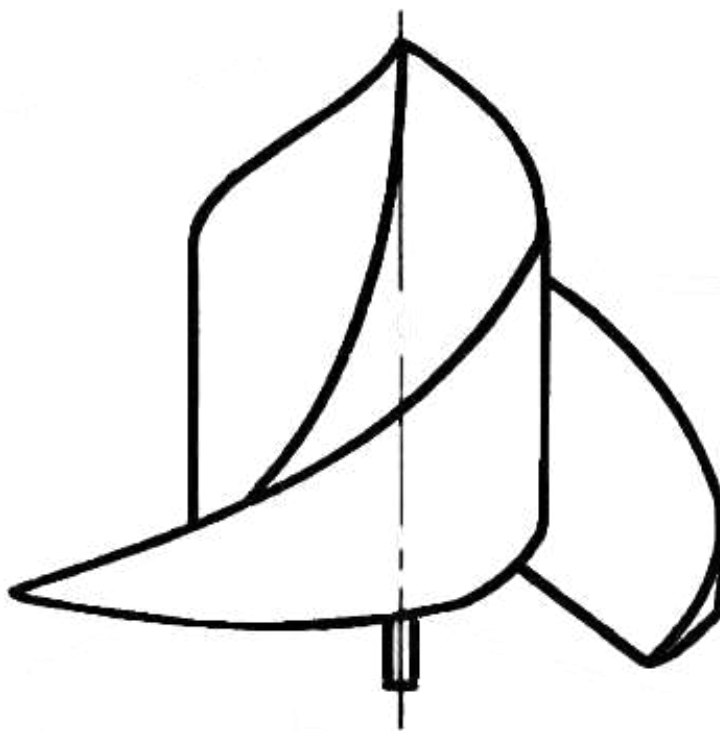


Рис. 1.9. Ескіз ротора Оніпка

Форма турбіни «Ротора Оніпка» була задумана так, щоб забрати абсолютно все, що дає вітер. Оригінальність цієї форми ротора саме в тому, що він починає обертатися при швидкості вітру від 0,1 м / с. [38]



Рис. 1.10. Експериментальні дослідження Ротора Оніко

Максимальне використання енергії вітру та здатність пристрою реагувати на рухи повітря з малими швидкостями обумовлені тим, що, на відміну від класичних пропелерних роторах, де енергія, що виробляється, визначається лише швидкістю вітру і площею, яку охоплює вітроколесо, в «Роторі Оніпка» важливу роль у виробленні енергії відіграє не тільки обмінювана площа, а й увесь об'єм ротора (рис.1.10). Така конструктивна особливість дозволяє більш ефективно використовувати енергію вітру, оскільки ротори Оніпка можуть активно взаємодіяти з більшою кількістю повітряних потоків навіть при низьких швидкостях вітру, що значно збільшує ефективність генерування енергії [39].

Шнекова турбіна

Шнекові турбіни також встановлюються на мікро ГЕС, оскільки вони є найпрактичнішим і ефективним джерелом електроенергії для сучасних гідроелектростанцій малої потужності.

Перша гвинтова турбіна була розроблена та виготовлена в 1997 році в Чехії. Така технологія забезпечує високу ефективність при низьких витратах води та незначних напорах, що робить шнекові турбіни ідеальним рішенням

для малих гідроелектростанцій, де традиційні турбіни можуть бути неефективними [40].

Гвинтова (шнекова) турбіна [41] – це гравітаційна механічна машина, яка перетворює потенційну енергію (падіння) водного потоку в механічну енергію, а потім, завдяки редуктору і генератору, в електричну. Вода зі струмка стікає по руслу в жолоб гвинтової турбіни, нахилений під певним кутом. Своєю вагою він діє на лопаті гвинтової частини ротора турбіни і повільно обертає всю турбіну. Продуктивність турбіни залежить від витрати і напору води. [42]

У 2010 році компанія GESS-CZ (Чеська Республіка) розробила та запустила у виробництво гвинтові турбіни [43], що стали відносно новою технологією, основою на принципі стародавнього насоса – гвинтового насоса Архімеда, який обертається в зворотному напрямку (рис. 1.11). Гвинтова турбіна є гравітаційною механічною машиною, що перетворює потенціальну енергію водного потоку в механічну енергію, а потім, за допомогою редуктора та генератора, у електричну енергію. Вода, що протікає по руслу, потрапляє в жолоб шнекової турбіни, нахилений під певним кутом. Своєю вагою вона впливає на лопаті гвинтової частини ротора, що забезпечує повільне обертання турбіни та ефективне виробництво електроенергії.

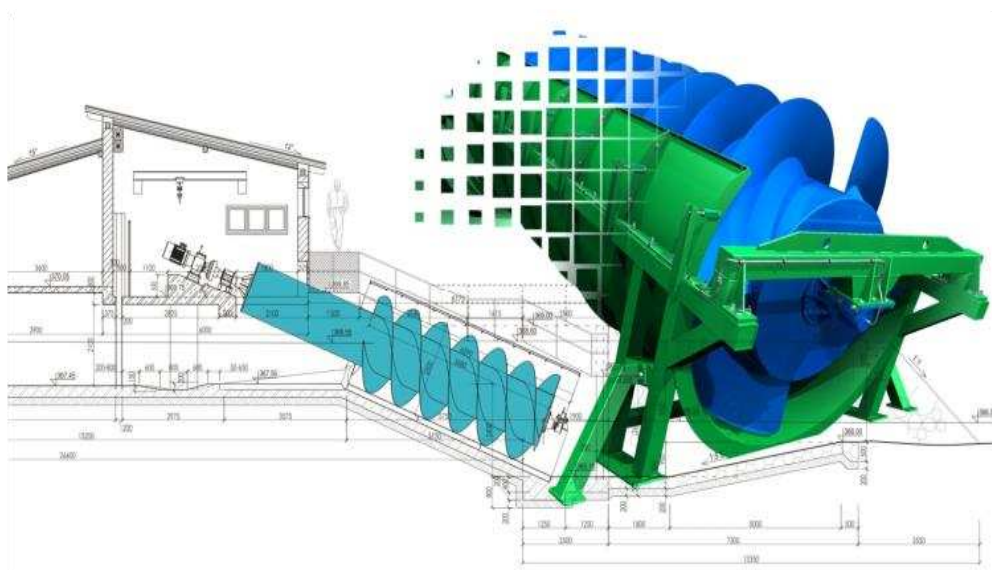


Рис. 1.11. Приклад компоновки будівлі МГЕС з гвинтовою турбіною

Переваги: простота конструкції, довговічність, корисна ефективність починається з 20% номінальної потужності (ККД 74%), безвідмовна при низьких витратах, простота обслуговування, нескладний доступ до робочої частини турбіни, можливість установки на низьконапірних гідровузлах (від 1,1 м), не потребує дрібну сміттєзатримуючу решітку, можливість установки на водозливах, покращує якість води у водотоці (рис. 1.12). Реалізації проектів шнекових турбін можна знайти практично по всій Європі.

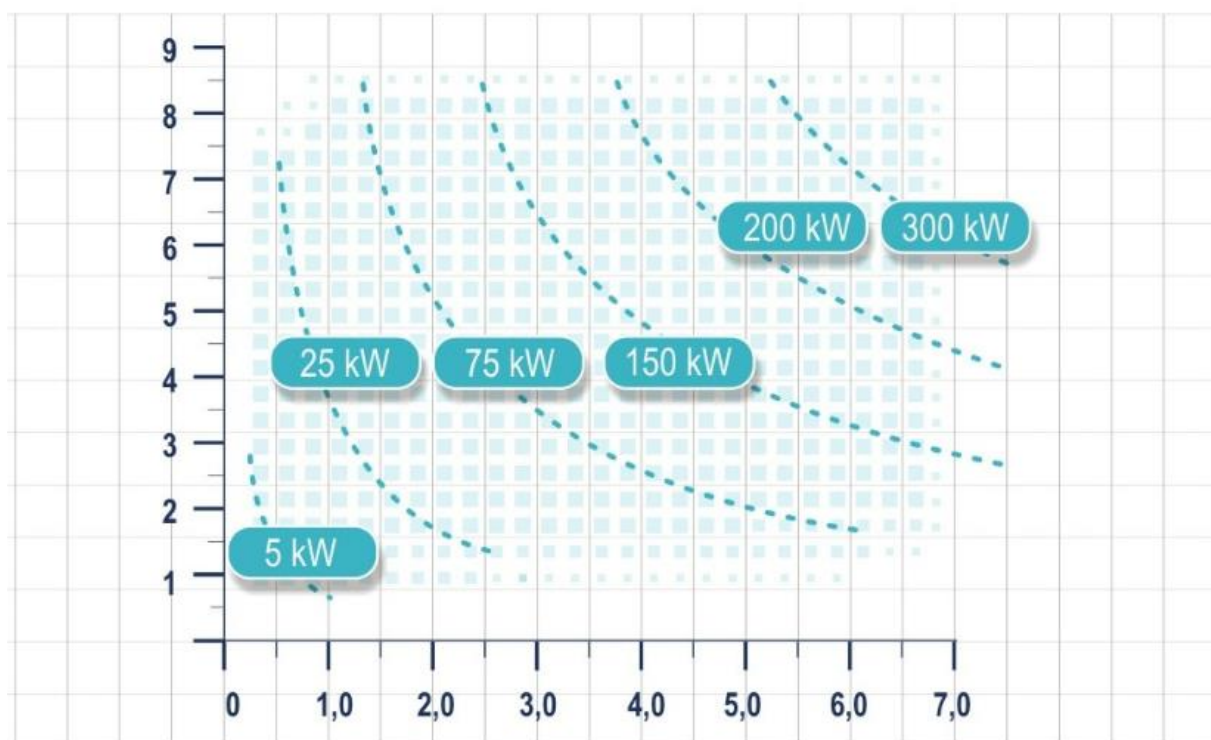


Рис. 1.12. Потужність гвинтових турбін GESS-CZ

Шнекові турбіни широко застосовуються на малих гідроелектростанціях завдяки своїй простоті в установці та експлуатації, а також здатності працювати при малих потоках води і низьких напорах. Їх використання дозволяє ефективно генерувати електричну енергію навіть в умовах обмежених ресурсів водного потоку [44].

1.4.2. Конструктивні особливості, обладнання та аналіз технологічних рішень гідротурбін

Будівля малої гідроелектростанції, як правило, є залізобетонною конструкцією, основною метою якої є розміщення основного гідросилового обладнання (турбін, генераторів, систем контролю та автоматизації) та допоміжних технічних засобів.

Сучасне обладнання для малих гідроелектростанцій виробляється численними підприємствами в різних країнах, охоплюючи широкий діапазон технічних параметрів. У європейському контексті лідерами у розвитку малої гідроенергетики є Австрія, Чехія, Польща, Італія та Норвегія. Ці країни активно сприяють підвищенню економічної ефективності малих ГЕС, зокрема за рахунок оптимізації процесів проектування, будівництва та експлуатації. Вони приділяють значну увагу типізації проектних рішень, стандартизації устаткування та повній автоматизації операційних процесів на станціях.

Одним із найбільш перспективних підходів у проектуванні малих ГЕС є використання кількох турбін різної потужності. Це рішення обґрунтовується тим, що створення великого накопичувального водосховища для нових станцій є складним і малореальним завданням, за винятком проєктів, реалізованих у малонаселених гірських районах, де для забезпечення стабільного енергопостачання може бути необхідна більша ємність водосховищ [26].

У процесі аналізу сучасних технологічних рішень, реалізованих у конструкціях гідротурбін провідних виробників, було виявлено низку ефективних підходів до оптимізації перетворення кінетичної та потенціальної енергії водного потоку. Особливу увагу було приділено турбінам, застосовуваним у МГЕС за умов низьких напорів (до 10 м) – зокрема осьовим та шнековим типам [45].

Порівняльну характеристику основних типів турбін, придатних для роботи в умовах низьких і наднизьких напорів, наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

Порівняння осьових та шнекових турбін за ключовими характеристиками

Критерій	Осьова турбіна	Шнекова турбіна
Діапазон робочих напорів, м	2–70	0,5–10 (оптимально 0,5–3)
Принцип дії	Реактивна	Реактивна
Конструкція	Класичний гідроагрегат з напрямними апаратами	Гвинт у трубчастому корпусі або відкритий
Складність виготовлення	Висока	Низька
Швидкість обертання об/хв	Висока (до 1000 об/хв і більше)	Низька (10–100 об/хв)
Стійкість до засмічення	Низька	Висока
ККД	90–95 %	До 93 % (при оптимізації параметрів)
Потреба в очищенні води	Висока	Мінімальна
Рибопрохідність	Обмежено	Так
Можливість роботи без греблі	Рідко	Так
Масштабованість	Складна	Висока
Ефективність при змінних витратах	Знижується	Стабільна
Вартість виробництва	Висока	Низька
Типове застосування	ГЕС з постійним дебітом і греблею	Наднизькі напори, відкрите русло, екологічні зони

На основі узагальнених характеристик видно, що шнекові турбіни мають найбільшу кількість переваг у сфері застосування для малих ГЕС, особливо у випадках із відсутністю гребель або при роботі в природних руслах з мінімальним втручанням у екосистему.

Для наочного відображення робочих діапазонів різних типів турбін залежно від класу та напору подано рисунок 1.13.

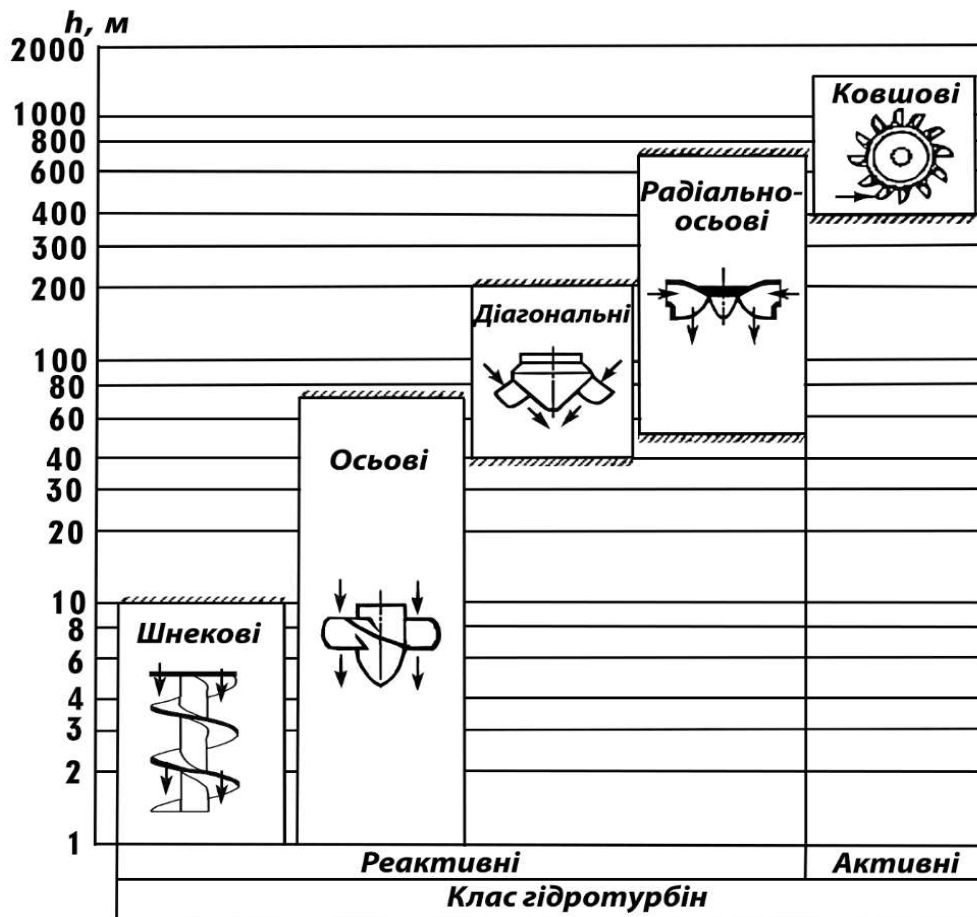


Рис. 1.13. Области застосування різних видів гідротурбін залежно від класу та напору

На рисунку 1.13 представлено класифікацію гідротурбін за типом дії (реактивні або активні) та діапазоном робочих напорів, що ілюструє області їхнього застосування. Із зображення видно, що шнекові турбіни належать до реактивного класу та демонструють ефективну роботу в умовах наднизьких напорів – приблизно від 1 до 10 метрів, що робить їх доцільними для використання у малих гідроенергетичних установках із невеликою висотою перепаду води.

Вибір саме шнекових турбін як об'єкта дослідження обумовлений низкою чинників:

- робочий діапазон напорів, що відповідає умовам більшості потенційних майданчиків для встановлення МГЕС, де створення значного перепаду є технічно або економічно недоцільним;

- простота та надійність конструкції, яка знижує витрати на виготовлення, монтаж і обслуговування;
- висока стійкість до забруднення, що дозволяє ефективно працювати навіть у водах з твердими домішками без ризику заклинювання;
- екологічна безпечність, зокрема для міграції риби та збереження природних водотоків;
- адаптивність і масштабованість, що дозволяє створювати ефективні рішення як для малопотужних, так і для середньопотужних автономних систем.

Такі характеристики, у поєднанні з широким застосуванням у Європі, роблять шнекові турбіни перспективними для подальшої інженерної оптимізації та дослідження.

У межах дослідження було також проаналізовано альтернативні природоорієнтовані підходи, зокрема праці Шаубергера, в яких пропонується використовувати природні гідродинамічні ефекти (закручені потоки, гіперболічні форми) для підвищення ефективності перетворення енергії. Додаткову увагу приділено напрацюванням Оніпка, які спрямовані на гармонізацію технічної конструкції із природними закономірностями руху рідини чи повітря.

На основі аналізу вищезазначених джерел і рішень було обґрунтовано вибір для вдосконалення саме шнекової гідротурбіни. Вона має просту, але ефективну конструкцію, високий ступінь адаптивності до мінливих умов потоку та екологічну безпечність.

У межах запропонованої модернізації передбачається:

- інтеграція нероз'ємного корпусу з лопатями, що сприяє зниженню гідравлічних втрат, підвищенню жорсткості та загальної конструктивної надійності турбіни;
- формування конструктивного звуження каналу потоку від вхідного до вихідного перерізу з метою попереднього прискорення рідини та покращення умов енергетичного перетворення.

Запропоновані інженерні рішення можуть бути використані для створення нової ефективної моделі шнекової турбіни, що поєднує інженерні закономірності та принципи природної гідродинаміки. Це відкриває перспективи для підвищення ефективності малих ГЕС у складних та нестабільних умовах експлуатації.

Висновки до розділу 1

У першому розділі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність розвитку малої гідроенергетики України в контексті децентралізації енергопостачання та зростаючого попиту на відновлювані джерела енергії. На основі аналізу сучасних інженерних підходів до проектування та експлуатації малих гідроелектростанцій, а також технічних рішень провідних виробників гідротурбін, сформовано теоретичну основу для подальших досліджень конструкцій турбін шнекового типу. Отримані результати стали підґрунтям для узагальнень, викладених у наступних висновках:

1. Аналіз сучасного стану малої гідроенергетики України показав, що в умовах енергетичної кризи та зростаючої потреби у відновлюваних джерелах енергії мала гідроенергетика має значний потенціал для розвитку.

2. Проведене дослідження дозволило:

- проаналізувати гідропотенціал малих річок та технічний стан малих гідроелектростанцій (МГЕС);
- виявити основні проблеми експлуатації МГЕС та обґрунтувати потребу в їх модернізації;
- уточнити класифікаційні підходи до малих ГЕС, зокрема за потужністю, типом напору та конструкцією обладнання, з метою гармонізації із сучасними технічними та експлуатаційними вимогами;
- сформулювати рекомендації щодо вибору обладнання відповідно до умов експлуатації.

3. Дослідження конструктивних особливостей сучасних гідротурбін дозволило виявити їхні основні переваги та недоліки й визначити напрями вдосконалення для підвищення ефективності роботи малих гідроустановок. Особливу увагу приділено адаптації конструкцій турбін до природних гідродинамічних умов, зокрема через використання ефекту завихрення потоку.

4. На основі проведеного аналізу запропоновано інженерну модель турбіни, спрямовану на мінімізацію гідродинамічних втрат і підвищення продуктивності. Отримані результати створюють науково-практичне підґрунтя для подальших досліджень та розробки технічних рішень у сфері малої гідроенергетики.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [1 – 45].

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУЮВАННЯ ВДОСКОНАЛЕНИХ ТИПІВ ШНЕКОВИХ ТУРБІН

2.1. Конструктивні рішення та особливості спіралеподібних турбін

На основі аналізу шнекових турбін [46], а також вивчення робіт Шаубергера [35] і Оніпка [38], було сформульовано ідею створення турбіни, здатної максимально ефективно використовувати природне завихрення водного середовища.

Основна концепція. Розробка спрямована на вдосконалення шнекової турбіни шляхом внесення конструктивних змін і додавання нових компонентів, що дозволяють:

- підвищити коефіцієнт корисної дії через створення поступового відведення водного потоку від центру до корпусу турбіни (з більшою концентрацією рушійних сил у зоні більшого діаметра);
- забезпечення обміну механічною енергією між водним потоком і спіралеподібною лопаттю;
- формування зони розрідження на виході, що сприяє фізичному прискоренню потоку на виході з турбіни;
- зменшити розміри конструкції порівняно з уже відомими турбінами аналогічної потужності [47];
- мінімізувати втрати кінетичної енергії за рахунок впровадження принципу накопичення та збереження енергії (ефект маховика [48-50]).

Ця концепція спрямована на досягнення продуктивності та енергоефективності при одночасному зменшенні габаритів конструкції. Такий підхід дозволяє забезпечити високу ефективність роботи турбіни навіть за умов низьконапірних потоків, що робить її перспективною для широкого застосування у водних середовищах [51, 52].

Запропоноване рішення для вдосконалення шнекової турбіни передбачає конструкцію з спіралеподібними лопатями, які розташовані концентрично та спіралеподібно вздовж осі обертання турбіни і з'єднані з валом, який знаходиться уздовж осі обертання турбіни. Лопать разом із валом вміщена у порожнистий циліндричний корпус та нерухомо з'єднана із ним. Конструкція лопатей передбачає максимально можливе перекриття простору для руху потоку, що сприяє ефективному використанню енергії потоку. Кут розташування лопаті відносно корпусу поступово зменшується від входу до виходу турбіни, що оптимізує спрямування потоку. В конструкції передбачено поступове зменшення площі каналів для водного потоку від входу до виходу кожуха, що забезпечує ефект стискання потоку і підвищення його швидкості. Вісь обертання турбіни може виконуватися як окремий елемент – вал або використовувати сам корпус турбіни для виконання цієї функції, залежно від вимог до конструкції [53].

За конструктивним задумом визначено орієнтацію на роботу вдосконаленої шнекової турбіни в діапазоні напорів від 0,2 до 3 м, включаючи можливість роботи безпосередньо в течії річки, що відповідає гідрологічним умовам більшості малих річок і каналів.

Обмеження лабораторної установки не дозволили досягти граничного ефективного рівня напору в 3м, однак зазначений діапазон вважається обґрунтованим для реального впровадження. Подальше визначення верхньої межі ефективності доцільно здійснювати в польових умовах на об'єктах малої гідроенергетики.

Запропоноване конструктивне рішення також усуває потребу у масштабному гідротехнічному будівництві, оскільки турбіна може ефективно працювати без створення штучних водосховищ. Це суттєво знижує екологічний вплив та значно спрощує її впровадження в умовах природного русла річки, зберігаючи локальні екосистеми.

Конструктивні особливості лопатей:

– дугоподібна форма лопаті виконана з поступово збільшеною площею (або товщиною) біля корпусу до виходу з турбіни, що дозволяє краще концентрувати потік ближче до корпусу;

– дугоподібна форма лопаті виконана з поступово збільшеною площею (або товщиною) біля корпусу до виходу з турбіни і з'єднана з валом по всій довжині;

– спіралеподібна лопать із однаковою площею (або товщиною) по всій довжині, що може бути доцільним для спрощення конструкції або під конкретні умови експлуатації [53].

Особливості корпусу:

– прямий корпус використовується для стабільних умов потоку, коли немає потреби у додатковому стисканні де потік стискається за рахунок будови спіралеподібних лопатей;

– конусоподібний корпус забезпечує поступове зменшення площі каналу для водного потоку, що сприяє стисканню потоку і збільшенню швидкості на виході. Підходить для умов, де потрібне підвищення швидкості потоку зі зміною тиску де форма спіралеподібної лопаті не змінюється вздовж всієї турбіни.

Запропоноване рішення шнекової турбіни зі спіралеподібними лопатями передбачає конструкцію, у якій вал служить основним елементом, на якому закріплюються всі компоненти турбіни та забезпечує передачу обертового моменту на механізми для подальшого використання енергії. Порожнистий циліндричний корпус турбіни виконує функцію направляючого елемента для потоку, спрямовуючи його до лопатей та розташовується на валу і нерухомо з'єднаний зі спіралеподібною лопаттю. Також захищає внутрішні елементи конструкції від впливу зовнішнього середовища. Спіралеподібна лопать нерухомо з'єднана з корпусом і розташована всередині нього і має оптимальну форму для ефективного перетворення кінетичної енергії потоку води на обертовий момент. Орієнтована так, щоб забезпечити максимальний

контакт із потоком води при мінімальних втратах енергії. Це дозволяє значно збільшити тиск потоку на лопаті, що, у свою чергу, підвищує ефективність перетворення кінетичної енергії води в обертальний момент і суттєво підвищує ККД всієї установки [53].

Залежно від призначення та умов експлуатації турбіни, конструкційна модель може бути адаптована:

- форма і кількість лопатей підбирається з урахуванням типу потоку, рівня води та необхідної потужності;
- габарити корпусу змінюються залежно від потреби в компактності або особливостей потоку (наприклад, для малонапірних чи високонапірних потоків);
- тип корпусу може бути прямим, конусоподібним або з іншими модифікаціями для оптимізації роботи в конкретних умовах.

При цьому ключова концепція технічних умов залишається незмінною: максимальне використання енергії природного потоку через ефективну взаємодію між водним чи повітряним потоком і спіралеподібними лопатями [54].

Технічний результат досягається за рахунок унікальної конструкції турбіни, яка включає кілька інноваційних рішень, що оптимізують використання кінетичної енергії водного потоку та мінімізують енергетичні втрати.

Основні технічні аспекти:

- поступове зменшення площі каналів усередині турбіни з поступовим зменшенням площі проходження потоку до виходу $\Delta S > \Delta S_1$ (рис. 2.1, 2.2, 2.3), що підсилює гідродинамічну взаємодію в турбіні за рахунок збільшення кількості та швидкості рідини, що проходить крізь турбіну;
- зростання перепаду статичного тиску відбувається як усередині турбіни, так і на виході, що підвищує її потужність;
- будова лопатей із змінним кутом атаки. Початковий кут атаки $< \alpha$ поступово зменшується до виходу, стаючи $< \beta$ (Рис. 2.1, 2.2, 2.3). Така зміна

кута дозволяє перенаправляти потік від центральної зони (найменш ефективної) до периферійної зони (зона з більшим діаметром, де ефективність найвища). Створювати природне фізичне завихрення потоку, що зменшує тертя (відповідно до теорії Шаубергера);

- залежність зміни початкового кута атаки α з кінцевим β налаштовується залежно від умов експлуатації;

- акумуляція кінетичної енергії корпусом турбіни. Корпус виконує роль маховика, накопичуючи кінетичну енергію під час обертання, що підсилює енергію потоку;

- зменшення втрат від завихрень. Спеціальна форма лопатей мінімізує завихрення, які утворюються на їхніх кінцях, що знижує енергетичні втрати та збільшує ККД установки;

- реактивний момент за рахунок розміщення лопатей. Лопаті розташовані так, щоб частково перекривати сусідню лопать, утворюючи звужені канали. У цих каналах спостерігається падіння тиску з одночасним збільшенням швидкості потоку на виході, що створює додатковий реактивний момент.

Така конструкція забезпечує високу продуктивність і енергоефективність, відкриваючи широкі можливості для використання турбін у широкому діапазоні умов в різних сферах, від малих річок до промислових об'єктів забезпечуючи стабільну продуктивність і високу енергоефективність.

Відповідно до призначення та умов використання модифікованої турбіни, можливі різні варіанти виконання, що враховують запропоновані технічні умови та вимоги.

2.2. Турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі

На рис. 2.1 представлено конструкцію шнекової турбіни з спіралеподібними лопатями, побудованими за принципом, наближеним до золотого січення або спіралі Фібоначчі [53, 55].

Основні особливості конструкції такої турбіни:

– Форма лопатей. Лопаті мають спіральну форму, що поступово перекриває простір для безперешкодного руху рідини від входу (починається з корпусу) до виходу (лопоть з'єднується з валом);

– Зменшення площі виходу ($\Delta S > \Delta S_1$). Площа проходження потоку зменшується на виході завдяки поступовому збільшенню об'єму лопатей;

– Будова лопатей із змінним кутом атаки.

– Застосування принципу золотого січення забезпечує оптимальний розподіл потоку по всій поверхні лопатей, знижуючи енергетичні втрати через завихрення.

Очікуваний ефект:

– Підвищення швидкості потоку на виході завдяки створенню розрідження;

– Максимальна передача енергії потоку на обертальний момент;

– Покращення загального коефіцієнта корисної дії (ККД) установки.

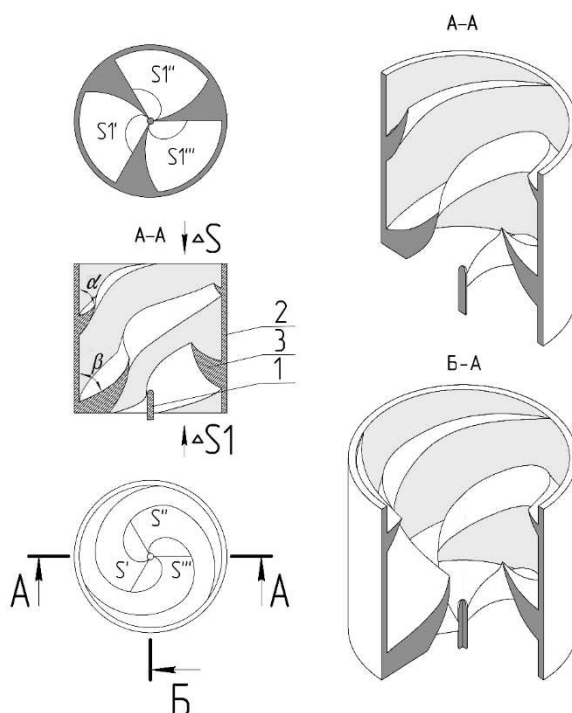


Рис. 2.1. Схема шнекової турбіни з будовою лопатей за принципом золоті спіралі: 1 – вал; 2 – циліндричний корпус; 3 – спіралеподібна лопать; α – початковий кут нахилу лопаті до корпусу; β – кут нахилу лопаті до корпусу на виході

На рис. 2.1 представлено конструкцію турбіни зі складними лопатями, які встановлені під початковим кутом α відносно корпусу [56]. Цей кут поступово змінюється до виходу, стаючи β , що дозволяє спрямовувати рушійну силу ближче до корпусу 2 турбіни.

Зміна кута нахилу лопатей дозволяє початковому куту α забезпечити захоплення потоку на вході, а зміна кута β до виходу спрямовує енергію потоку ближче до корпусу турбіни, де ефективність передачі енергії на вал максимальна.

Форма лопатей за принципом спіралі Фібоначчі за рахунок складної геометрії дозволяє максимально ефективно використовувати енергію водяного потоку завдяки оптимальному розподілу потоку вздовж лопатей.

Така конструкція значно знижує мінімальну швидкість потоку, необхідну для страгування (початку руху) турбіни. Це робить установку придатною для роботи навіть у малих водотоках або умовах низького тиску адаптуючи конструкцію до різних умов експлуатації.

2.3. Турбіна з спіралеподібними лопатями які збільшуються в об'ємі

У випадках, коли складна конструкція лопатей, як показано на рис. 2.1, є економічно недоцільною або технічно зайвою, застосовуються спрощені варіанти виконання. На рис. 2.2 і рис. 2.3 зображено конструкції лопатей які зберігають концептуальні особливості, але мають простіший дизайн.

В конструкції на рис. 2.2, прямі спіралеподібні лопаті (3) з'єднують корпус (2) із валом (1) по всій висоті турбіни. Вони зберігають спіралеподібну форму, але без складної геометрії як за принципом Фібоначчі. Лопаті поступово збільшуються в площі або об'ємі вздовж потоку, що зменшує площу виходу ($\Delta S > \Delta S_1$). Це сприяє створенню розрідження потоку і збільшенню швидкості на виході.

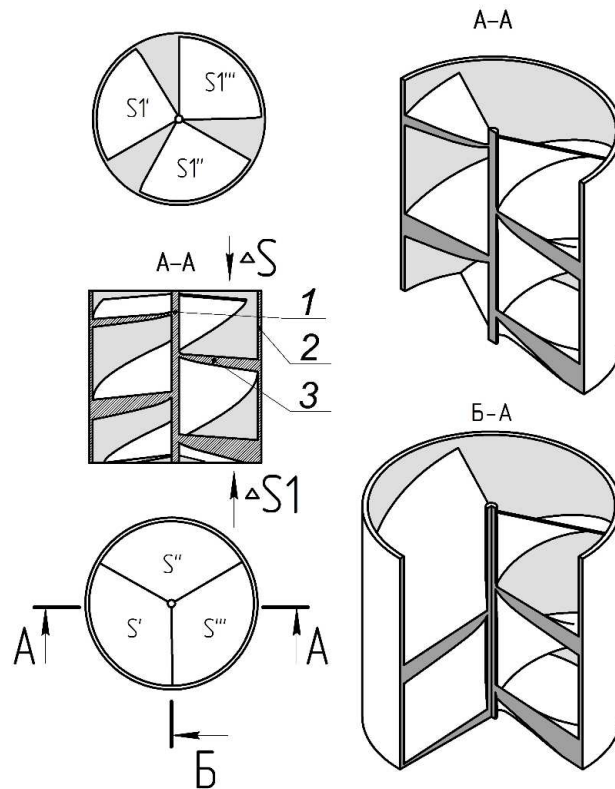


Рис. 2.2. Схема шнекової турбіни з спіралеподібними лопатями що збільшуються в об'ємі: 1 – вал; 2 – циліндричний корпус; 3 – спіралеподібна лопать; α – початковий кут нахилу лопаті до корпусу; β – кут нахилу лопаті до корпусу на виході

На рис. 2.2 показано встановлення лопатей турбіни з початковим кутом ($<\alpha$ який поступово змінюється до виходу $<\beta$) до вхідного потоку створює обертальний момент, відносно осі обертання, та одночасно перенаправляє потік до корпусу турбіни. А завдяки будові лопаті з поступовим зростанням в об'ємі до виходу водного потоку, за рахунок створення додаткової реактивної тяги при розрідженні та максимальному використанні потоку буде забезпечуватись найбільший обертальний момент, що також дозволяє значно знизити необхідну для страгування турбіни швидкість водяного потоку.

Така конструкція забезпечує значне перетворення кінетичної енергії потоку в обертальний момент із меншими витратами на виготовлення та може використовуватись у ситуаціях, де не потрібна висока складність виконання, але потрібна функціональність [53, 57].

2.4. Турбіна з спіралеподібними лопатями та звуженням корпусу

Щоб забезпечити важливий аспект розробки гідротурбін, який враховує збереження біорізноманіття та мінімізацію шкоди живим організмам, що мешкають у водоймах. Для турбін з діаметром через який можуть проходити найбільші риби, черепахи або інші живі організми, рекомендується використовувати конструкцію з варіантом розміщення лопатей, зображеним на рисунку 2.3. При цьому також важливо забезпечити умову зменшення площі проходження рідини на виході з турбіни (позначається як $\Delta S1$) за рахунок конусоподібного корпусу, що зменшується до виходу потоку з турбіни. Лопаті в такому випадку не збільшуються в об'ємі (рис.2.2).

Цей підхід знижує ККД такої турбіни за рахунок зниження маси корпусу, але дозволяє уникнути травмування живих організмів.

Таким чином, вибір конструкції гідротурбіни залежить від діаметра турбіни та характеристик екосистеми, щоб досягти балансу між ефективністю роботи турбіни та збереженням природного середовища.

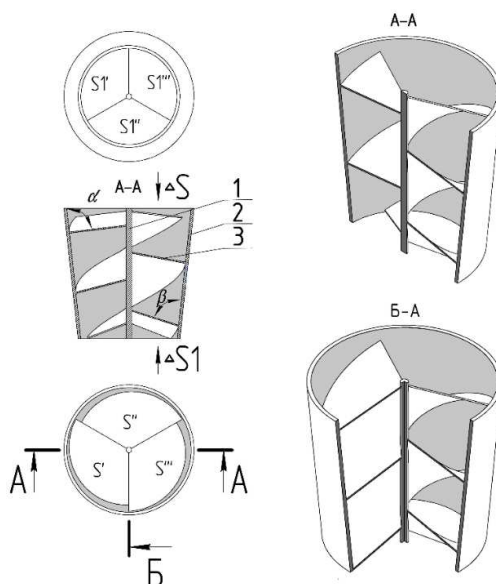


Рис. 2.3. Схема шнекової турбіни з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу: 1 – вал; 2 – конусний корпус; 3 – спіралеподібна лопать; α – початковий кут нахилу лопаті до корпусу; β – кут нахилу лопаті до корпусу на виході з турбіни

На рис. 2.3 показана конструкція турбіни демонструє продуманий підхід до ефективного використання енергії потоку, зберігаючи ще більшу конструктивну простоту в порівнянні з турбіною зображеною на рис 2.2.

В такому виконанні лопаті розташовані під кутом до набігаючого потоку, який поступово змінюється ($\alpha \rightarrow \beta$). Цей профіль створює обертальний момент на валу, одночасно перенаправляючи потік до корпусу турбіни, особливо за умови конусоподібного виконання корпусу.

Прямі спіралеподібні лопаті з'єднують корпус турбіни з валом по всій висоті, а товщина лопатей залишається однаковою, що максимально спрощує виготовлення (порівняно з конструкціями зображеними на рис. 2.1, 2.2) та забезпечує рівномірний розподіл навантаження.

Зменшення площі виходу потоку (ΔS_1) досягається шляхом зменшення діаметра корпусу турбіни.

Це створює додаткову реактивну тягу через ефект розрідження, що підвищує загальний ККД турбіни.

Завдяки конструктивним особливостям, запуск турбіни можливий за нижчих швидкостей течії, що дозволяє використовувати турбіну у водоймах з помірним або слабким потоком.

Це рішення дозволяє підвищити ефективність перетворення енергії потоку в механічну енергію, забезпечити стабільну роботу у слабких потоках та зберегти простоту конструкції без збільшення об'єму, що знижує вартість виготовлення та обслуговування.

У підсумку, запропонована конструкція демонструє вдале поєднання ефективності та інженерної простоти (простий дизайн легше виготовляти, що зменшує витрати), роблячи її конкурентоспроможним рішенням у сфері гідроенергетики. [53, 58]

Усі зазначені конструктивні особливості в запропонованих варіантах свідчать про досягнення технічного результату – збільшення ККД запропонованого технічного рішення.

Висновки до розділу 2

У другому розділі дисертаційної роботи зосереджено увагу на розробці нових конструктивних рішень для шнекових турбін, призначених для експлуатації в умовах низького гідростатичного напору та нестабільного гідродинамічного середовища. Теоретичне обґрунтування та інженерне проектування базувалися на принципі поступового стискання потоку з метою інтенсифікації процесів енергетичного перетворення. У результаті проведеної науково-технічної роботи було створено низку спіралеподібних турбін із варіативними геометричними параметрами, здатних ефективно функціонувати в умовах змінного навантаження та нестійкої течії. Запропоновані інженерні рішення були захищені патентом України на корисну модель. Основні результати цього етапу дослідження викладено у таких висновках:

1. У межах одного патенту на корисну модель розроблено та запатентовано конструктивні рішення трьох типів спіралеподібних турбін, що належать до класу шнекових. Усі три конструкції реалізують спільний принцип дії — поступове стискання та прискорення потоку з перетворенням його кінетичної енергії на механічну. Завдяки оптимізованій геометрії лопатей забезпечується використання енергії потоку з мінімальними втратами, що підвищує загальну продуктивність турбін.

2. Кожна з розроблених турбін має індивідуальні геометричні й функціональні особливості, що забезпечують:

- оптимальну взаємодію потоку з лопатями і корпусом;
- рівномірний розподіл навантаження по лопатях;
- акумуляцію кінетичної енергії корпусом із реалізацією ефекту маховика, що стабілізує обертання і знижує пульсації;
- адаптивність конструкцій до різних умов експлуатації – від слабких течій і малонапірних вод до екологічно вразливих середовищ;

- можливість швидкого старту при зменшеній стартовій швидкості потоку (особливо у варіантах із полегшеним корпусом);

- потенційне використання як в малих гідроустановках, так і в автономних енергетичних системах.

3. Визначено робочий діапазон напорів для запропонованих конструкцій – від 0,2 до 3 м, що відповідає природним умовам більшості малих річок і каналів. Такий діапазон робить турбіни придатними до безнапірної роботи без потреби у будівництві водосховищ чи масштабних гідротехнічних споруд.

4. Запропоноване конструктивне рішення дає змогу здійснювати отримання енергії без суттєвого втручання в природне русло, що мінімізує екологічний вплив і спрощує впровадження установки в реальні експлуатаційні умови.

5. Окрема турбіна з відносно простою геометрією дозволяє зменшити витрати на виробництво без суттєвих втрат ефективності.

6. Перспективність запропонованих конструкцій підтверджена теоретичним аналізом, однак для остаточного визначення їхньої ефективності необхідні експериментальні випробування у водному та повітряному потоках. Це дозволить об'єктивно оцінити продуктивність турбін у різних середовищах і визначити оптимальне конструктивне рішення.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [35, 38, 46 – 58].

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА ДОСЛІДЖУВАЛЬНІ ТУРБІНИ

3.1. Фізичні характеристики середовищ для експериментальних досліджень

У процесі підготовки лабораторної установки для дослідження турбін важливим етапом стало врахування фізичних властивостей повітряного та водного середовищ, оскільки вибір середовища експерименту суттєво впливає на умови проходження потоку, а отже, і на репрезентативність отриманих результатів.

Повітря має значно меншу щільність ($\sim 1,2 \text{ кг/м}^3$ при 20°C) та динамічну в'язкість порівняно з водою ($\sim 998 \text{ кг/м}^3$ при 20°C) [59, 60]. Це призводить до того, що за однакових швидкостей руху число Рейнольдса у водному потоці буде істотно вищим, ніж у повітряному. Високі значення числа Рейнольдса у воді забезпечують ранній перехід потоку в турбулентний режим, що є критично важливим для вивчення поведінки турбін у реальних експлуатаційних умовах [60, 61].

Крім того, вода, на відміну від повітря, є середовищем, де можливе утворення кавітаційних ефектів при локальному зниженні тиску, що може додатково впливати на гідродинамічні характеристики обтічності робочих органів турбін. У повітряному потоці кавітація практично відсутня, проте в'язкість повітря є значно більш чутливою до змін температури, що також потребує додаткового контролю параметрів під час проведення експериментів [59].

Окрему увагу приділяли впливу виштовхувальної сили Архімеда: у воді вона є суттєвою і може змінювати результати для турбін малої маси, тоді як у повітряному середовищі цей ефект мінімальний.

Основні фізичні характеристики повітряного та водяного потоків наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Порівняння характеристик повітряного та водного потоків [58-60]

Ознака	Повітряний потік	Водяний потік
Щільність, кг/м ³	$\approx 1,2$	≈ 998
Динамічна в'язкість	Низька	Вища
Компресійність середовища	Висока	Низька
Число Рейнольдса за однакових умов	Нижче	Вище
Ймовірність виникнення кавітації	Практично відсутня	Можлива
Вплив температури на в'язкість	Відчутний	Помірний
Виштовхувальна сила Архімеда	Мінімальна	Відчутна
Основне застосування в дослідженнях	Аеродинаміка, обтікання тіл	Гідродинаміка, турбулентність

Як видно з таблиці 3.1, вода має суттєві переваги для формування турбулентних режимів, тоді як повітряне середовище є більш придатним для вивчення обтікання тіл при нижчих числах Рейнольдса. З огляду на зазначені особливості, була розроблена методика проведення випробувань турбін окремо у повітряному та водяному потоках.

На основі аналізу фізичних характеристик середовищ лабораторну установку було дооснащено для проведення експериментальних досліджень у повітряному та водному середовищах. Це дозволяє моделювати реальні експлуатаційні умови турбін, оцінювати вплив фізичних параметрів потоків на оберти, рівень електричної напруги та стабільність роботи турбін.

Подальші дослідження в цьому напрямі, зокрема аналіз взаємозв'язку між аеродинамічними та гідродинамічними ефектами, закладають наукову основу для створення турбін, адаптованих до складних умов експлуатації. Це

відкриває перспективи їхнього застосування в інноваційних системах енергопостачання.

3.2. Опис лабораторної установки для дослідження розроблених турбін

У цьому розділі наведено опис експериментальної установки, обладнання для досліджень у водному та повітряному потоках, особливості виготовлення експериментальних моделей турбін та їх підготовки до випробувань.

Експериментальні дослідження різних типів шнекових турбін, зокрема трьох модифікацій спіралеподібних конструкцій, гвинтової та класичної шнекової турбін, потребують відтворення експлуатаційних умов, максимально наближених до реальних. В такому відношенні вагому роль відіграють дослідження в лабораторних умовах, поставлені на спеціальних установках з можливістю проведення експериментів в ширшому діапазоні досліджуваних характеристик турбін. При цьому параметри установки повинні забезпечувати адекватність та надійну відтворюваність отриманих результатів в процесі проведення дослідів протягом тривалого часу. Такі лабораторні експерименти також потребують удосконалення існуючих методик дослідів та розробки нових, які б забезпечували вимірювання всіх необхідних характеристик досліджуваних турбін [62].

Для досліджень турбін в лабораторну установку яка виконана у вигляді дзеркального лотка прямокутної форми поперечного перерізу довжиною 15,6 м, шириною 1,0 м і висотою 1,2 м (рис. 3.1) [63] було встановлено випробувальний модуль, перед і за яким були встановлені ультразвукові датчики для вимірювання рівня води [64, 65].

Всю лабораторну установку умовно можна розділити на три частини:

- голова установки, де розташовується напірний бак та трикутний вимірювальний водозлив;
- початкова частина лотка, де розташовуються заспокійливі решітки;

– робоча частина лотка, де встановлено випробувальний модуль для дослідження турбін.

Так, згідно рисунка 3.1 із напірного бака насосної станції вода поступала по трубопроводу (1) в голову лотка (3), проходила через вимірювальний трикутний водозлив (5), заспокійливу решітку (6), лотік лабораторної установки (7), випробувальний модуль (9), шпигувальний затвор (12), резервуар для відводу води (13), після чого по системі трубопроводів знову поступала в приймальний резервуар насосної станції [62, 63].

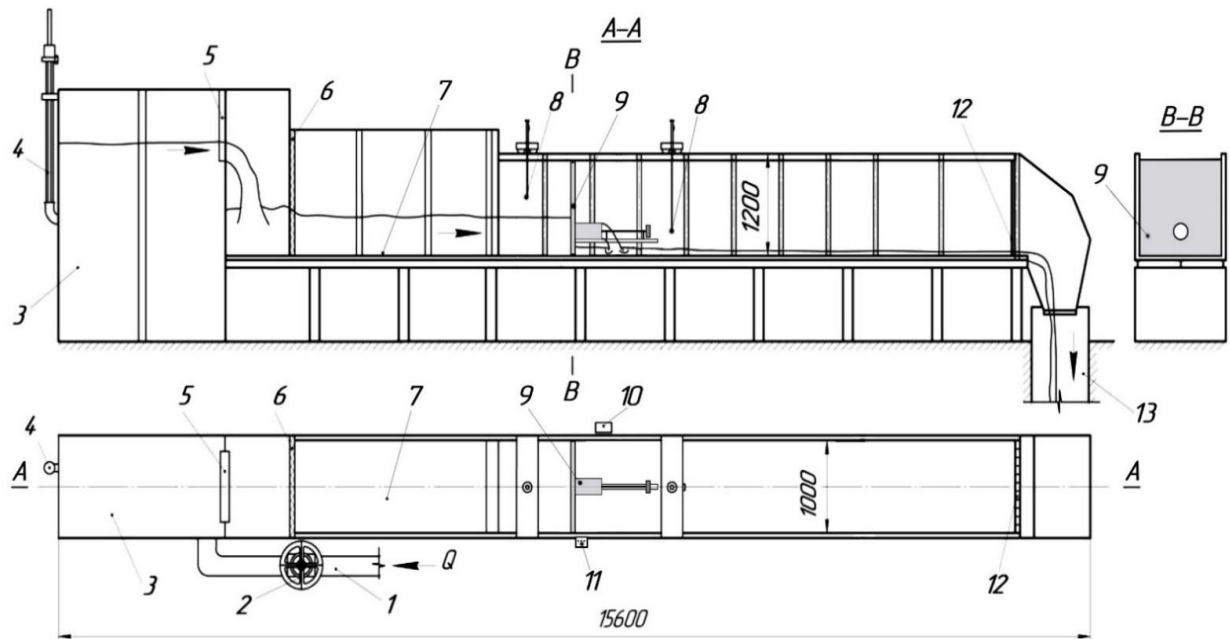


Рис. 3.1. Функціональна схема лабораторної установки: 1 – підвідний трубопровід, 2 – засувка, 3 – голова лотка, 4 – п'єзометр для визначення напору на трикутному водозливі, 5 – вимірювальний трикутний водозлив, 6 – заспокійлива решітка, 7 – лотік лабораторної установки, 8 – датчики рівня води та шпіцен масштаби, 9 – випробувальний модуль для досліджень, 10 – щит автоматизації, 11 – блок керування навантаженням, 12 – шпигувальний затвор, 13 – резервуар для відведення води [62, 63]

Для зміни глибини води у верхньому б'єфі лабораторної установки до випробувального модуля використовується засувка (2) подачі води (рис. 3.1) [63].

Визначення витрати води Q у лабораторній установці здійснюється за допомогою трикутного вимірювального водозливу та п'єзометра (рис. 3.2), які розташовані в голові установки. Трикутний водозлив являє собою водомірну конструкцію з тонкою стінкою та загостреними краями, що містить трикутний виріз, симетричний відносно вертикальної осі (рис. 3.3). У цій установці використовується водозлив із кутом вирізу $\theta = 90^\circ$ [66].



Рис. 3.2. Фото п'єзометра для визначення напору на трикутному водозливі розташованому на напірному баку лабораторної установки

При подачі на установку певної витрати Q на водозливі формується відповідний напір H (висота шару води на порозі трикутного водоміру), який може бути визначений за допомогою аналітичних залежностей [66, 67]:

1. Формула Кінга ($\theta = 90^\circ$)

$$Q = 1,343H^{2.47} \quad (3.1)$$

2. Формула Томсона ($\theta = 90^\circ$)

$$Q = 1,4H^{2.5} \quad (3.2)$$

3. Формула Граве ($\theta = 22^\circ \dots 118^\circ$)

$$Q = 1,331 \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{0.996} H^{2.47} \quad (3.3)$$

У наведених залежностях напір H виражається в метрах, а витрата Q – у $\text{м}^3/\text{с}$.

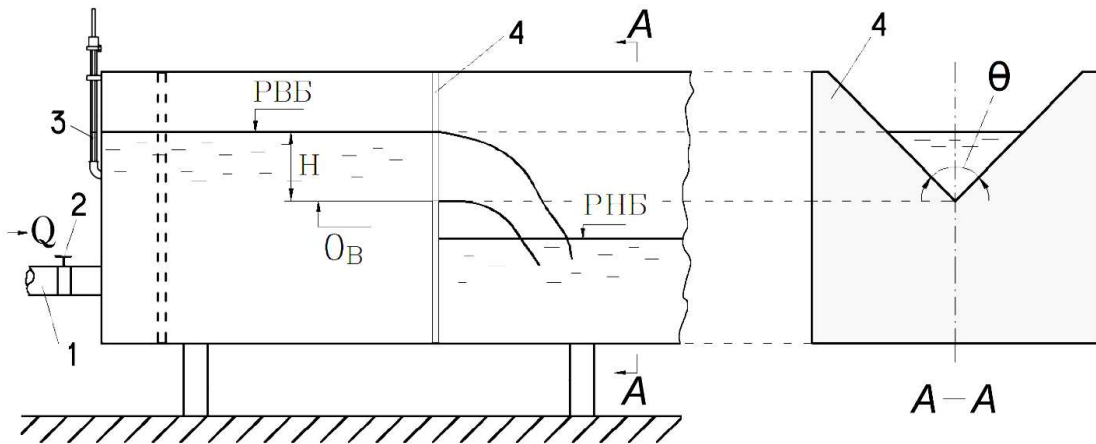


Рис. 3.3. Схема голови лабораторної установки для визначення витрати води Q : 1 – підвідний трубопровід, 2 – засувка, 3 – п'єзометр для визначення напору на трикутному водозливі, 4 – вимірювальний трикутний водозлив [66]

Враховуючи специфіку конструкції та фіксований кут вирізу θ на трикутному водозливі, для визначення витрати води Q у лабораторній установці доцільно використовувати формулу Томсона (3.2) [66].

Щоб максимально ефективно з мінімальними відхиленнями проводились дослідження експериментальних турбін, було запроектовано й виготовлено універсальний випробувальний модуль. На ньому відтворюються однакові умови для входу та виходу повітряного та водяного потоків з можливістю легкої заміни досліджуваних турбін. Для цього додатково додано з'єднувальну муфту на валу та два кріплення турбіни з підшипниками в шахті установки.

Важливим етапом проектування стало визначення діаметра направляючої шахти, який безпосередньо впливає на гідравлічний режим та швидкість потоку. З огляду на технічні обмеження подачі лабораторної установки, максимальна витрата, яку можна забезпечити в межах стабільної

роботи системи, становила близько $Q_{\max} = 0,16 \text{ м}^3/\text{с}$ [62, 66]. Для забезпечення ламінарного та стабільного потоку при заданій витраті було визначено діаметр шахти $d_{\text{ш}} = 0,21 \text{ м}$, що дозволяло отримати оптимальну швидкість течії в робочій зоні турбіни без турбулізації потоку або надмірних втрат напору. Такий підхід гарантував репрезентативність результатів дослідження та забезпечував наближення до умов реальної експлуатації.

Також у конструкції передбачено можливість створення змінних напорів водяного потоку шляхом монтування направляючої шахти безпосередньо на запірній заслінці. Принцип її розміщення забезпечує витікання води таким чином, щоб була можливість встановлення генератора на одній осі з турбіною через вал.

Випробувальний модуль (9) дозволяє тестувати турбіни в умовах максимально наближених до реальних. Він використовується для оцінки ефективності турбін, а також для дослідження різних аспектів (вібрації, шуму) роботи турбін в потоці води та повітря.

3.3. Особливості випробувального модуля для досліджень турбін у повітряному потоці

Випробувальний модуль (установка) для дослідження турбін в повітряному потоці (рис. 3.4) складається з кількох основних компонентів, які забезпечують її функціонування та дозволяють проводити вимірювання й аналіз ефективності роботи турбін. Центральною частиною установки, де розміщуються турбіни є запірна заслінка 2 з направляючою шахтою 3, яка забезпечує стабільне кріплення турбін 4 в оптимальних умовах для їх роботи. Вал 11 через муфту 5 з'єднує турбіну з генератором 9 і безперервно передає механічну енергію від турбіни до генератора. Вал, виготовлений із нержавіючої сталі, проходить через центр шахти і закріплений на підшипниках, що мінімізує тертя та забезпечує плавну роботу. Безщітковий генератор за допомогою валу отримує від турбіни механічну енергію, та

перетворює її на електричну енергію. Ще однією важливою складовою установки є блок з навантаженням 7, де навантаження створює лампочка розжарювання (24В, 21Вт). Для вимірювання виробленої електричної напруги генератором використовувався мультиметр, а оберти досліджуваних зразків турбін вимірювались лазерним тахометром. Щоб провести досліди в повітряному потоці випробувальний модуль додатково обладнувався компресором 1 для створення тиску повітря. Необхідні для дослідів тиски повітря ($p_1 = 2\text{атм}$, $p_2 = 4\text{атм}$, $p_3 = 6\text{атм}$) від компресора, налаштовувалися на регульовальному випускному клапані з манометром. Експериментально визначено оптимальну відстань між повітродуючим соплом компресора та входом в турбіну – вона становить 5 см і забезпечує необхідні умови взаємодії потоку з робочими органами турбіни.

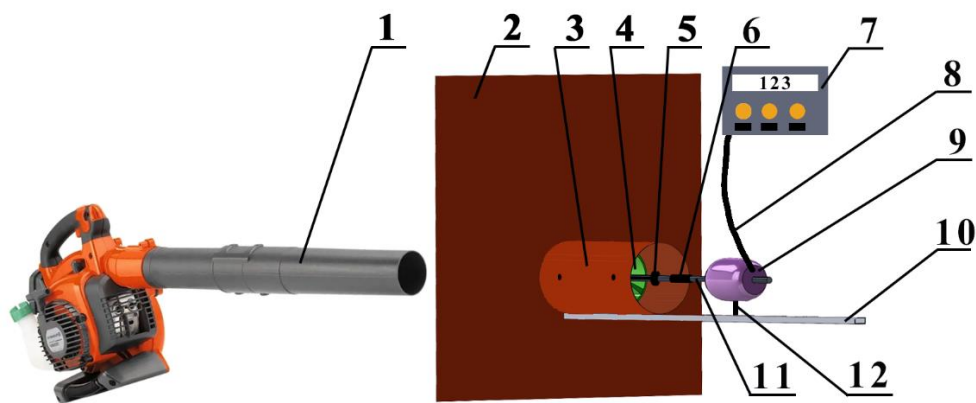


Рис. 3.4. Схема випробувального модуля для дослідів у повітряному потоці: 1 – компресор; 2 – заслінка потоку; 3 – направляюча камера потоку (шахта); 4 – досліджувана турбіна; направляючий вал; 5 – кріплення турбіни з підшипником; 6 – монтажна муфта; 7 – вимірювальні прилади та навантаження; 8 – провідник; 9 – генератор; 10 – монтажна направляюча; 11 – направляючий вал; 12 – кріплення генератора.

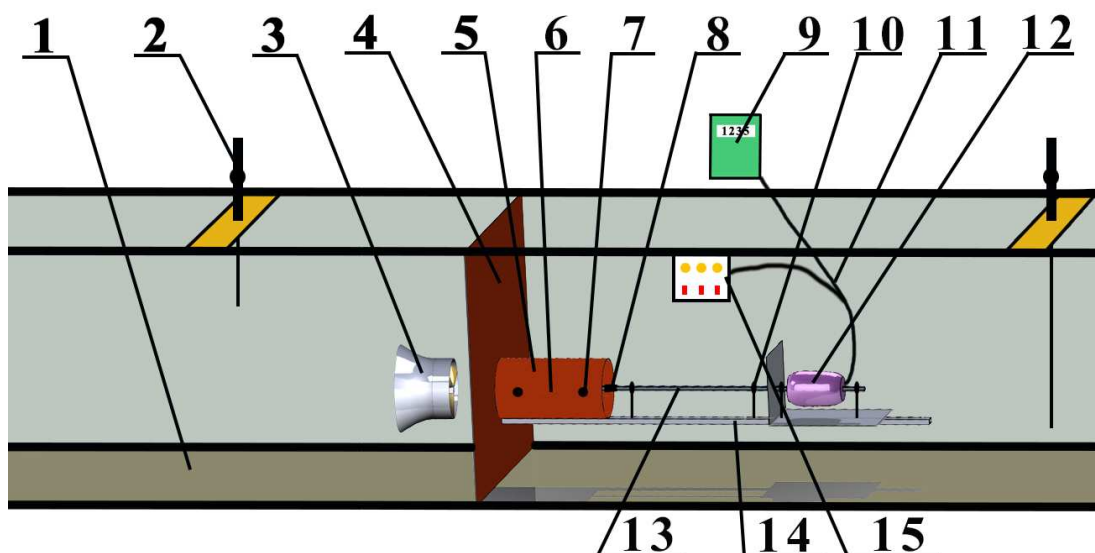
Ця установка дозволяє вивчати роботу турбін як в повітряному так і в водному потоці, проводити експерименти для оптимізації їх продуктивності, а також здійснювати контроль та аналіз роботи генератора як в режимі холостого ходу та під навантаженням.

3.4. Особливості випробувального модуля для досліджень турбін у водному потоці

Для проведення досліджень запроектованих турбін у водному потоці в лабораторній установці обладнаної резервуаром для води, насосною системою та трубопроводами, через які вода подається до дослідної зони лотка, а потік води регулюється засувкою, що створює різні умови для випробувань, зокрема, швидкість та об'єм, було влаштовано універсальний випробувальний модуль в лотік лабораторної установки, через який пропускається вода для моделювання реальних умов водного потоку (рис. 3.1). Рециркуляційна система, забезпечує повернення води з випускної секції лотка, назад у резервуар для повторного використання. Це дозволяє підтримувати постійний рівень води і стабільні умови експериментів протягом тривалого часу.

Випробувальний модуль для досліджень у водному потоці, окрім щита автоматизації та електричних датчиків для вимірювання всіх необхідних параметрів, був дообладнаний додатковими вимірювальними приладами, такими як шпіден-масштаби для визначення рівнів рідини у верхньому та нижньому б'єфах. Також були додані мультиметр і лазерний тахометр для контролю електричних параметрів та швидкості обертання. Додавання цих пристроїв забезпечило можливість перевірки достовірності автоматично отриманих даних шляхом їх порівняння з незалежними показниками. Це точність експериментальних вимірювань, зменшує вплив людського фактору та мінімізує ймовірність похибок. Інтеграція додаткових приладів зі щитом автоматизації спрощує обробку даних та дозволяє ефективніше аналізувати взаємозв'язок між параметрами експерименту.

На рис. 3.5 схематично показано всі складові випробувального модуля для дослідів турбін у водному потоці, де вода з резервуара подається насосною системою в лотік лабораторної установки 1, де створюється водний потік з певною швидкістю.



*Рис. 3.5. Схема випробувального модуля для дослідів у водному потоці:
 1 – лотік лабораторної установки; 2 – датчик та шпiцен-масштаб, для зняття показників рівня води; 3 – направляюча потоку перпендикулярно лопатям турбiн; 4 – заслінка водяного потоку; 5 – направляюча камера потоку (шахта); 6 – досліджувана турбiна; 7 – кріплення турбiни з підшипником; 8 – монтажна муфта; 9 – щит автоматизації; 10 – кріплення направляючого валу з підшипником; 11 – провідник; 12 – генератор; 13 – направляючий вал; 14 – монтажна направляюча; 15 – блок керування навантаженням.*

Заслінка водяного потоку 4 забезпечує контрольоване збільшення рівня води h в верхньому б'єфі, що контролюється датчиками [68] та шпiцен-масштабом 2 і відповідними позначками на заслінці. Досліджувана турбiна 6 встановлюється в шахті 5, і вода проходить через її лопаті, змушуючи їх обертатися. Обертотий рух від турбiни за допомогою направляючого валу 12, з'єднаного муфтою 8, передається на генератор 13. Вироблена напруга та оберти генератора через провідник 11 передаються на контролер в щит автоматизації 9 та блок керування навантаженням 15. Датчики також передають сигнал на контролер у щит автоматизації та фіксують важливі параметри роботи турбiни: кількість обертів, напругу без навантаження, напругу під навантаженням, рівні води в верхньому та нижньому б'єфах.

На рис. 3.6 представлено вигляд конструкції універсального випробувального модуля, встановленого в лоток лабораторної установки для проведення досліджень турбін у водному потоці зі сторони верхнього б'єфа. Пристрій розроблено з урахуванням можливості варіювання умов потоку та оснащений усіма необхідними складовими і приладами для вимірювання та контролю параметрів експерименту.



Рис. 3.6. Влаштований в лоток лабораторної установки випробувальний модуль для дослідів у водному потоці (вигляд зі сторони верхнього б'єфа)

На рис. 3.7 показано влаштування в лоток лабораторної установки універсального випробувального модуля для дослідів турбін у водному потоці вже з виглядом зі сторони нижнього б'єфа.



Рис. 3.7. Влаштований в лотік лабораторної установки випробувальний модуль для дослідів у водному потоці (вигляд зі сторони нижнього б'єфа)

Лабораторну установку з дослідження турбін обладнано щитом автоматизації з контролером (рис. 3.8), який:

- вимірює рівень рідини до і після експериментального стенду [68];
- вимірює кількість обертів турбіни з генератором;
- відображає мнемосхему експериментальної установки в режимі реального часу;
- вимірює величину виробленої електричної напруги в різних режимах навантаження та рівнях води у верхньому б'єфі;
- відображає отримані дані в графічному вигляді та записує в архів отримані результати.



Рис. 3.8. Зовнішній вигляд розробленого щита автоматизації

Для автоматизації процесу вимірювання вищезазначених параметрів розроблено автоматичний контролер [69], який складається з:

- програмованого логічного контролера Siemens CPU 1215C;
- модуля розширення аналогових входів SM 1231 AI8x13 BIT;
- давача тиску bd sensors lmp 808;
- перетворювач імпульсів датчика Холла з генератора, реалізований на основі ARDUINO NANO;
- давача дифузного та світло відбиваючого режимів Pepperl + Fuchs UB800-18GM40-I-V1;
- НМІ панелі Schneider Electric HMIET6500.

Для детального аналізу ефективності досліджуваних моделей турбін також потрібно визначити змінну величину – витрату води. Оскільки вартість давачів витрат є доволі високою, доцільним є використання непрямого методу вимірювання витрат на основі зміни рівня рідини. Для цієї задачі застосовувався програмований логічний контролер Siemens CPU 1215C у поєднанні з модулем розширення аналогових входів SM 1231 AI8x13 BIT.

Обрана конфігурація обладнання забезпечує можливість підключення до восьми аналогових давачів із уніфікованим вихідним сигналом, що дозволяє забезпечити точні вимірювання рівня рідини в різних точках експериментальних установок. Крім того, контролер підтримує 14 дискретних входів і 10 дискретних виходів, що дає можливість реалізувати складні алгоритми автоматичного керування та обробки даних у режимі реального часу [70].

Завдяки використанню цієї системи можна визначати витрати води, аналізуючи динаміку зміни рівня рідини, що суттєво знижує фінансові витрати на закупівлю спеціалізованих витратомірів без втрати точності вимірювань.

Автоматичне вимірювання необхідних параметрів в лабораторній установці проводиться наступним чином: при зміні рівня води в лабораторній установці давач, який підключено до аналогового входу модуля розширення надсилає сигнал 4...20 мА (в залежності від наповнення резервуару) про відстань до води на контролер, який перетворює його в цифрове значення за адресою %IW102 подається на блок масштабування FC1, відповідно до меж вимірювання давача. Оскільки потрібно вимірювати рівень води в резервуарі лотка, то від початково заміряної відстані давача до дна лотка віднімаємо отриману відстань і в результаті отримуємо рівень води в лабораторній установці [70].

Кількість обертів ротора вимірюється за допомогою імпульсів, які генерує датчик Хола, інтегрований у генератор. Датчик формує тридцять імпульсів на кожен оберт ротора. Отримані імпульси передаються на перетворювач ARDUINO NANO, який конвертує імпульсні сигнали у сигнали постійної напруги в діапазоні 0...5 В. Далі сформований сигнал подається на контролер в аналоговий вхід PIW0 для подальшої обробки та визначення швидкості обертання (рис. 3.9).

Напруга вимірюється за допомогою аналогового датчика, який підключений до аналогового входу контролера PIW2 у щиті автоматизації (рис. 3.9). Сигнал, отриманий з однієї фази генератора, проходить процес

нормалізації через трансформатор та масштабування в контролері. Після цього цифрове значення напруги використовується для аналізу ефективності роботи турбіни.

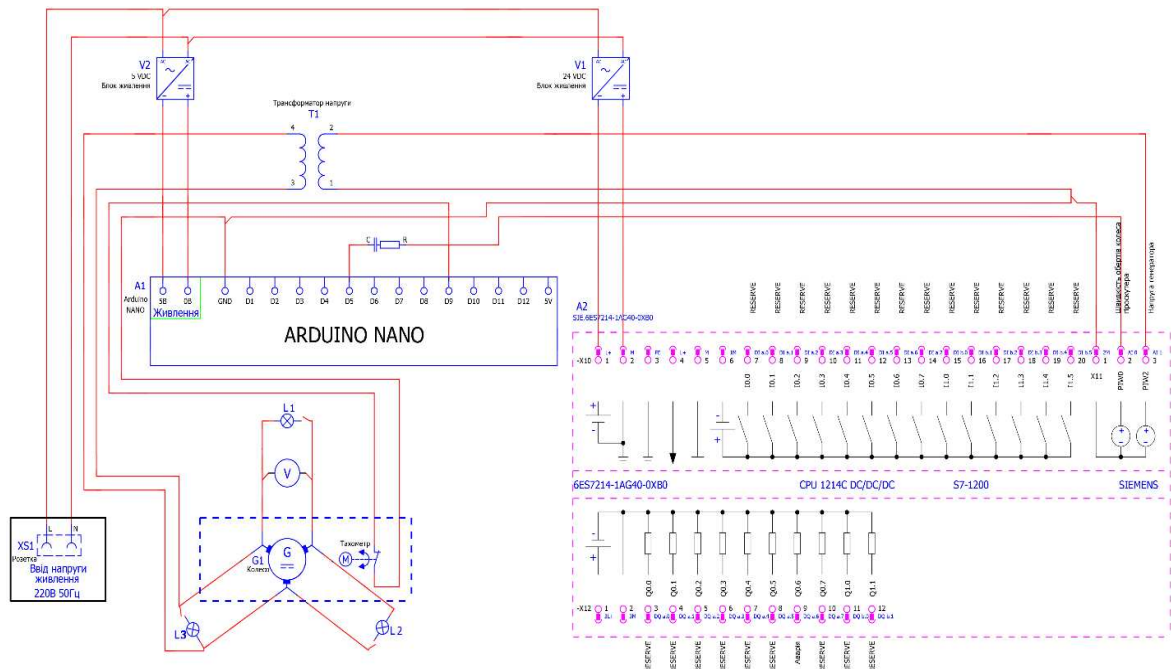


Рис. 3.9. Схема підключення генератора OBL9 в щит автоматизації

Обробка отриманих даних здійснюється в програмному середовищі контролера, що дозволяє в реальному часі відслідковувати зміни параметрів та оцінювати робочі характеристики досліджуваних турбін.

Для додаткового обчислення витрати води був використаний попередній розрахунок, який включав в себе визначення площі перерізу направляючої камери потоку і швидкості водного потоку. Використання математичних формул дозволило точно визначити витрату води в експериментальних умовах [71].

Визначення витрати води [72, 73]

Основною формулою для обчислення витрати води є:

$$Q_1 = S_k v \quad (3.4)$$

де:

- Q_1 – визначена за допомогою програмного забезпечення, $\text{м}^3/\text{с}$;
- S_k – площа перерізу направляючої камери потоку, (м^2);

- v – швидкість водного потоку, (м/с).

Розрахунок площі перерізу [72, 73]

Для визначення площі перерізу трубопроводу використовувалася формула для площі кругового перерізу:

$$S_k = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (3.5)$$

де:

- D – діаметр направляючої камери потоку (м);
- π – константа (приблизно 3.14159).

Розрахунок швидкості потоку

Для обчислення швидкості потоку використовувалася формула для швидкості витікання з отвору:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.6)$$

де:

- g – прискорення вільного падіння, (приблизно 9.81 м/с²);
- h – напір (висота води у верхньому б'єфі від центра шахти), (м).

Таким чином об'єднана формула з допомогою якої проводилося програмне обчислення витрати води виглядає так:

$$Q_1 = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \sqrt{2gh} \quad (3.7)$$

Для забезпечення ефективного моніторингу та керування експериментальною установкою була розроблена SCADA – система, що надає можливості віддаленого доступу до контролера. Основною метою SCADA - системи є візуалізація технологічного процесу вимірювання рівня рідини в лабораторній установці за допомогою інтуїтивно зрозумілої мнемосхеми. Крім того, система реалізує функцію автоматичного розрахунку витрат рідини на основі даних з датчиків, а також забезпечує зчитування в реальному часі показників обертів ротора та напруги що генерується (див. рис. 3.10).

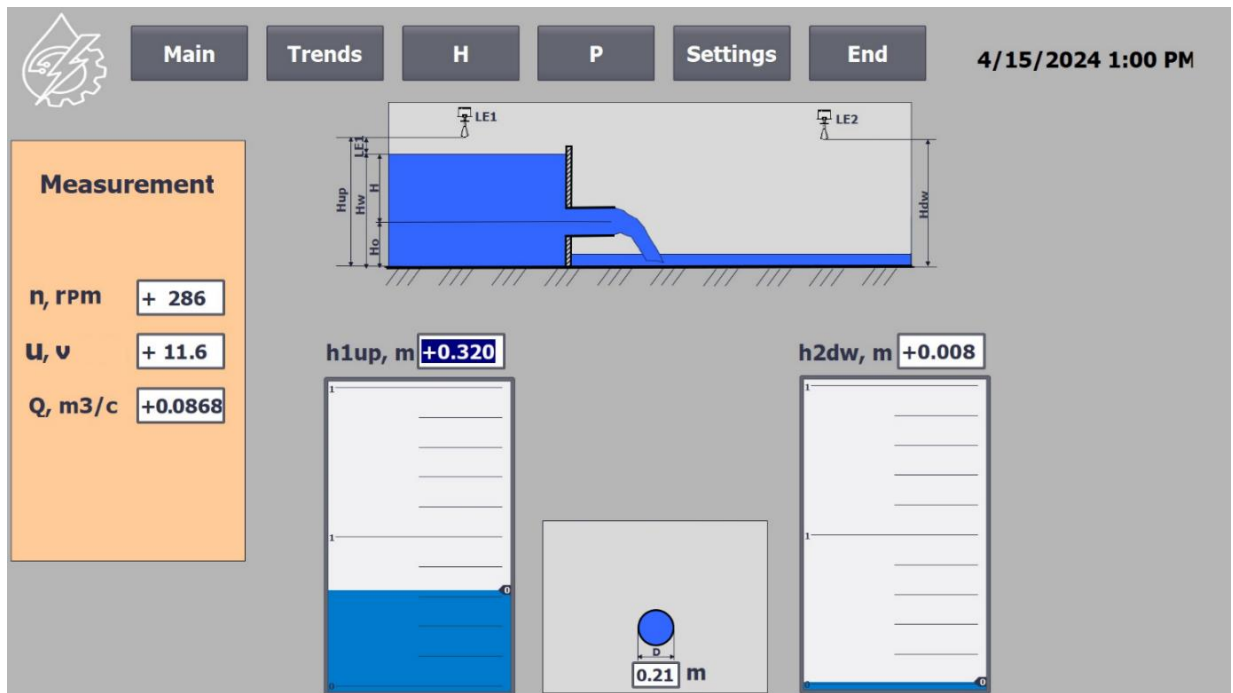


Рис. 3.10. Мнемосхема експериментальної установки

SCADA – система надає користувачу інформацію про динамічну зміну параметрів процесу в графічному вигляді (рис. 3.11), що полегшує аналіз трендів та виявлення закономірностей.

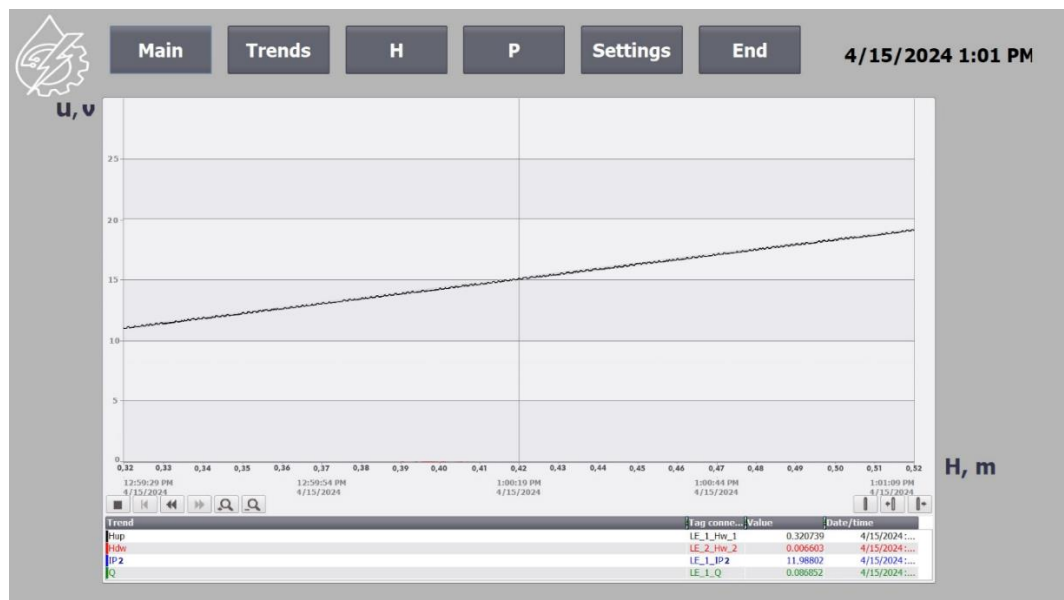


Рис. 3.11. Вікно «Trends» де відображено зміну рівнів напруги залежно від рівня води у верхньому б'єфі

Важливою функцією є також архівація отриманих даних, що дозволяє зберігати інформацію про перебіг експериментів для подальшого аналізу та порівняння результатів. Крім того, SCADA-система надає можливість дистанційного керування параметрами роботи установки, що дозволяє оперативно змінювати режими роботи та оптимізувати процес дослідження [70].

Для забезпечення більш глибокого та всебічного аналізу вихідних показників, що виробляються генератором, у блоці керування навантаженням було здійснено поетапне збільшення навантаження. З цією метою до схеми підключено три ідентичні лампи розжарювання (див. рис. 3.12) загальною номінальною потужністю 63 Вт (3 лампи x 21 Вт кожна). Така конфігурація дозволила отримати вимірювання в чотирьох чітко визначених режимах: без навантаження (холостий хід) та при трьох різних рівнях навантаження, що сприяє комплексному дослідженню електричних характеристик генератора в широкому діапазоні робочих умов.



Рис. 3.12. Зовнішній вигляд блоку з електричним навантаженням

Конструкція випробувального модуля узгоджена з габаритами лотка лабораторної установки та забезпечує можливість проведення контрольних вимірювань рівня води у верхньому б'єфі в шести фіксованих точках. Це дозволяє визначити робочі межі для проведення експериментів. Контрольні

точки розташовані вертикально відносно верхньої кромки заслінки подачі потоку, при цьому нульова відмітка фіксується перпендикулярно до осі, що проходить через центр направляючої шахти потоку, як показано на рис. 3.13.



Рис. 3.13. Зовнішній вигляд випробувального модуля з контрольними позначками рівня води у верхньому б'єфі

На рис. 3.13 показано, що нульову відмітку встановлено на висоті 0,4 м від дна лотка. Таке розташування забезпечує достатній простір для розміщення генератора над рівнем води в нижньому б'єфі. Це рішення дозволяє уникнути прямого контакту електричного обладнання з водою, мінімізує ризик затоплення та короткого замикання, а також підвищує загальну безпеку експлуатації. Крім того, таке конструктивне виконання полегшує доступ до вузлів генератора, спрощує монтаж і демонтаж моделей турбін, що є особливо важливим для лабораторних умов, де передбачена необхідність частої заміни турбін і гнучке використання випробувального модуля для різноманітних експериментів і навчальних цілей.

З метою забезпечення високої точності та надійності експериментальних досліджень, покази зніматимуться двома незалежними методами.

Перший метод полягає у використанні вимірювальних пристроїв, а саме: трикутного водозливу, шпіцен-масштабів (для точного вимірювання рівня води у верхньому та нижньому б'єфах), мультиметра (для вимірювання електричних параметрів, таких як напруга) та лазерного тахометра (для визначення швидкості обертання турбіни з генератором).

Другий метод передбачає автоматизований збір даних за допомогою автоматичного контролера, інтегрованого в щит автоматизації. Цей контролер запрограмований на регулярний збір показів з датчиків та їх реєстрацію.

Паралельне використання автоматизованої системи збору показників та ручних вимірювань дозволить провести комплексну верифікацію отриманих результатів. Співставлення параметрів, отриманих різними методами, дасть змогу виявити та мінімізувати ризик випадкових помилок, похибок калібрування вимірювальних приладів та людського фактору. Такий підхід забезпечить високий ступінь довіри до отриманих експериментальних даних та обґрунтованість зроблених на їх основі висновків.

3.5. Виготовлення пристрою який направлятиме водний потік під кутом 90° до лопатей турбін

Для забезпечення регульованих умов експерименту, зокрема спрямування водного потоку під необхідним кутом до лопатей досліджуваних турбін, був розроблений та виготовлений за допомогою технології 3D-друку спеціальний пристрій – направляюча потоку (рис. 3.14). Її конструкція дозволяє змінювати напрям і рівномірність розподілу потоку, що сприяє покращенню точності експериментальних досліджень та моделюванню різних гідродинамічних умов.

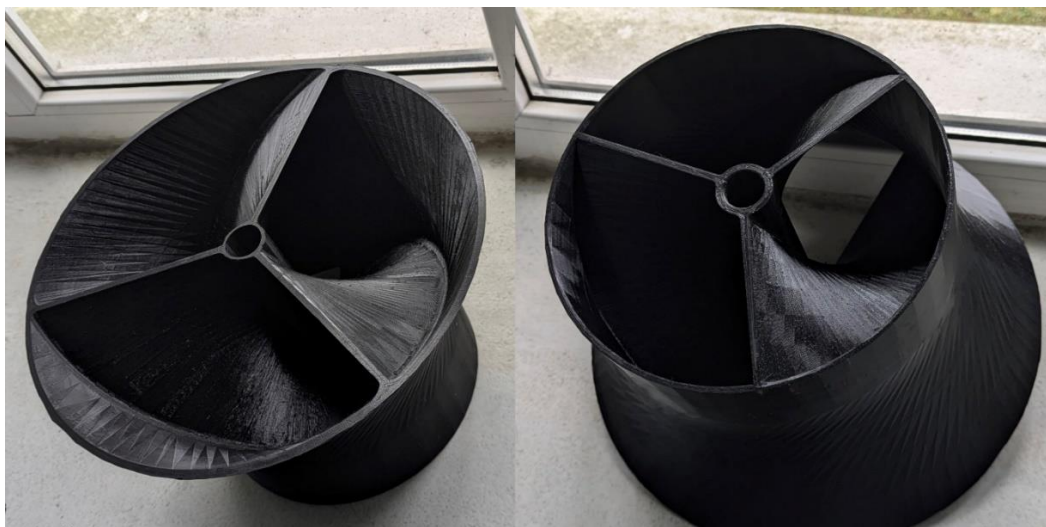


Рис. 3.14. Вигляд направляючої потоку з двох сторін

Направляюча потоку використовується для досліджень в режимі роботи турбін шляхом створення контрольованих умов потоку перпендикулярно до лопатей турбін (90°), та забезпечення рівномірного розподілу потоку по всій площині вхідного перетину турбіни зменшуючи втрати енергії потоку під час перенаправлення.

Таким чином, розроблена направляюча потоку дозволяє створювати контрольовані умови для оцінки роботи турбін, мінімізуючи втрати енергії потоку та забезпечуючи рівномірний розподіл швидкостей у перерізі струменя. Для подальшого аналізу ефективності взаємодії потоку з лопатями турбіни необхідно визначити основні гідродинамічні параметри, зокрема ступінь стиснення струменя, швидкість витікання та витрату рідини.

Для цього розглянемо відповідні розрахункові залежності, що описують взаємозв'язок між геометричними характеристиками направляючої, кінематичними параметрами потоку та коефіцієнтами, що враховують вплив гідравлічних втрат.

На рис. 3.15 зображено конструкцію направляючої потоку має, що включає дзеркальне відображення направляючих кривих відносно лопатей досліджуваних турбін. Така геометрія сприяє оптимальному перенаправленню потоку, одночасно знижуючи втрати енергії на турбулентність і опір.

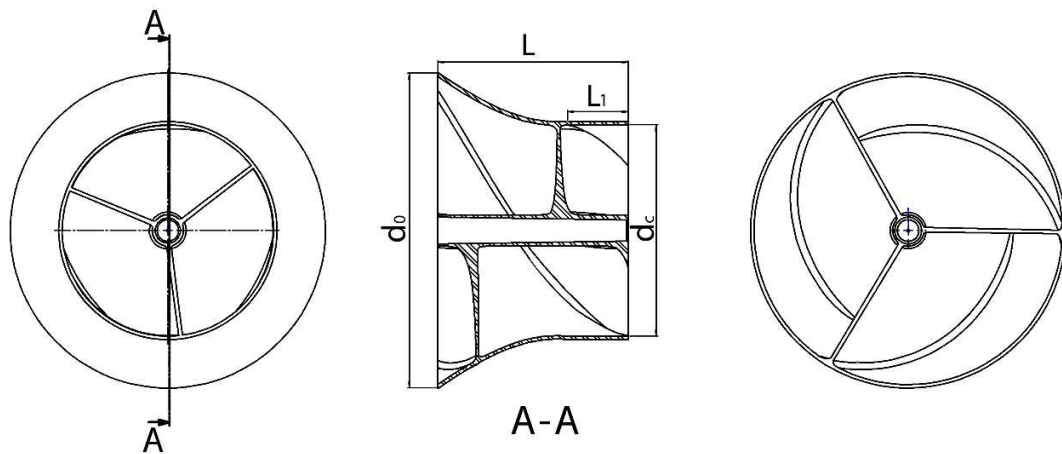


Рис. 3.15. Схема розробленого пристрою для спрямування водного потоку

Збільшений вхідний діаметр ($d_0 = 0,315\text{м}$), що поступово звужується до входу в направляючу камеру ($d_c = 0,2095\text{м}$), створює ефект стиснення струменя. Конічна форма заокруглення ($L - L_1 = 0.11\text{м}$) сприяє рівномірному розподілу швидкостей у потоці, забезпечуючи оптимальні параметри швидкості та тиску води на вході до турбіни. Стиснення струменя також забезпечує плавний перехід від різноспрямованих рухів рідини в резервуарі, зокрема від радіального руху вздовж стінок, до радіально – осьового руху у потоці, що підвищує ефективність роботи турбіни.

Ступінь стиснення характеризується коефіцієнтом стиснення ε , який визначається як відношення площі стисненого поперечного перерізу струменя S_c до площі вхідного отвору S_0 [74]:

$$\varepsilon = \frac{S_c}{S_0} = \left(\frac{d_c}{d_0}\right)^2 \quad (3.8)$$

Швидкість витікання потоку визначається за формулою:

$$v = \varphi \sqrt{2gh} \quad (3.9)$$

де φ – коефіцієнт швидкості. Аналізуючи формулу (3.9), можна зробити висновок, що коефіцієнт швидкості φ визначається як відношення фактичної швидкості витікання рідини до теоретичної швидкості витікання ідеальної рідини:

$$\varphi = \frac{v}{\sqrt{2gh}} \quad (3.10)$$

Дійсна швидкість витікання v завжди дещо менша за ідеальну через вплив опору, тому коефіцієнт швидкості φ завжди менший за одиницю.

Розподіл швидкостей у поперечному перерізі струменя є рівномірним лише в його центральній частині (ядрі струменя), тоді як зовнішній шар рідини зазнає гальмування через тертя об стінки пристрою та його направляючі поверхні (рис. 3.14, 3.15). Експериментальні дослідження свідчать, що швидкість у ядрі струменя практично дорівнює ідеальній, тому коефіцієнт швидкості φ слід розглядати як коефіцієнт середньої швидкості. Якщо витікання відбувається в атмосфері, то тиск по всьому поперечному перерізу циліндричного струменя дорівнює атмосферному.

Витрата рідини через пристрій для спрямування потоку Q_2 визначається як добуток дійсної швидкості витікання на фактичну площу перерізу струменя. Використовуючи співвідношення (3.8) і (3.9), отримаємо [75]:

$$Q_2 = \varepsilon S_0 \varphi \sqrt{2gh} \quad (3.11)$$

Добуток коефіцієнтів ε та φ позначається літерою μ і називається коефіцієнтом витрати. Таким чином, формула (3.11) набуває остаточного вигляду:

$$Q_2 = \mu S_0 \sqrt{2gh} \quad (3.12)$$

Цей вираз (3.12) розв'язує основне завдання визначення витрати і може бути застосований для всіх випадків витікання. Основна складність його використання полягає у необхідності точної оцінки коефіцієнта витрати μ .

Фізична сутність цього коефіцієнта впливає з рівняння (3.12):

$$\mu = \frac{Q_2}{S_0 \sqrt{2gh}} \quad (3.13)$$

Дійсна витрата завжди менша за теоретичну, а коефіцієнт витрати μ не перевищує одиниці через вплив двох основних факторів: стиснення струменя та опору. У різних випадках домінуючим може бути один із цих факторів. Коефіцієнти стиснення ε , опору ζ , швидкості φ та витрати μ залежать передусім від типу отвору або насадки, а також, як і всі безрозмірні

коефіцієнти в гідравліці, від основного критерію гідродинамічної подібності – числа Рейнольдса (Re). Цей параметр визначає режим руху рідини [76].

На рис. 3.16 наведено залежності коефіцієнтів ε , φ і μ для круглого отвору від числа Re , розрахованого за ідеальною швидкістю витікання.

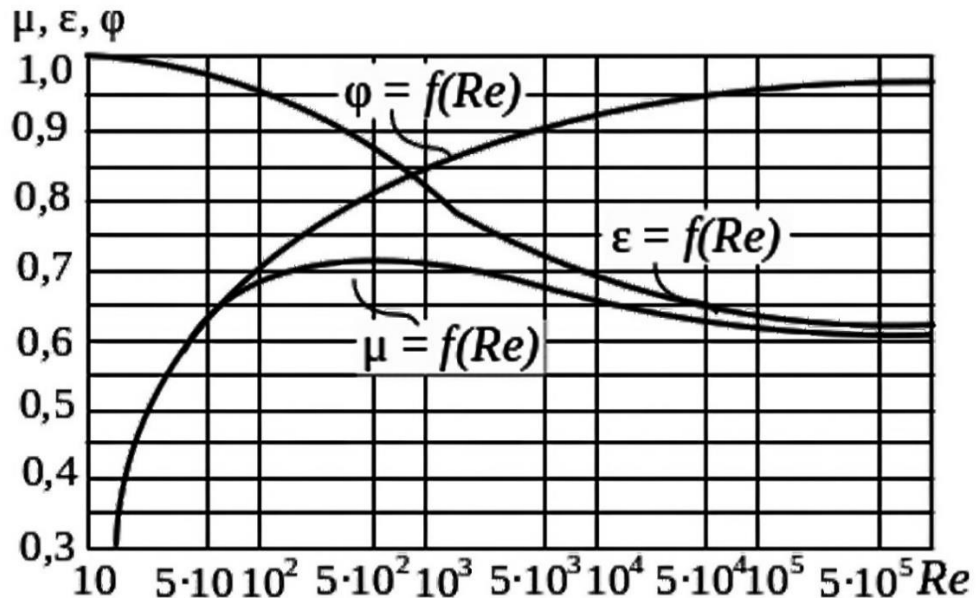


Рис. 3.16 – Залежність ε , φ і μ від Re [77]

З графіка (рис. 3.16) видно, що зі збільшенням Re , тобто зі зменшенням впливу сил в'язкості, коефіцієнт φ зростає внаслідок зменшення коефіцієнта опору ζ , тоді як коефіцієнт ε зменшується через зниження гальмування рідини біля кромки отвору та збільшення радіусів кривизни поверхні потоку на ділянці від кромки до початку циліндричної частини. Значення коефіцієнтів φ та ε при цьому асимптотично наближаються до їхніх теоретичних значень для ідеальної рідини: при $Re \rightarrow \infty$ значення $\varphi \rightarrow 1$, $\varepsilon \rightarrow 0,6$.

Коефіцієнт витрати μ , що визначається як добуток ε на φ , зі збільшенням Re спочатку зростає через різке збільшення φ , досягаючи максимуму 0,69, а потім зменшується через значне падіння ε , стабілізуючись при великих значеннях Re на рівні 0,60–0,61.

Для мало в'язких рідин (води, бензину, гасу тощо), витікання яких зазвичай відбувається при високих значеннях Re , коефіцієнти змінюються у

вузькому діапазоні. У розрахунках приймають такі усереднені значення: $\varepsilon = 0,64$; $\varphi = 0,97$; $\mu = 0,62$; $\zeta = 0,065$ [78].

3.6. Виготовлення розроблених турбін та підготовка до проведення лабораторних досліджень

Для підготовки до проведення лабораторних досліджень розроблених турбін, перед створенням 3D-моделей та виготовленням прототипів було здійснено попередній інженерний розрахунок параметрів турбін. Розрахункова методика базується на класичних залежностях гідродинаміки та враховує обмеження витрати й габаритів лабораторної установки. Методика включає такі етапи:

- Задання вхідних параметрів експлуатації: витрата потоку Q (до $0,16 \text{ м}^3/\text{с}$), доступний напір h_{60} (до $0,6 \text{ м}$); діаметр направляючої шахти $D_{\text{ш}} = 0,21 \text{ м}$, що зумовило прийняття розрахункового діаметра турбін $D = 0,2 \text{ м}$;

- Розрахунок площі перерізу направляючої камери та вхідного перерізу турбіни (за формулою 3.5);

- Визначення швидкості потоку в направляючій камері (за формулою 3.6);

- Визначення швидкості потоку на вході в турбіну (за формулою 3.9);

- Вибір оптимального профілю та довжини лопатей відповідно до заданої довжини турбіни (210 мм) та вимог до кута охоплення (0.75 оберта).

- Обґрунтування форми та кута атаки лопатей базується на принципах вільного вихору, гідродинамічної гармонізації та природної оптимізації потоку, описаних у працях Шаубергера, а також на інженерних підходах, викладених у дослідженнях Оніпка. Зокрема, як базову геометричну основу обрано логарифмічну спіраль, що дозволяє забезпечити стабільне обтікання поверхні лопатей із мінімальними гідродинамічними втратами. Кут атаки лопаті у площині обертання було прийнято в межах $28\text{--}32^\circ$, що відповідає оптимальним значенням для роботи в умовах низьконапірного потоку,

характерного для гвинтових і спіралеподібних турбін шнекового типу, забезпечуючи сприятливий баланс між підйомною силою та опором потоку;

–Звуження корпусу турбіни від входу до виходу обґрунтовано не лише з точки зору збереження та нарощування швидкості потоку, але й спирається на природоорієнтовані гідродинамічні принципи, описані у працях Шаубергера. Зокрема, Шаубергер стверджував, що ефективне транспортування та енергетичне перетворення рідин досягається через динамічну структурування потоку за спіралеподібною траєкторією з прискоренням у звуженому каналі, що сприяє енергетичній концентрації потоку. Це дозволяє не лише зберегти, а й підсилити внутрішню енергію потоку без значних турбулентних втрат. Використання звуження на $\approx 39\%$ (від $0,0314 \text{ м}^2$ до $0,0191 \text{ м}^2$) у досліджуваній турбіні дозволяє реалізувати такий підхід: потік на вході має більшу площу, що зменшує локальні втрати, тоді як звуження до виходу збільшує лінійну швидкість руху рідини відповідно до рівняння Бернуллі. Це створює умови для підвищення коефіцієнта перетворення енергії потоку на механічну роботу ротора. Оніпко у своїх роботах щодо гідравлічних систем також наголошував, що поступове звуження каналів знижує вторинні потоки і турбуленцію, підвищуючи загальний коефіцієнт корисної дії. Такий підхід забезпечує більш рівномірну та ефективну передачу енергії на ротор, а також сприяє плавному проходженню потоку.

На наступному етапі було здійснено створення тривимірних комп'ютерних проєкцій турбін. Для цієї цілі застосовано безкоштовне та широко поширене програмне забезпечення для 3D-моделювання – Blender [79]. Вибір саме цього програмного середовища зумовлений його потужними функціональними можливостями, підтримкою складного моделювання об'єктів довільної геометрії, широкими можливостями візуалізації, гнучкістю налаштувань, а також наявністю великої кількості навчальних ресурсів і активної онлайн-спільноти, що значно полегшує процес освоєння та впровадження нових інструментів.

Створені за допомогою Blender тривимірні моделі турбін не лише дозволили детально опрацювати геометричні параметри конструкцій, але й стали основою для підготовки файлів у форматі STL, придатних для подальшого 3D-друку. Це забезпечило точну відповідність між проектною та фізичною моделлю, що є критично важливим для достовірності експериментальних досліджень.

Наступним етапом стала матеріалізація віртуальних моделей шляхом виготовлення фізичних прототипів методом адитивного виробництва. Для цієї мети використано високоточне обладнання – 3D-принтер Anycubic Kobra Max [80] (див. рис. 3.17), який дозволяє створювати великогабаритні об'єкти зі складною просторовою формою з високою роздільною здатністю. Завдяки надійності конструкції та стабільності друку, пристрій забезпечує точну реалізацію навіть дрібних елементів турбіни, що особливо важливо для збереження аерогідродинамічних характеристик турбіни.



Рис. 3.17. Процес 3D – друку розробленої моделі турбіни на 3D принтері Anycubic Kobra Max

Фізичні моделі турбін, отримані в результаті процесу 3D-друку, використовувалися для проведення експериментів у лабораторних умовах з метою аналізу впливу конструктивних параметрів на ефективність роботи турбін у різних середовищах. У рамках дослідження було розроблено та виготовлено п'ять експериментальних моделей: три варіанти спіралеподібних турбін, одну турбіну гвинтового типу та одну модель шнекової турбіни. Всі турбіни були виготовлені з використанням адитивної технології, що забезпечило високу точність відтворення складної геометрії, суворе дотримання проектних параметрів та відповідність фактичної конструкції цифровим 3D-моделям. Представлені модифікації шнекових турбін (див. рис. 3.18–3.22) мають суттєві конструктивні відмінності, зокрема у геометрії лопатей (кут нахилу, профіль, довжина) та конфігурації корпусу (форма, розміри вхідного і вихідного отворів), що дозволяє комплексно досліджувати вплив різних інженерних рішень на гідродинамічну ефективність за різних режимів потоку.

Для забезпечення коректності порівняльного аналізу продуктивності досліджуваних турбін усі зразки були спроектовані з однаковими габаритними розмірами, узгодженими з геометрією направляючої шахти випробувального модуля. Ця шахта була спроектована з урахуванням витратної спроможності лабораторної установки, що дозволило забезпечити стабільний режим течії при заданій витраті. Діаметр кожної турбіни становить $D = 200$ мм, довжина – 210 мм, а кожна лопать виконує 0.75 оберта навколо своєї осі. Крім того, площа перерізу на вході ($\Delta S = 0,0314$ м²) та виході ($\Delta S_1 = 0,0191$ м²) також залишалася незмінною для всіх експериментальних турбін. Така уніфікація габаритних параметрів створює стандартизовані умови для проведення експериментів, що забезпечує:

- Об'єктивність оцінки. Виключення впливу відмінностей у розмірах дозволяє більш чітко виявити вплив конструктивних особливостей на робочі характеристики турбін.

- Порівнянність результатів. Єдність ключових геометричних параметрів створює умови для коректного порівняльного аналізу продуктивності й коефіцієнта корисної дії.

- Відтворюваність експерименту. Однакові розміри полегшують повторення досліджень, забезпечуючи можливість перевірки отриманих даних.

Такі стандартизовані підходи дозволяють зосередитися на аналізі конструктивних особливостей і оптимізації параметрів турбін, виключивши вплив геометричних відмінностей на результати експерименту. Це підвищує надійність, точність і наукову обґрунтованість отриманих даних.

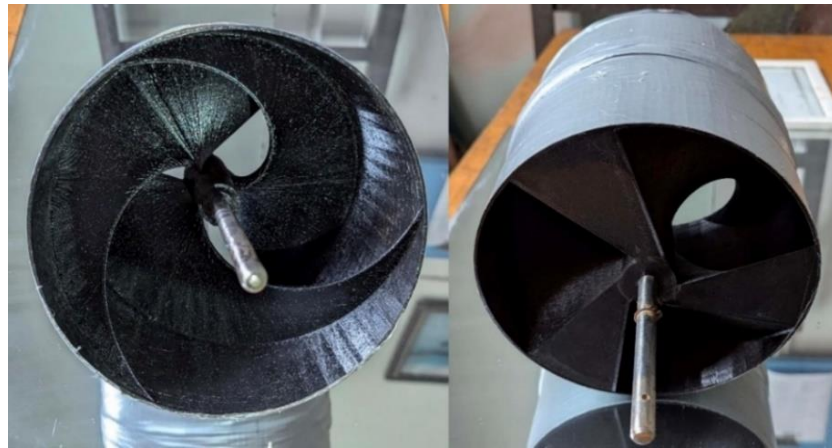


Рис. 3.18. Шнекова турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі (шифр I₂)



Рис. 3.19. Шнекова турбіна з спіралеподібними лопатями що збільшуються в об'ємі (шифр II₂)



Рис. 3.20. Шнекова турбіна з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу (шифр III₂)

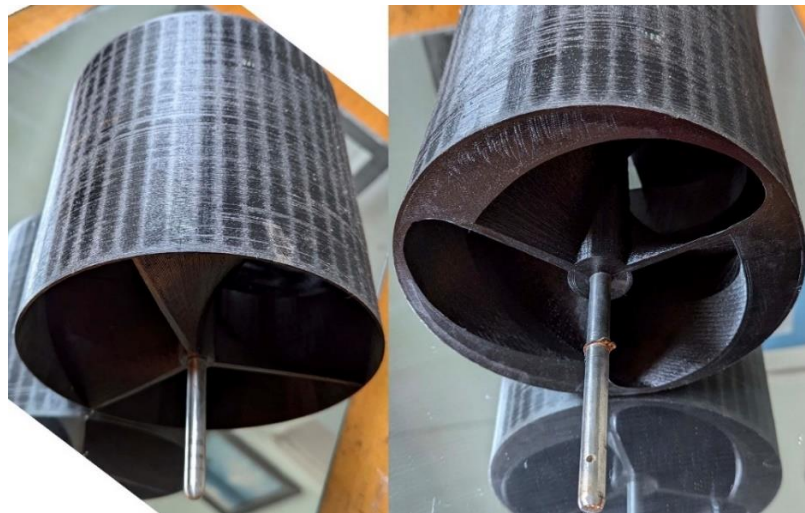


Рис. 3.21. Шнекова турбіна гвинтового типу (шифр IV)



Рис. 3.22. Класична шнекова турбіна (шифр V)

Шнекові спіралеподібні турбіни мають різні конфігурації лопатей (рис. 3.18 – 3.20), що дозволяє оцінити вплив їх форми та кута нахилу потоку на продуктивність установки. Турбіна гвинтового типу (рис. 3.21) характеризується конструктивними виямками та масивним циліндричним корпусом, що працює з ефектом маховика, тоді як класична шнекова турбіна (рис. 3.22) оптимізована для роботи при низьких перепадах напору.

Виготовлення цих турбін є важливим етапом для проведення лабораторних досліджень, спрямованих на порівняння їхніх аеродинамічних та гідродинамічних характеристик, визначення ефективності кожного типу турбін та адаптації їх до різних умов експлуатації.

3.7. Регулювання ваги та балансування турбін для забезпечення точності експериментальних досліджень

Під час експериментальних досліджень кожна виготовлена модель турбіни мала індивідуальну вагу, що значною мірою впливало на точність та відтворюваність отриманих результатів. Оскільки маса турбіни впливає на її механічну стабільність, динамічну поведінку та характеристику енергоефективності, було прийнято рішення стандартизувати вагу всіх турбін шляхом її приведення до рівня найважчої турбіни.

Збільшення ваги турбін здійснювалося шляхом рівномірного намотування додаткового матеріалу – дроту з високою питомою вагою. Процес намотування проводився з урахуванням оптимального розподілу маси по всій конструкції, щоб уникнути дисбалансу та зменшити ймовірність виникнення небажаних вібрацій чи коливань під час роботи турбіни. Дріт був надійно закріплений епоксидною смолою та підсиленою клейкою стрічкою, які забезпечували міцність фіксації та запобігали зсувам під час експлуатації. Цей метод унеможлилював створення гідродинамічних перешкод у зоні обертання лопатей, що є критично важливим для збереження динамічних характеристик.

Після доведення ваги кожної моделі до заданого рівня було проведено балансування турбін. Цей етап включав використання спеціалізованого балансувального верстата VTM Group (рис. 3.23) [81], який дозволяє з високою точністю оцінювати розподіл маси та коригувати її шляхом введення локальних змін. Процес балансування є ключовим для забезпечення динамічної стійкості турбін під час обертання, що значно знижує рівень вібрацій та підвищує ефективність енергетичного перетворення.

Нормалізація ваги й балансування підвищили точність та відтворюваність експериментальних показників і забезпечили надійність роботи турбін у різних умовах. Отримані результати стали основою для детального аналізу гідродинамічних характеристик турбін та розробки рекомендацій щодо їх оптимізації для реальних експлуатаційних умов.



Рис. 3.23. Процес балансування шнекової турбіни на балансувальному верстаті

Балансування усунуло дисбаланс, спричинений нерівномірним розподілом ваги, мінімізувало вібрації та забезпечило стабільність і точність вимірювань.

Усунення дисбалансу турбін є критично важливим для об'єктивної оцінки параметрів, таких як коефіцієнт корисної дії, швидкість обертання та

механічна продуктивність. Завдяки виконаним заходам було досягнуто високої точності результатів, що є основою для подальших досліджень і вдосконалення конструктивних особливостей турбін.

3.8. Генератори

Під час проведення експериментальних досліджень у повітряному потоці в якості генератора використовувався двигун фена BRS-335 (рис. 3.24) із номінальною напругою 17 В і потужністю 41 Вт. Вибір цього двигуна був зумовлений його відповідністю вимогам першого етапу досліджень, основною метою якого було визначення найоптимальнішої конструкції серед трьох спіралеподібних турбін. Застосування генераторів більшої потужності на цьому етапі було недоцільним, оскільки акцент робився на порівняльному аналізі конструкцій, а не на їхній абсолютній потужності.

Двигун BRS-335 продемонстрував високу ефективність у проведенні досліджень завдяки своїм конструктивним та експлуатаційним особливостям. Він забезпечував достатню потужність для отримання відповідних показників про ефективність різних турбін.

Компактні розміри та зручність інтеграції дозволили легко встановити двигун у випробувальний модуль, спрощуючи проведення експериментів і мінімізуючи трудомісткість налаштувань.

Використання двигуна BRS-335 сприяло узгодженню умов випробувань, що дозволило оцінити конструктивні особливості кожної турбіни. Застосування єдиного генератора для всіх експериментів виключало вплив змінних зовнішніх факторів, забезпечуючи достовірність отриманих результатів.

У подальших дослідженнях, які будуть проводитися у водяному потоці, планується використання генераторів більшої потужності. Це дозволить визначити номінальну та абсолютну потужність турбін, що стане основою для оцінки їхнього реального потенціалу у практичному застосуванні.



Рис. 3.24. Двигун BRS-335



Рис. 3.25. Генератор мотор-колесо OBL9

Для проведення експериментальних досліджень у водному потоці використовувався генератор у вигляді мотор-колеса від гідроборда марки OBL9 (рис. 3.25) із номінальною напругою 36 В і потужністю 250 Вт. Вибір цього двигуна як генератора був обумовлений необхідністю забезпечення уніфікованих умов випробувань для всіх створених прототипів турбін. Це дозволило об'єктивно порівнювати їхню ефективність у заданих умовах.

Генератор OBL9 має низку ключових переваг, що сприяють підвищенню точності та ефективності експериментальних досліджень.

Однією з важливих особливостей є вбудовані датчики Хола [82, 83], які забезпечують передачу сигналу на контролер, що дозволяє здійснювати точні вимірювання швидкості обертання турбін. Це значно підвищує достовірність експериментальних даних і спрощує інтеграцію генератора з автоматизованою системою контролю.

Крім того, оптимальна потужність генератора (250 Вт) була достатньою для проведення порівняльного аналізу продуктивності різних конструкцій турбін. Використання генератора з більшою потужністю на цьому етапі не

було необхідним, оскільки дослідження фокусувалося на відносній ефективності конструкцій, а не на їхній абсолютній потужності.

Завдяки такому підходу вдалося забезпечити об'єктивність експериментальних даних. Усі турбіни працювали в однакових умовах, що дозволило виключити вплив зовнішніх факторів і зосередитися на аналізі конструктивних особливостей.

У майбутніх дослідженнях планується перейти до визначення абсолютної потужності самих турбін. Це стане наступним етапом вивчення їхньої ефективності та дозволить оцінити їхній реальний потенціал у практичному використанні.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі дисертаційної роботи зосереджено увагу на інструментальному забезпеченні експериментальних досліджень, необхідному для комплексного аналізу роботи шнекових турбін у повітряному та водному середовищах. Розширення функціональності лабораторної установки здійснювалося шляхом поетапної модернізації вимірювального комплексу, впровадження спеціалізованого випробувального модуля, а також створення пристрою для зміни напрямку подачі потоку. Високої точності фіксації параметрів вдалося досягти завдяки поєднанню ручних і автоматизованих методів контролю. Такий підхід дозволив об'єктивно оцінити ефективність нових конструкцій, сформувати базу для їх порівняння та перевірити гіпотези, закладені на етапі інженерного проектування. Основні результати цього етапу викладено у таких висновках:

1. Лабораторна установка була дообладнана випробувальним модулем для комплексного тестування турбін у водному та повітряному потоках під різними навантаженнями. Інтеграція сучасних вимірювальних приладів (лазерного тахометра, мультиметра) та системи автоматизації SCADA забезпечила високу точність збору й обробки експериментальних даних.

2. Розроблено й встановлено спеціальний пристрій для спрямування водного потоку під кутом 90° до площини лопатей турбін. Завдяки поступовому звуженню каналу від входу до виходу досягнуто додаткового стискування потоку та підвищення його швидкості, що забезпечило стабільніші умови подачі води для тестування.

3. Використання двох паралельних методів збору даних (фізичні прилади + автоматизовані датчики) дозволило суттєво підвищити достовірність і повторюваність результатів.

4. Виготовлено набір шнекових турбін (три спіралеподібні, одна гвинтова і одна класична шнекова) методом 3D-друку, що забезпечило високу точність відтворення геометрії та уніфікацію габаритних параметрів для коректного порівняння характеристик.

5. Балансування турбін та приведення їх ваги до рівня найважливішої конструкції мінімізувало вібрації, що покращувало стабільність і точність вимірювань.

6. Обґрунтовано вибір генераторів відповідно до умов експериментів: для повітряного потоку використовується двигун фена BRS-335, для водного – мотор-колесо OBL9 з датчиками Хола. Це дозволило забезпечити оптимальні режими роботи для кожного типу.

Проведена модернізація суттєво розширила експериментальні можливості установки, дозволила створити стабільні умови для тестувань та забезпечила об'єктивну оцінку ефективності турбін, що заклало основу для подальшої оптимізації їхніх конструкцій і практичного застосування.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [59 – 83].

РОЗДІЛ 4

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОЕКТОВАНИХ ТУРБІН В ПОВІТРЯНОМУ ПОТОЦІ

4.1. Планування експериментів в повітряному потоці запроектованих спіралеподібних турбін

Для оцінки ефективності запроектованих шнекових турбін було проведено перший етап експериментальних досліджень у повітряному потоці трьох видів спіралеподібних турбін, які були детально описані в розділі 2.

Метою проведення експериментів у повітряному потоці є визначення оптимальної конструкції серед трьох типів розроблених спіралеподібних турбін, які захищено одним патентом на корисну модель.

Під час лабораторних дослідів турбіни тестувалися в умовах контрольованого потоку повітря в трьох режимах, що дозволяло вимірювати змінні величини такі як:

p_1 – тиск повітряного потоку, 2 атм;

p_2 – тиск повітряного потоку, 4 атм;

p_3 – тиск повітряного потоку, 6 атм;

n – кількість обертів турбіни, об/хв;

U – вироблена електрична напруга генератором, В;

P_1 – електричне навантаження в режимі холостого ходу, 0 Вт;

P_2 – електричне навантаження потужністю 21Вт.

Зняття показів напруги (U) та швидкості обертання (n) з генератора є важливим елементом експериментального процесу. Ці показники дозволяють оцінити як електричну, так і механічну ефективність турбін за таких аспектів:

–Енергетична продуктивність. Напруга U є ключовим показником для визначення кількості електроенергії, яку турбіна здатна виробляти за різних умов повітряного потоку. Це дозволяє оцінити практичну корисність турбіни для реальних застосувань;

–Механічна ефективність. Швидкість обертання n відображає здатність турбіни передавати енергію потоку на генератор. Більш високі оберти при заданих умовах свідчать про кращу конструкцію турбіни.

Існують різні методи планування експериментів, спрямовані на зменшення кількості дослідів, зокрема метод активного експерименту. Він передбачає алгоритмізоване розташування точок вимірювання у міжфакторному просторі, що дозволяє зменшити кількість необхідних дослідів у 5-10 разів у порівнянні з традиційними методами [84-90].

При виборі методу планування експериментів у повітряному потоці для оцінки ефективності спіралеподібних турбін важливо враховувати такі фактори, як точність вимірювань, кількість дослідів, а також часові та фінансові ресурси. Використання методу активного експерименту не лише суттєво скорочує час проведення досліджень і зменшує витрати, а й забезпечує високу точність і надійність отриманих результатів.

Під час проведення експериментів у повітряному потоці всі дані (швидкість обертання, вироблена напруга в різних режимах тощо) записуються в спеціальну таблицю (табл. 4.1) для подальших аналізів й висновків.

Таблиця 4.1

*Схема планування експериментів з дослідження турбін у
повітряному потоці*

Шифр турбіни	p_1		p_2		p_3	
	U	n	U	n	U	n
P_1						
P_2						

Отримані результати можна обробляти за допомогою методів регресійного або дисперсійного аналізу, щоб виявити залежності між параметрами потоку і продуктивністю різних моделей турбін [91-92]. Методи регресійного аналізу дозволяють побудувати математичні моделі, що

описують залежності між змінними [89], тоді як дисперсійний аналіз допомагає визначити статистичну значущість впливу окремих факторів на результати експерименту [90]. Проведені експерименти шифрувалися наступним чином: римська цифра на початку шифру означає модель досліджуваної турбіни з початковою вагою, а розміщена в нижньому індексі за нею латинська цифра (₁) – означає що вага такої турбіни збільшена до рівня ваги, найважчої серед досліджуваних турбін з похибкою в $\pm 5\%$ [93]. Шифри відповідають таким назвам турбін:

I – турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі вагою 922 грами;

II – турбіна з спіралеподібними лопатями, які збільшуються в об'ємі вагою 925 грами;

III – турбіна з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу вагою 755 грами;

III₁ – турбіна з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу вагою 923 грами.

Для визначення оптимального варіанту конструкції поміж спіралеподібних турбін проводиться аналіз впливу тиску повітря (p_1, p_2, p_3) в режимах холостого ходу (P_1) та під навантаженням (P_2) на моделі досліджуваних турбін. На цьому етапі досліджень кожна досліджувана модель тестувалась при трьох значеннях тиску повітря. Також для коректного аналізу результатів лабораторних експериментів проведено додаткові дослідження турбіни з прямими спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу де вирівнювалася маса турбіни з початкової ваги 755 гр. до – 923 гр. Тоді для визначення ефективнішого варіанту серед досліджуваних турбін, необхідно зробити $3 \cdot 2 \cdot 4 = 24$ дослідів при яких потрібно отримати 48 показників (табл. 4.2-4.5).

4.2. Дослідження турбін у повітряному потоці

4.2.1. Дослідження турбіни І

Для дослідження турбіни з будовою лопатей за принципом золотої спіралі у повітряному потоці в умовах впливу двох змінних на характеристики турбіни використано повний факторний експеримент [86]. Це дозволить дослідити вплив кожного з факторів (тиск повітря та навантаження), а також їх взаємодію. В результаті потрібно провести експерименти для кожної комбінації рівнів факторів, щоб визначити залежність.

Перед проведенням експериментів було зважено виготовлену модель турбіни з будовою лопатей за принципом золотої спіралі, вага склала 922 гр.

Тестування турбіни з шифром І проводились в режимах холостого ходу ($P_1 = 0$ Вт) та під навантаженням ($P_2 = 21$ Вт), при трьох позначках тиску повітря ($p_1 = 2$ атм, $p_2 = 4$ атм, $p_3 = 6$ атм). Отримані показники досліджень наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Отримані показники турбіни (I) в повітряному потоці оберти (n) та напруга (U) залежно від тиску (p_1, p_2, p_3) і навантаження (P_1, P_2)

Шифр турбіни I	p_1		p_2		p_3	
	U	n	U	n	U	n
P_1	2,1	138	3,9	260	5,6	370
P_2	0	0	0	0	2	131

На основі отриманих значень дослідів турбіни з будовою лопатей за принципом золотої спіралі у повітряному потоці для візуалізації та кращого порівняння результатів побудовано графіки залежності вироблених кількості обертів (n) та напруги (U) від тиску повітря (p).

Після проведення експериментів досліджуваної турбіни з будовою лопатей за принципом золотої спіралі у повітряному потоці на кожній позначці рівнів тиску повітря (p_1, p_2, p_3) та зміні навантаження (P_1, P_2), виконано аналіз впливу факторів на вихідні параметри (швидкість обертання турбіни n , електрична напруга (U), для вибору оптимальної турбіни, а також визначення її ефективності. З метою проведення аналізу ефективності турбіни, побудовано графік залежності виробленої напруги генератором від тиску повітря для кожного рівня навантаження (рис. 4.1), та графік залежності вироблених турбіною обертів від тиску повітря, для кожного рівня навантаження (рис. 4.2).

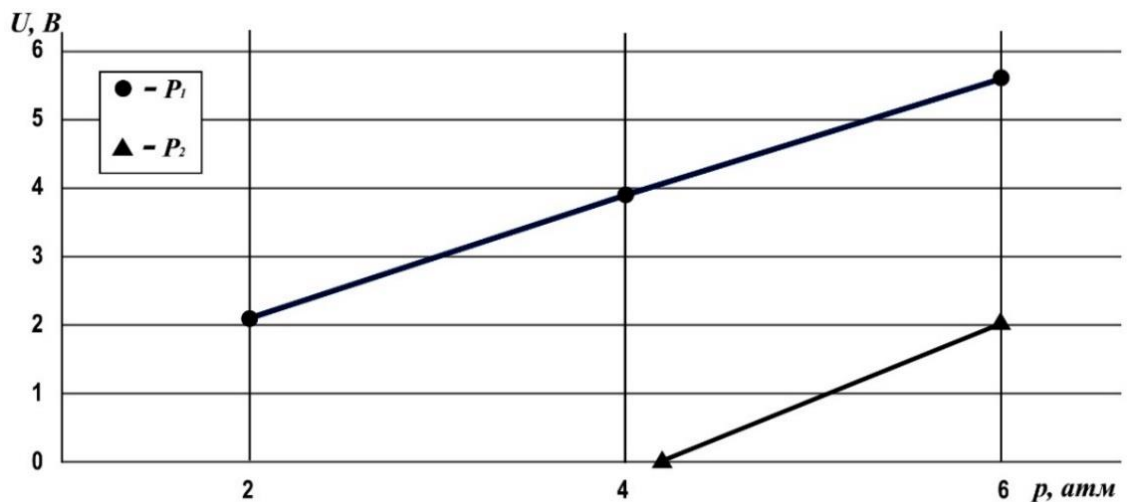


Рис. 4.1. Графік залежності напруги від тиску повітря турбіни I

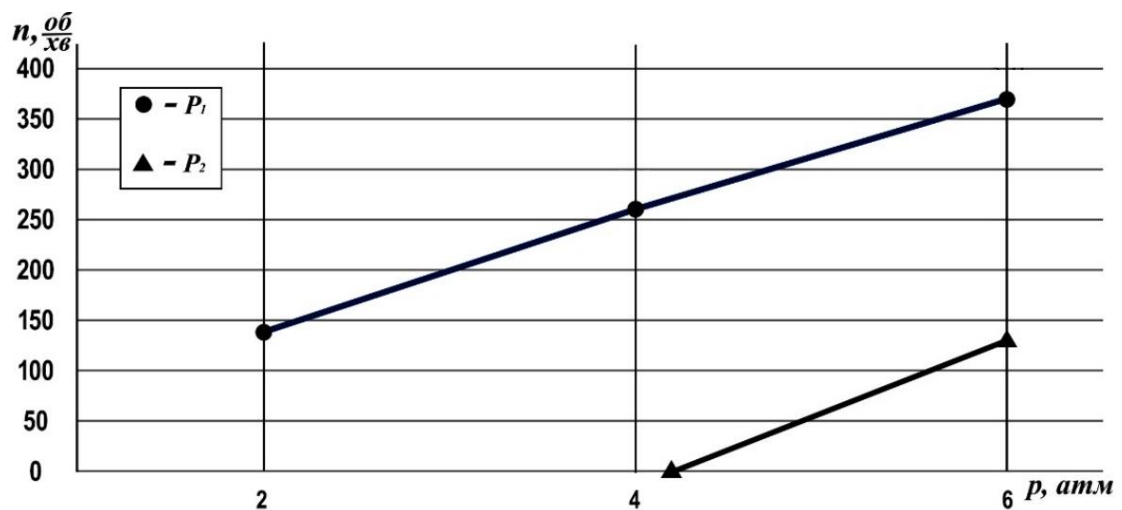


Рис. 4.2. Графік залежності кількості обертів від тиску повітря турбіни I

Щоб вивчити взаємозв'язок тиску повітря і навантаження на турбіну з будовою лопатей за принципом золотої спіралі проведено дисперсійний аналіз [84]. Це дозволяє визначити, як зміна одного фактору (тиск повітря) впливає на вихідний параметр за різних значень другого фактору (навантаження).

Дослідження в повітряному потоці турбіни з будовою лопатей за принципом золотої спіралі показали (табл. 4.2, рис. 4.1, 4.2), що при вмиканні навантаження турбіна не зупинялась на позначках тиску повітря тільки в 6 атмосфер при цьому напруга просідала до 2 В, а при вмиканні навантаження на позначках тиску повітря в 4 і 2 атмосферах – турбіна зупинялась. Як видно на рис. 4.2 з обертами виявилась аналогічна ситуація, зі збільшенням навантаження турбіна сповільнюється до нульових позначок обертів при тиску в $p_1 = 2$ атм та $p_2 = 4$ атм, тільки при $p_3 = 6$ атм оберти турбіни були $n = 131$ об/хв.

4.2.2. Дослідження турбіни II

Для дослідження турбіни з спіралеподібними лопатями що збільшуються в об'ємі у повітряному потоці в умовах впливу двох змінних на характеристики турбіни, використано повний факторний експеримент [86]. Це дозволить дослідити вплив кожного з факторів (тиск повітря та навантаження), а також їх взаємодію. В результаті потрібно провести експерименти для кожної комбінації рівнів факторів, щоб визначити залежність.

Перед проведенням експериментів було зважено виготовлену модель турбіни з прямими спіралеподібними лопатями що збільшуються в об'ємі, вага склала 925грам.

Тестування турбіни з шифром II проводились в режимах холостого ходу ($P_1 = 0$ Вт) та під навантаженням ($P_2 = 21$ Вт), при трьох позначках тиску повітря ($p_1 = 2$ атм, $p_2 = 4$ атм, $p_3 = 6$ атм). Отримані показники досліджень наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Отримані показники турбіни (II) в повітряному потоці оберти (n) та напруга (U) залежно від тиску (p_1, p_2, p_3) і навантаження (P_1, P_2)

Шифр турбіни II	p_1		p_2		p_3	
	U	n	U	n	U	n
P_1	2,3	151	4,2	284	5,8	389
P_2	0	0	0	0	2,4	160

На основі отриманих значень дослідів турбіни з шифром II у повітряному потоці для візуалізації та кращого порівняння результатів побудовано графіки залежності вироблених кількості обертів (n) та напруги (U) від тиску повітря (p).

Після проведення експериментів досліджуваної турбіни з будовою лопатей за принципом золотої спіралі у повітряному потоці на кожній позначці рівнів тиску повітря (p_1, p_2, p_3) та зміні навантаження (P_1, P_2), виконано аналіз впливу факторів на вихідні параметри (швидкість обертання турбіни n , електрична напруга (U), для вибору оптимальної турбіни, а також визначення її ефективності. З метою проведення аналізу ефективності турбіни, побудовано графік залежності виробленої напруги генератором від тиску повітря для кожного рівня навантаження (рис. 4.3), та графік залежності вироблених турбіною обертів від тиску повітря, для кожного рівня навантаження (рис. 4.4).

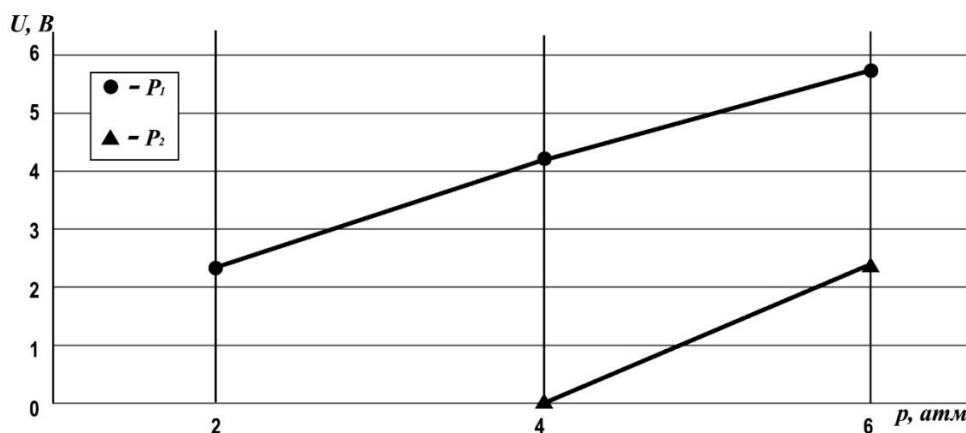


Рис. 4.3. Графік залежності напруги від тиску повітря турбіни II

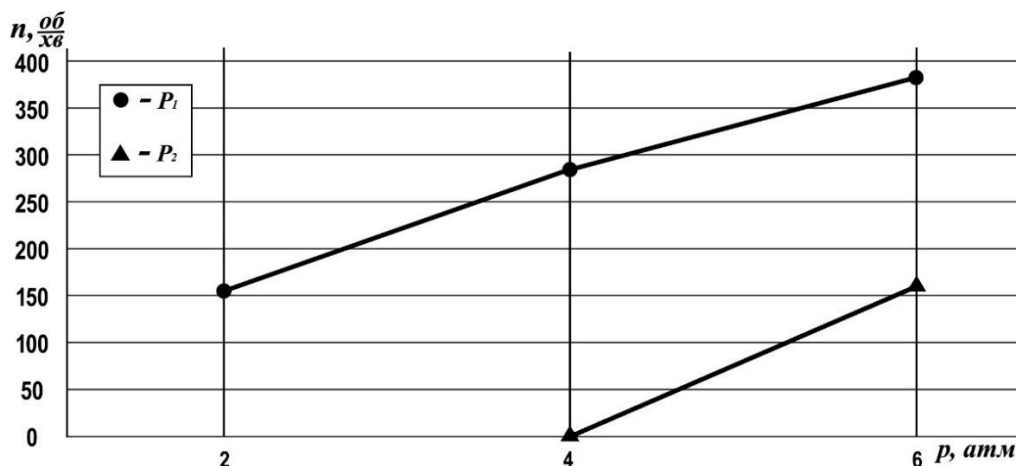


Рис. 4.4. Графік залежності кількості обертів від тиску повітря турбіни II

Щоб вивчити взаємозв'язок тиску повітря і навантаження на турбіну з прямими спіралеподібними лопатями що збільшуються в об'ємі проведено дисперсійний аналіз [84]. Це дозволяє визначити, як зміна одного фактору (тиск повітря) впливає на вихідний параметр за різних значень другого фактору (навантаження).

Дослідження в повітряному потоці турбіни з будовою лопатей за принципом золотої спіралі показали (табл. 4.3, рис. 4.3, 4.4), що при вмиканні навантаження турбіна не зупинялась на позначках тиску повітря тільки в 6 атмосфер при цьому напруга просідала до 2,4 В, а при вмиканні навантаження на позначках тиску повітря в 4 і 2 атмосферах – турбіна зупинялась. Як видно на рис. 4.4 з обертами виявилась аналогічна ситуація, зі збільшенням навантаження турбіна сповільнюється до нульових позначок обертів при тиску в $p_1 = 2$ атм та $p_2 = 4$ атм, тільки при $p_3 = 6$ атм оберти турбіни були $n = 160$ об/хв

4.2.3. Дослідження турбіни III

Для дослідження турбіни з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу у повітряному потоці в умовах впливу двох змінних на характеристики турбіни, використано повний факторний експеримент [84, 86].

Це дозволить дослідити вплив кожного з факторів (тиск повітря та навантаження), а також їх взаємодію. В результаті потрібно провести експерименти для кожної комбінації рівнів факторів, щоб визначити залежність.

Перед проведенням експериментів було зважено виготовлену модель турбіни з прямими спіралеподібними лопатями, які збільшуються в об'ємі, вага склала 755гр.

Тестування турбіни з шифром III проводились в режимах холостого ходу ($P_1 = 0$ Вт) та під навантаженням ($P_2 = 21$ Вт), при трьох позначках тиску повітря ($p_1 = 2$ атм, $p_2 = 4$ атм, $p_3 = 6$ атм). Отримані показники досліджень наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Отримані показники турбіни (III) в повітряному потоці оберти (n) та напруга (U) залежно від тиску (p_1, p_2, p_3) і навантаження (P_1, P_2)

Шифр турбіни III	p_1		p_2		p_3	
	U	n	U	n	U	n
P_1	2,6	168	4,8	312	6,5	420
P_2	0	0	0,9	59	3,2	207

На основі отриманих значень дослідів турбіни з шифром III у повітряному потоці для візуалізації та кращого порівняння результатів побудовано графіки залежності вироблених кількості обертів (n) та напруги (U) від тиску повітря (p).

Після проведення експериментів досліджуваної турбіни з будовою лопатей за принципом золотої спіралі у повітряному потоці на кожній позначці рівнів тиску повітря (p_1, p_2, p_3) та зміні навантаження (P_1, P_2), виконано аналіз впливу факторів на вихідні параметри (швидкість обертання турбіни n, електрична напруга (U), для вибору оптимальної турбіни, а також визначення її ефективності. З метою проведення аналізу ефективності турбіни, побудовано графік залежності виробленої напруги генератором від тиску

повітря для кожного рівня навантаження (рис. 4.5), та графік залежності вироблених турбіною обертів від тиску повітря, для кожного рівня навантаження (рис. 4.6).

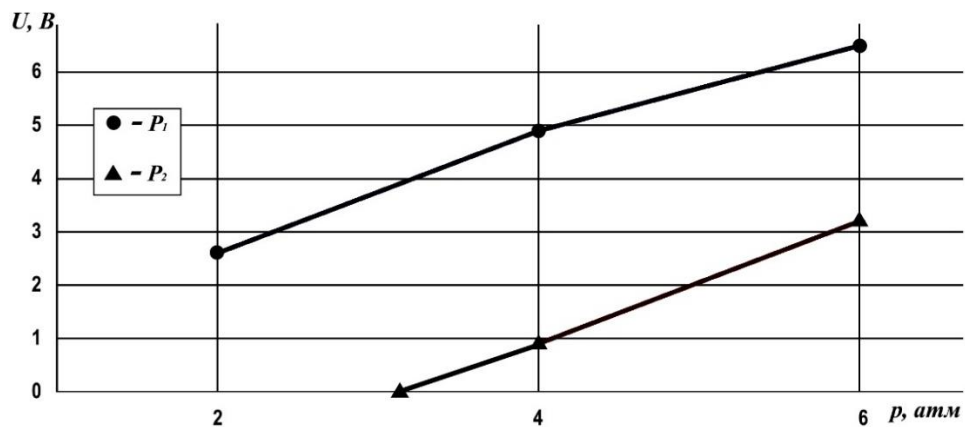


Рис. 4.5. Графік залежності напруги від тиску повітря турбіни III

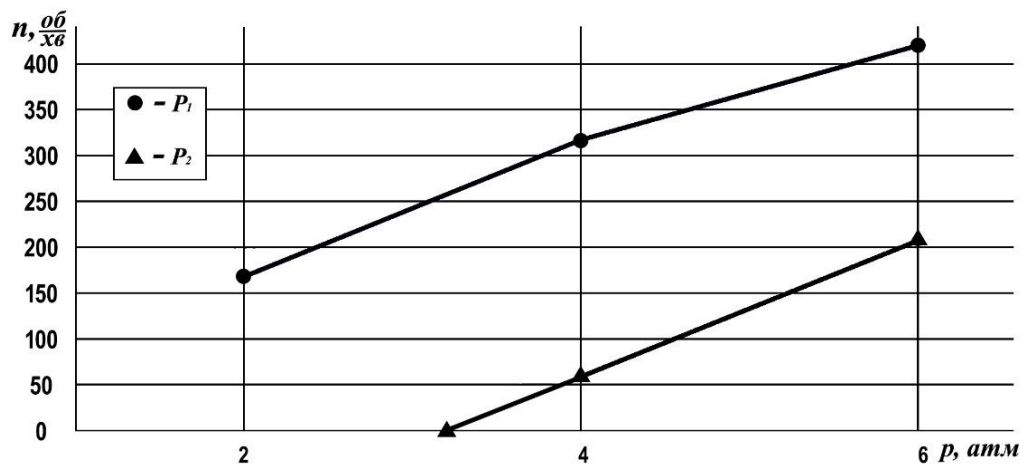


Рис. 4.6. Графік залежності кількості обертів від тиску повітря турбіни III

Щоб вивчити взаємозв'язок тиску повітря і навантаження на турбіну з прямими спіралеподібними лопатями, які збільшуються в об'ємі проведено дисперсійний аналіз [84]. Це дозволяє визначити, як зміна одного фактору (тиск повітря) впливає на вихідний параметр за різних значень другого фактору (навантаження).

Дослідження в повітряному потоці турбіни з будовою лопатей за принципом золотої спіралі показали (табл. 4.4, рис. 4.5, 4.6), що при вмиканні навантаження і 6 атм напруга просідала до 3,2 В, а при навантаженні на

позначці тиску повітря в 4 атм напруга була 0,9 В, а на відмітці 2 атм – турбіна зупинялась.

4.2.4. Дослідження турбіни III₁

Щоб досліди турбіни з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу у повітряному потоці провести у рівних умовах відносно інших турбін, було збільшено вагу до 923 грам (що в межах похибки по масі $\pm 5\%$), і знято повторні заміри таблиця 4.5

Тестування турбіни з шифром III₁ проводились в режимах холостого ходу ($P_1 = 0$ Вт) та під навантаженням ($P_2 = 21$ Вт), при трьох позначках тиску повітря ($p_1 = 2$ атм, $p_2 = 4$ атм, $p_3 = 6$ атм). Отримані показники досліджень наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Отримані показники турбіни (III₁) в повітряному потоці оберти (n) та напруга (U) залежно від тиску (p_1, p_2, p_3) і навантаження (P_1, P_2)

Шифр турбіни III ₁	p ₁		p ₂		p ₃	
	U	n	U	n	U	n
P ₁	4,7	310	6,5	420	8,1	524
P ₂	0,8	52	2,6	168	4,3	262

На основі отриманих значень дослідів турбіни з шифром III₁ у повітряному потоці для візуалізації та кращого порівняння результатів побудовано графіки залежності (рис. 4.7, рис. 4.8) вироблених кількості обертів (n) та напруги (U) від тиску повітря (p).

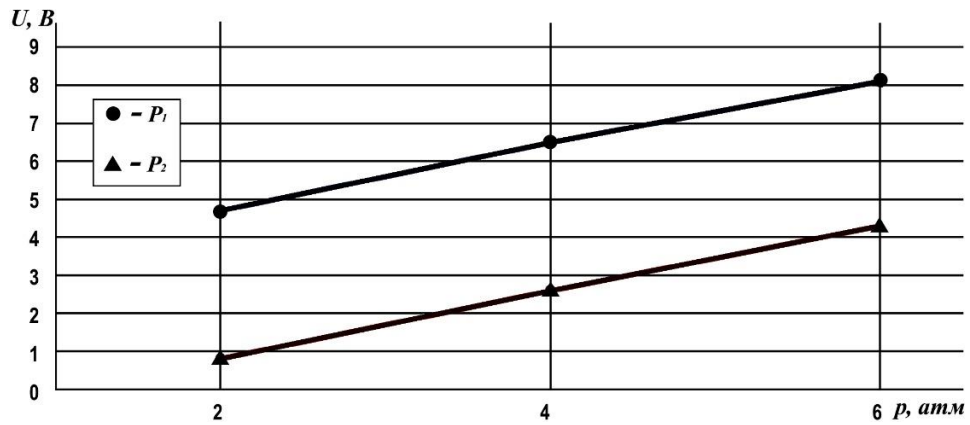


Рис. 4.7. Графік залежності напруги від тиску повітря турбіни III_1

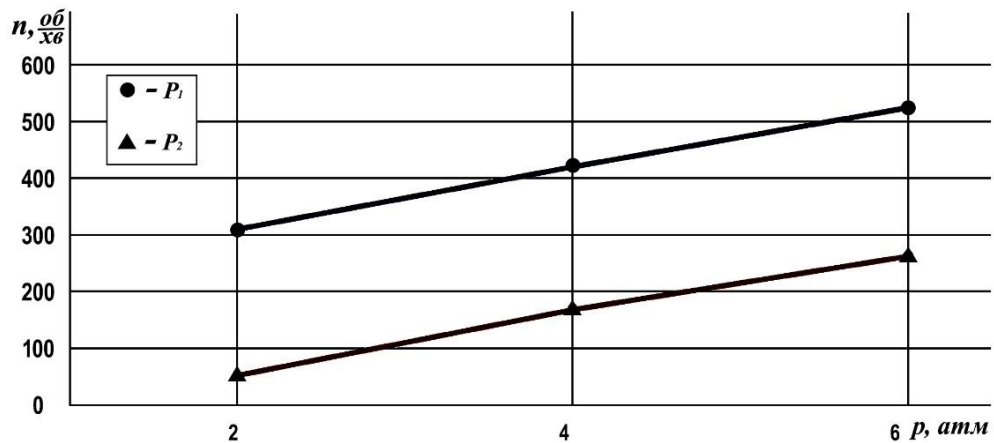


Рис. 4.8. Графік залежності кількості обертів від тиску повітря турбіни III_1

Дослідження в повітряному потоці турбіни з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу вагою 923 гр. (III_1) показали, що турбіна працювала під навантаженням на всіх трьох позначках тиску повітря і відповідно ефективніша за інші конструкції спіралеподібних турбін.

4.3. Аналіз отриманих результатів досліджень спіралеподібних турбін у повітряному потоці

Поліпшені спіралеподібні турбіни демонструють різні експлуатаційні характеристики порівняно одна з одною під час тестувань у контрольованих умовах повітряного потоку. Для проведення порівняльного аналізу ефективності за базову турбіну було обрано конструкцію I з найменшими

показниками серед досліджуваних турбін при тиску повітря $p_3 = 6$ атм під навантаженням (P_1 , P_2). Ця турбіна приймалася за 100%, а відсотковий коефіцієнт ефективності інших турбін обчислювався відносно неї. Результати експериментальних досліджень наведено у таблиці 4.6, а також представлені графічно на рис. 4.9 і 4.10.

Таблиця 4.6

Отримані показники досліджуваних турбін в повітряному потоці з відсотковим відношенням відносно моделі I

Аналіз результатів	Шифри турбін							
	I		II		III		III ₁	
	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2
U	5,6	2	5,8	2,4	6,5	3,2	8,1	4,3
%	100	100	102	120	116	160	144	215
n	370	131	382	160	420	207	524	262
%	100	100	102	120	116	160	144	215

На основі отриманих результатів експериментів спіралеподібних турбін поліпшеного типу в повітряному потоці (табл. 4.6) виявлено базовий варіант конструкції (I) та ефективніший варіант конструкції спіралеподібної турбіни (III₁). Так ефективність турбіни з прямими спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу вагою 923 гр. в порівнянні з турбіною з будовою лопатей за принципом золотої спіралі вагою 922 гр. при холостому ході становить $P_1 = 44\%$, при навантаженні відповідно $P_2 = 115\%$.

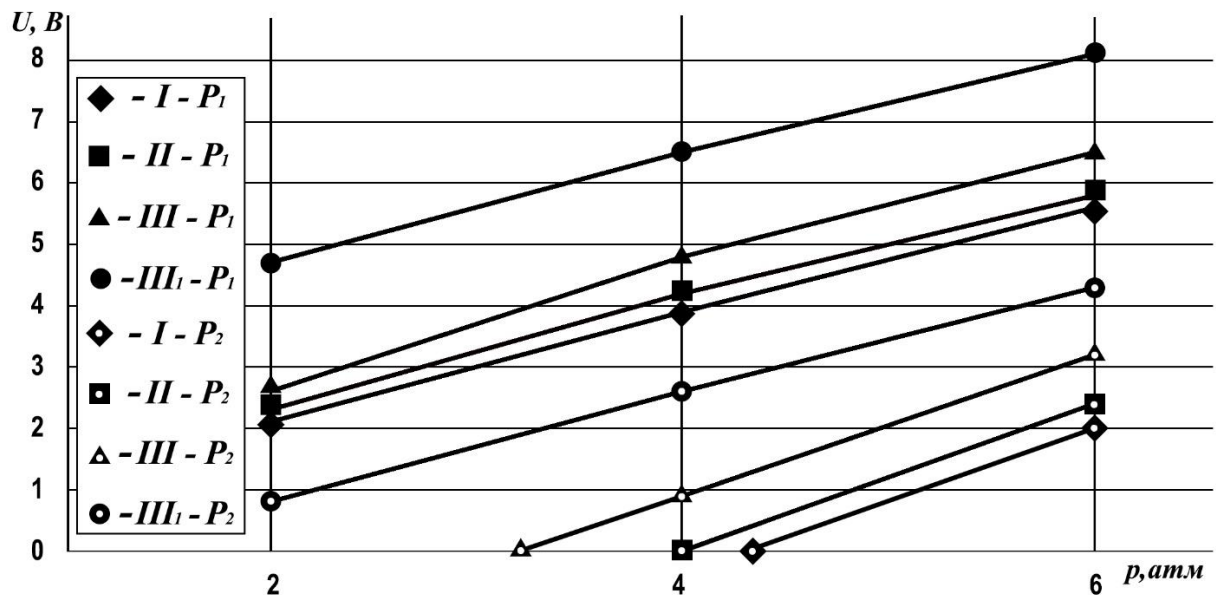


Рис. 4.9. Порівняльний графік ефективності турбін (I, II, III, III₁) по генерації електричної напруги U в залежності тиску повітря p та навантаження P_1, P_2

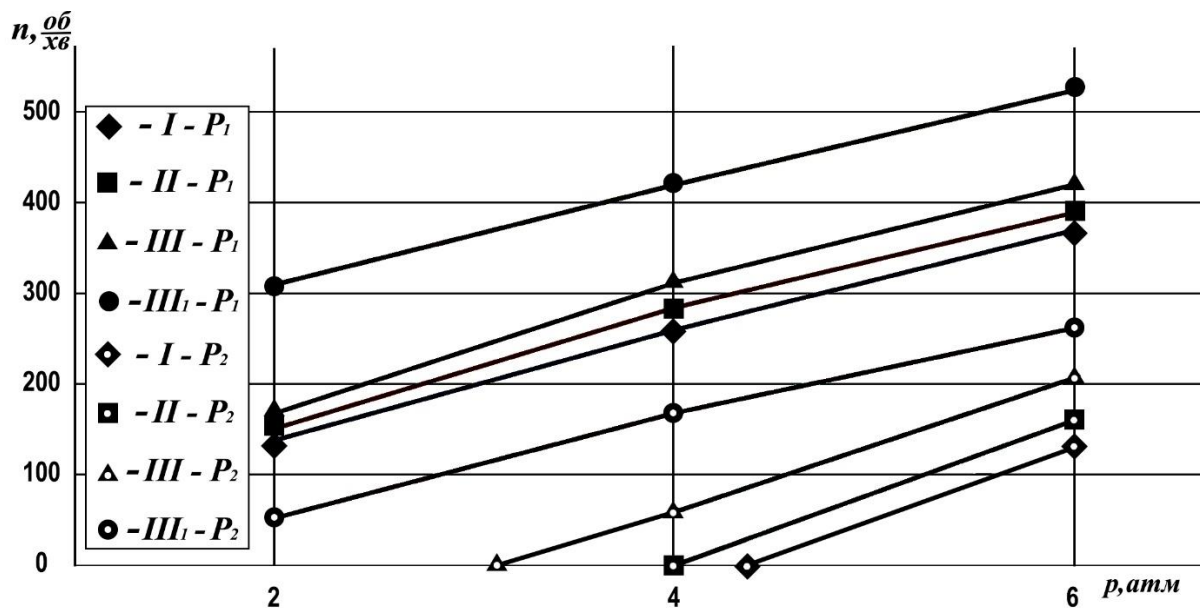


Рис. 4.10. Порівняльний графік ефективності турбін (I, II, III, III₁) по вироблених обертах n в залежності тиску повітря p та навантаження P_1, P_2

В ході досліджень додатково було встановлено, що збільшена вага корпусу спіралеподібної турбіни суттєво підвищує її ефективність при використанні в повітряному середовищі, хоча при цьому затрачається дещо

більше часу на вихід турбіни на оптимальні оберти роботи турбіни при заданих умовах. Конструкційна будова лопатей також відіграє велику роль в ефективності роботи спіралеподібної турбіни.

Висновки до розділу 4

У четвертому розділі проведено комплексне дослідження трьох видів спіралеподібних турбін у повітряному потоці за змінних параметрів тиску й навантаження. Проаналізовано вплив конструктивних особливостей на їхню енергетичну ефективність, стабільність обертання та здатність до адаптації в умовах змінної аеродинаміки. Удосконалено методику порівняльного аналізу результатів експериментів і сформовано технічні рекомендації щодо подальшої оптимізації конструкцій.

Основні висновки цього етапу дослідження подано нижче:

1. Оцінка ефективності конструкцій турбін:

- турбіна з лопатями за принципом золотої спіралі (конструкція I) показала найнижчу ефективність: при тиску 2 та 4 атм її оберти зупинялися під навантаженням, а при 6 атм напруга просідала до 2 В;

- турбіна з спіралеподібними лопатями, що збільшуються в об'ємі (конструкція II), зберігала роботу при 6 атм, виробляючи напругу 2,4 В і демонструючи швидкість обертання (160 об/хв);

- турбіна з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу (конструкція III₁) продемонструвала найкращі результати: стабільне зростання напруги як у режимі холостого ходу ($P_1=8,1\text{В}$) так і під навантаженням ($P_2=4,3\text{В}$), що відповідно на 44% і 115% перевищувало показники турбіни I.

2. Механічна ефективність:

- турбіна II досягла найвищої швидкості обертання (160 об/хв при 6 атм), що свідчить про її кращу адаптацію до змінного потоку порівняно з турбіною I;

– турбіна III забезпечила стабільність обертів у всіх режимах, навіть при меншій початковій масі, ще більше підвищуючи свою продуктивність після корекції ваги (III_1).

3. Вплив конструкційних факторів:

– збільшення ваги суттєво підвищило ефективність турбін, хоча й збільшувало час виходу на оптимальні оберти.

– конструкція лопатей була визначена як критично важливий фактор для продуктивності, де найкращі результати показала турбіна зі звуженням корпусу III_1 .

4. Аналіз отриманих результатів:

– графіки залежності напруги та обертів від тиску повітря демонструють чіткий взаємозв'язок між збільшенням тиску та підвищенням ефективності роботи турбін.

– дисперсійний аналіз підтвердив значний вплив тиску повітря на вихідні параметри, тоді як навантаження суттєво впливало лише на турбіни з меншою механічною ефективністю.

5. Методичні особливості дослідження:

– використання компресорного обладнання та удосконаленої методики порівняння експериментальних даних дозволило виявити чітку залежність величини згенерованої напруги від тиску повітря та провести об'єктивне співставлення ефективності турбін;

– регресійний та дисперсійний аналіз підтвердив визначальний вплив тиску повітря та конструктивних параметрів на продуктивність турбін.

6. В підсумку найбільш ефективною серед досліджених конструкцій визнано турбіну з прямими спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу (турбіна III_1). Вона демонструє оптимальне співвідношення механічної стабільності та енергетичної продуктивності.

7. Технічні рекомендації:

- ключовим напрямом подальшої оптимізації є удосконалення геометрії лопатей та корпусу для забезпечення стабільної роботи в умовах змінного тиску і навантаження;
- отримані результати є основою для вдосконалення конструкцій спіралеподібних турбін, адаптованих до нестабільних режимів роботи в повітряному та водному середовищі.
- подальший етап досліджень передбачає тестування турбін у водяному потоці для остаточного визначення ефективності та практичної придатності запропонованих конструкцій.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [84 – 93].

РОЗДІЛ 5

КОНСТРУЮВАННЯ ШНЕКОВОЇ ТУРБІНИ ГВИНТОВОГО ТИПУ

5.1. Передумови до створення шнекової турбіни гвинтового типу

Під час проведення експериментів у трьох режимах повітряного потоку для трьох модифікацій шнекових турбін зі спіралеподібними лопатями було виявлено, що підвищення ваги корпусу суттєво покращує ефективність роботи турбін. Зокрема, додаткова вага забезпечує підвищену стабільність обертів, що сприяє рівномірному енергетичному перетворенню. Крім того, масивніші конструкції дозволяють зменшити нерівномірність механічної передачі, що позитивно впливає на підвищення коефіцієнта корисної дії. Така закономірність стала основою для вдосконалення ефективнішої серед розроблених спіралеподібних турбін.

Застосування нового конструктивного підходу дало змогу зберегти основний принцип роботи турбіни, але при цьому суттєво покращити її функціональні параметри. Лопаті модернізованої турбіни розташовані під кутом до вхідного потоку, що забезпечує ефективне формування обертового моменту вздовж осі обертання та оптимальне спрямування потоку до корпусу турбіни. Завдяки специфічній конструкції корпусу, що поступово розширюється до виходу потоку, створюється додаткова реактивна тяга, обумовлена стисненням потоку, що сприяє підвищенню ефективності передачі енергії. Така конфігурація дозволяє максимально використати кінетичну енергію потоку, збільшуючи обертовий момент і, відповідно, знижуючи мінімально необхідну швидкість повітряного або водяного потоку для запуску турбіни [94].

Концепція покращеної шнекової турбіни базується на модернізації спіралеподібної конструкції шляхом оптимізації геометрії корпусу та

спрямування потоку. В результаті розробки було створено нову модифікацію, яку запропоновано назвати гвинтовою турбіною. Її ключовою інженерною особливістю є поступове звуження корпусу від входу до виходу, що сприяє прискоренню потоку та підвищенню ефективності перетворення його кінетичної енергії.

Застосування принципів гідродинамічних заокруглень, розроблених Шаубергером [34], дозволяє знизити опір і втрати енергії за рахунок спеціальних криволінійних заглиблень у корпусі. Ці конструктивні особливості мінімізують турбулентні втрати, сприяють збільшенню швидкості потоку та, як наслідок, підвищують ККД установки.

Розроблена гвинтова турбіна призначена для ефективного перетворення кінетичної енергії потоку рідини або повітря в механічну енергію, яку в подальшому можна перетворити на електричну за допомогою генератора. Завдяки комплексній оптимізації конструкції вдалося досягти стабільної роботи при низьких швидкостях потоку, що розширює можливості її застосування в малих гідроенергетичних установках та автономних енергосистемах.

5.2. Конструктивні особливості шнекової турбіни гвинтового типу

Конструкція гвинтової турбіни, подібно до спіралеподібних турбін [94], передбачає розміщення лопатей у вигляді гвинтової спіралі, які жорстко з'єднані з корпусом. Така архітектура дозволяє максимально перекривати потік робочого середовища, створюючи значний тиск на площину лопатей і забезпечуючи стабільне перетворення кінетичної енергії в механічну. Подібне компонування сприяє більш повному використанню енергетичного потенціалу потоку, особливо за умов невеликого напору, що є характерним для об'єктів малої гідроенергетики.

Однією з ключових інженерних особливостей цієї турбіни є наявність криволінійних заглиблень у внутрішній поверхні корпусу, які є логічним продовженням геометрії лопатей. Вони слугують не лише для спрямування потоку, а й для створення вторинних вихрових структур, які мають стабілізуючий вплив на основний потік. У результаті зменшується гідродинамічний опір, знижуються втрати на турбулентність та тертя, що позитивно впливає на загальний коефіцієнт корисної дії установки.

Важливою інноваційною складовою є також поступове збільшення поперечного перерізу корпусу в напрямку до виходу турбіни. Такий підхід не лише покращує умови розширення потоку після відбору енергії, але й дозволяє технічно реалізувати збільшення маси конструкції. Зростання інерційної маси сприяє утворенню так званого маховикового ефекту [95], що забезпечує згладження коливань у роботі турбіни, зменшення імпульсних навантажень на вал генератора та покращення стабільності вихідної потужності.

Корпус турбіни, завдяки своїй інтеграції з лопатевою системою, також бере участь у процесі енергетичного накопичення. Це дозволяє системі зберігати надлишкову енергію обертання в моменти надмірного потоку та компенсувати її в періоди зниження швидкості, що особливо актуально при коливаннях витрати води річки або змінах гідродинамічних умов.

Загалом, застосування таких конструктивних рішень сприяє:

- стабілізації гідродинамічного потоку;
- зменшенню нерівномірності обертання ротора;
- підвищенню точності прогнозування динаміки системи «турбіна – генератор»;
- зниженню пульсацій тиску в системі;
- ефективнішому перетворенню енергії в умовах нестабільного водного середовища.

Таким чином, удосконалення конструкції гвинтової турбіни має комплексний характер і базується на принципах аерогідродинамічного обтікання, інерційного згладжування та мінімізації втрат, що робить її

перспективною для використання в малих ГЕС, системах водопостачання або автономних енергетичних установках на базі відновлюваних джерел.

5.3. Динамічна взаємодія потоку з робочими органами турбіни

Ефективність роботи турбін безпосередньо залежить від характеру взаємодії потоку робочого середовища з елементами конструкції, що перетворюють енергію руху в обертовий момент. Особливо це актуально для турбін гвинтового типу, які працюють у середовищах із низьким або змінним напором. У таких системах важливо не лише захопити максимальну кількість енергії з потоку, але й забезпечити її ефективне перетворення при мінімальних гідравлічних втратах. У зв'язку з цим актуальним є дослідження особливостей динаміки взаємодії потоку з робочими органами, а також конструктивних рішень, які сприяють підвищенню коефіцієнта корисної дії турбіни.

У межах цієї роботи було досліджено розроблену турбіну гвинтового типу з удосконаленою системою внутрішніх каналів і формуванням спрямованого потоку, адаптованого до профілю лопатей. Конструкція забезпечує раціональний розподіл швидкості й тиску вздовж довжини робочої лопаті, що дає змогу знизити втрати енергії на тертя та турбулентність.

На рисунку 5.1 подано схематичне зображення гвинтової турбіни в поперечному розрізі, що дозволяє розглянути просторове розташування ключових елементів: корпусу (1) із спеціально сформованими криволінійними виямками (2), нерухомо з'єднаної з ним гвинтоподібної лопаті (3), розташованої в центральній частині турбіни, та конусного вала (4), що формує додатковий гідравлічний перепад [96].

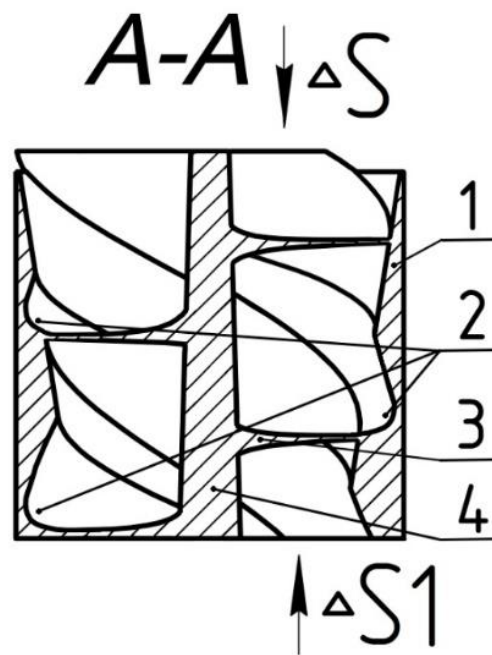


Рис. 5.1. Схема шнекової турбіни гвинтового типу в розрізі A-A: 1- корпус турбіни; 2 – в'ямки; 3 – гвинтоподібні лопаті; 4 – конусний вал

На рисунку 5.2 подано вигляд турбіни гвинтового типу зверху, а на рис. 5.3 наведено вигляд турбіни гвинтового типу знизу, який демонструє конфігурацію нижньої частини корпусу.

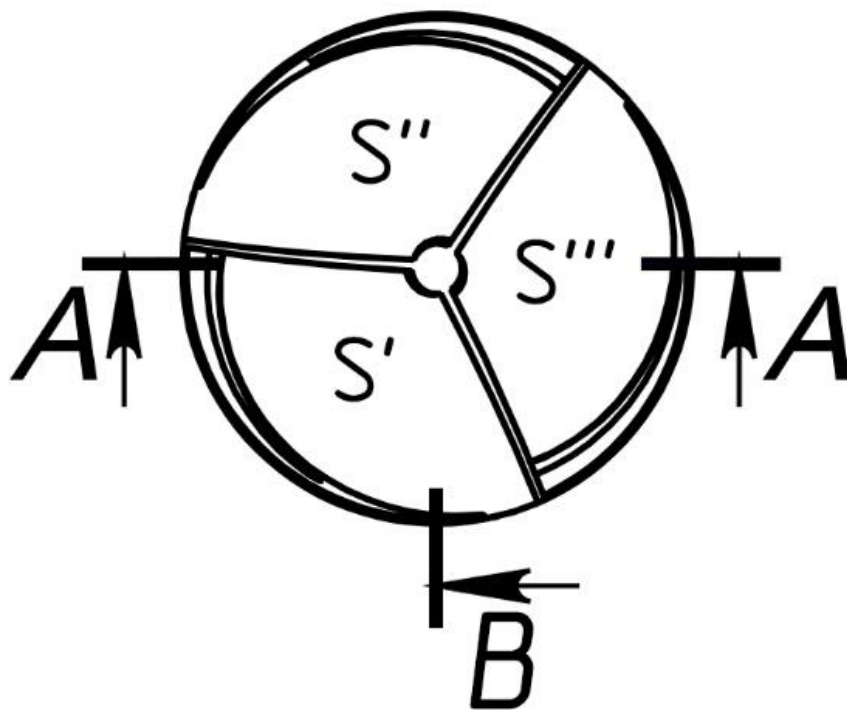


Рис. 5.2. Схема шнекової турбіни гвинтового типу зверху

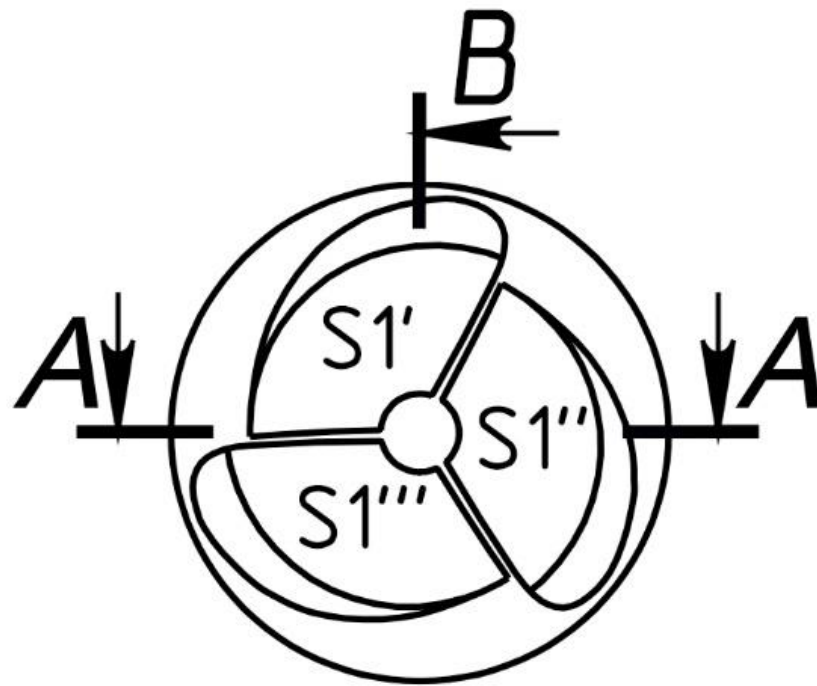


Рис. 5.3. Схема шнекової турбіни гвинтового типу знизу

На рисунку 5.4 зображено ізометричний вигляд шнекової турбіни гвинтового типу з розрізом В-А, що дозволяє детальніше відобразити всередині її конструктивні особливості [97].

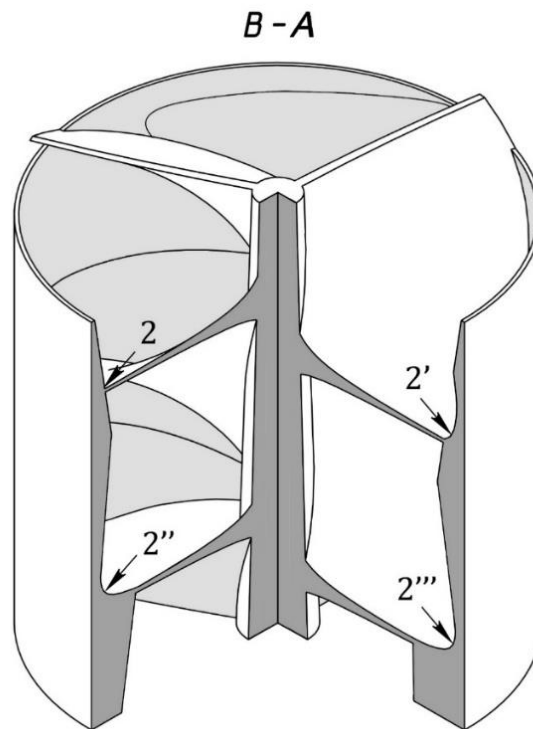


Рис. 5.4. Схема шнекової турбіни гвинтового типу з розрізом В-А в ізометрії

Конструктивне рішення передбачає формування всередині турбіни трьох послідовних проточних каналів $S'-S1'$; $S''-S1''$; $S'''-S1'''$ (див. рис. 5.1–5.3), які мають заокруглені заглиблення на стику корпусу й лопатей. Це створює ефект часткового стискання потоку та формує зони прискореного руху робочого середовища. Завдяки геометрії каналів із поступовим зменшенням площі проходження ($\Delta S > \Delta S1$), відбувається регульоване підвищення швидкості потоку, що активізує його взаємодію з лопатевою системою.

Конусоподібна форма центрального вала також виконує аеродинамічну функцію – створює додаткову зону зниженого тиску у вихідній частині турбіни, що підсилює витягування потоку та підвищує ефективність енергетичної трансформації. Це особливо важливо при роботі з нестабільним або змінним потоком, характерним для малих річок та сточищ зі значними сезонними коливаннями витрати.

Заокруглені заглиблення у корпусі відіграють подвійну роль. По-перше, вони виступають як спрямовуючі елементи, які формують вторинні вихрові структури, що стабілізують потік. По-друге, змінна глибина цих заглиблень ($2' < 2'' < 2'''$, рис. 5.4) забезпечує прогресивне навантаження на лопаті та сприяє кращому розподілу гідродинамічних сил уздовж поверхні профілю [97].

Корпус турбіни має збільшений об'єм і масу, що дозволяє йому виконувати функцію маховика [95]. Така масивність сприяє інерційному накопиченню енергії обертання, яка згладжує миттєві коливання моменту сили та стабілізує роботу вала турбіни [96]. Це особливо важливо в умовах пульсуючого потоку, коли рівномірність передачі енергії до генератора має ключове значення для надійності електропостачання.

Динамічна взаємодія потоку з лопатевим блоком, розташованим уздовж осі турбіни, відбувається в режимі напіввільного обтікання. У таких умовах важливим стає не лише профіль лопаті, а й її кут нахилу до напрямку потоку. Аерогідродинамічне дослідження показує, що оптимальний кут атаки

становить $25 - 45^\circ$, що дозволяє досягти максимальної підйомної сили при мінімальному опорі. Це підтверджується як числовим моделюванням, так і експериментальними спостереженнями.

Таким чином, поєднання декількох факторів – спіралеподібної геометрії лопатей, криволінійних заокруглень у корпусі, звуження проточного каналу, використання конусного вала та функції маховика – забезпечує високоефективну динамічну взаємодію потоку з робочими органами. Це робить розроблену турбіну придатною для застосування в широкому діапазоні умов, зокрема при змінних витратах, нерівномірному напорі та в умовах обмеженого простору для монтажу [97].

5.4. Патентування конструкції шнекової турбіни гвинтового типу

У результаті проведених теоретичних досліджень, експериментального моделювання та практичної перевірки було створено конструкцію гвинтової турбіни, що поєднує низку інженерних рішень, спрямованих на підвищення ефективності перетворення кінетичної енергії потоку в механічну. Запропонована конструкція передбачає поєднання спіралеподібної геометрії лопатей, криволінійних заокруглень у корпусі, системи внутрішніх проточних каналів, а також реалізацію маховикового ефекту шляхом збільшення маси корпусу.

Інноваційність конструкції полягає у складному поєднанні принципів стабілізації потоку, зменшення гідродинамічного опору, згладжування коливань і підвищення енергоефективності, що дозволяє адаптувати турбіну до роботи в умовах низьких напорів і змінної витрати. Такий підхід виявився ефективним як у водному, так і в повітряному середовищі.

З метою правового захисту створеного технічного рішення подано заявку на реєстрацію корисної моделі, відповідно до чинного законодавства України у сфері охорони інтелектуальної власності. За результатами експертизи отримано патент України на корисну модель, що офіційно

засвідчує унікальність конструкції, її технічну новизну, відповідність критеріям патентоспроможності та практичну придатність до промислового застосування.

Наявність патенту має стратегічне значення для подальших етапів впровадження розробки, оскільки:

- забезпечує юридичний захист авторських прав і виключне право на використання технічного рішення;
- підтверджує інноваційність конструкції при комерційних перемовинах із виробниками та інвесторами;
- створює підґрунтя для укладення ліцензійних угод, передачі прав на використання або організації серійного виробництва.

Патентування також сприяє визнанню науково-технічної цінності дослідження на міждисциплінарному рівні, оскільки дозволяє реалізувати розробку в широкому спектрі прикладних галузей, зокрема:

- у малих гідроелектростанціях для автономного енергозабезпечення;
- у системах рекуперації енергії в інженерних комунікаціях (каналізація, водопостачання);
- у вентиляційних та компресорних установках;
- у комбінованих (гібридних) енергетичних системах на базі відновлюваних джерел енергії.

Таким чином, отриманий патент (№ 156567) [97] не лише засвідчує інтелектуальну власність на конструкцію гвинтової турбіни, а й відкриває перспективи її практичного застосування в енергетичній галузі та суміжних технічних напрямках.

Висновки до розділу 5

Проведені експериментальні дослідження та технічні розробки підтвердили ефективність вдосконалення конструкції шнекової турбіни гвинтового типу, побудованої на базі турбін зі спіралеподібними лопатями.

Результати випробувань у трьох режимах повітряного потоку засвідчили, що збільшення ваги корпусу значно покращує стабільність роботи турбін, зменшує нерівномірність механічної передачі та підвищує її ККД.

1. Ключові результати удосконалень:

- лопаті, розташовані під кутом до вхідного потоку, забезпечують формування обертального моменту та ефективне спрямування потоку до корпусу;

- впровадження криволінійних заокруглень у зоні злиття лопатей із корпусом зменшує гідродинамічний опір, створює природне завихрення та покращує енергетичне перетворення;

- поступове зменшення діаметра корпусу прискорює потік і забезпечує додаткову реактивну тягу;

- конічна форма валу зменшує площу проходження потоку, що створює додатковий перепад тиску та сприяє зростанню потужності установки;

- збільшення маси корпусу виконує роль маховика, накопичуючи енергію та зменшуючи амплітуду коливань обертів, що підвищує стабільність роботи турбіни в змінних умовах потоку;

- запропонована конструкція забезпечує адаптивність до роботи за умов змінного електричного навантаження та варіативного напору.

2. Науково-практичне значення:

- на розроблену конструкцію турбіни подано заявку та отримано патент України на корисну модель [96], що підтверджує її технічну новизну та прикладну цінність;

- підготовлена технічна документація забезпечує основу для комерціалізації, ліцензування та серійного виробництва турбін;

- запропоновані інженерні рішення формують науково-технічну платформу для подальших досліджень у сфері малої гідроенергетики, гібридних систем і систем автономного енергозабезпечення.

3. Рекомендації для подальших досліджень:

- проведення повномасштабних випробувань у реальних умовах водного потоку з метою перевірки ефективності та надійності конструкції;
- розробка і тестування нових варіантів геометрії лопатей і корпусу для подальшої оптимізації аерогідродинамічних характеристик, зокрема в умовах низьконапірних і змінних потоків, характерних для природних річок та інженерних комунікацій.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [34, 94 – 97].

РОЗДІЛ 6

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ШНЕКОВИХ ТУРБІН У ВОДНОМУ ПОТОЦІ

6.1. Планування лабораторних експериментів запроектованих шнекових турбін у водному потоці

Основний підхід до тестування експериментальних турбін є систематичним і націленим на визначення найефективнішої конструкції для різних середовищ (повітря, вода) та умов застосування.

Після підготовчого першого етапу досліджень, де проводилась перевірка ефективності турбін у різних швидкісних режимах повітряного потоку, в якому було визначено найоптимальнішу конструкцію спіралеподібної турбіни, було виявлено ряд покращень будови, на основі яких запроектовано ще одну турбіну гвинтового типу.

Наступним ключовим етапом є тестування вдосконалених турбін у лабораторній установці за умов штучно створених водних потоків, максимально наближених до реальних.

Для оцінки ефективності поліпшених шнекових турбін проводяться експериментальні дослідження у водяному потоці п'яти модифікацій турбін: трьох спіралеподібних [53], однієї гвинтового типу [97], та однієї класичної шнекової [44].

Планування експериментів для модифікованих шнекових турбін у водяному потоці є важливим та головним етапом для перевірки їх ефективності. Такий експеримент вимагає точного підходу, що включає визначення мети дослідження, вибір відповідних параметрів і влаштування випробувального модуля в лабораторну установку (детально описано в розділі 3.3) з направленим водяним потоком.

Основною метою експериментальних досліджень поліпшених шнекових турбін у водяному потоці є:

- оцінка ефективності, тобто визначити, наскільки ефективно турбіни перетворюють енергію водяного потоку на механічну та електричну енергію;
- тестування та порівняння різних варіантів конструкцій, дизайну корпусів та геометрії лопатей турбін для виявлення оптимальних характеристик;
- визначення оптимального напрямку потоку відносно лопатей;
- вивчення впливу параметрів потоку та аналіз того, як зміна рівня води у верхньому б'єфі впливає на продуктивність турбіни.

Очікувані результати:

- виявлення переваг або недоліків кожної турбіни в різних умовах;
- встановлення турбін, які показують максимальну ефективність у певному напрямі потоку та рівні води у верхньому б'єфі;
- можливе виявлення універсальної конструкції, придатної для використання як у водному так і у вітровому потоці;
- уточнення умов, за яких ефективність турбін може змінюватись, та розробка рекомендацій для їх адаптації до різних режимів.

Цей підхід забезпечує науково обґрунтовану оцінку турбін і дозволяє вдосконалити конструкцію перед практичним застосуванням.

Для оцінки ефективності роботи досліджуваних турбін використовувалися основні параметри, які дозволяють визначити механічну та електричну продуктивність системи.

Основні показники:

– Напруга (U, V). Один із ключових параметрів, що характеризує електричну продуктивність генератора. Напруга визначає потенціал генератора виробляти електричну енергію та дозволяє розрахувати потужність. У холостому режимі, коли опір навантаження прямує до нескінченності ($R \rightarrow \infty$), струм I у колі відсутній, і напруга U_1 на виході генератора дорівнює його ЕРС:

$$U_1 = k_e n \quad (6.1)$$

де k_e – коефіцієнт електричної пропорційності [98].

–Швидкість обертання (n , об/хв) визначає механічну ефективність турбіни. Висока та стабільна швидкість обертання свідчить про ефективне перетворення кінетичної енергії потоку в механічну енергію ротора. Швидкість обертання прямо пропорційна вихідній напрузі генератора: $U \sim n$.

–Потужність генератора (P_g , Вт) дозволяє оцінити ефективність роботи генератора під різними навантаженнями та визначається формулою:

$$P_g = UI = \frac{U^2}{R} \quad (6.2)$$

де R – електричний опір навантаження (Ом).

–Струм (I , А) безпосередньо впливає на електромагнітний момент генератора. У режимі холостого ходу ($R \rightarrow \infty$) струм практично відсутній, тому не було потреби у його фіксації. Струм визначається за законом Ома [98]:

$$I = \frac{U}{R} \quad (6.3)$$

–Частота (f , Гц). Частота виробленого струму є важливим параметром для оцінки роботи генератора, особливо якщо він використовується в системах змінного струму. Залежить від швидкості обертання [100]:

$$f = \frac{p_p n}{60} \quad (6.4)$$

де p_p – кількість пар полюсів генератора.

–Момент опору (T , Нм) характеризує механічні втрати у системі (тертя, навантаження). Визначається через механічну потужність турбіни (P_m):

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad (6.5)$$

де ω – кутова швидкість вимірюється в рад/с та розраховується:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (6.6)$$

–Температура (t , °C). Контроль температури генератора дозволяє запобігти перегріву та оцінити ефективність системи охолодження [98].

Базовими параметрами для аналізу продуктивності та енергетичної ефективності турбіни є напруга, швидкість обертання, потужність генератора та струм. Для оцінки адаптивності турбіни до змінних умов експлуатації

(зміни рівня навантаження, швидкості потоку тощо) було обрано для фіксації показники швидкості обертання та напруги.

Напруга та швидкість обертання є ключовими параметрами, що дозволяють оцінити стабільність роботи турбіни та генератора. Оскільки в режимі холостого ходу ($R \rightarrow \infty$) струм відсутній, його не фіксували окремо. Для розрахунку потужності достатньо використання параметра опору, оскільки закон Ома дозволяє визначати струм при навантаженні.

Додатково оцінка моменту опору та температурного режиму генератора дає змогу аналізувати механічні втрати та тепловий баланс системи, що є важливим для довготривалої експлуатації установки. Таким чином, обрані параметри забезпечують комплексну оцінку роботи турбіни та дозволяють визначити її ефективність під різними навантаженнями.

Методика розрахунку ККД турбін.

ККД (η) турбіни визначається як відношення корисної електричної потужності генератора (P_g) до вхідної механічної потужності що діє на турбіну (P_m) [101]:

$$\eta = \frac{P_g}{P_m} 100\% \quad (6.7)$$

де (P_g) визначається по формулі 6.2, а P_m – вираховується:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \quad (6.8)$$

де:

ρ – густина середовища (для повітря ~ 1.225 кг/м³, для води ~ 1000 кг/м³)

S – площа поперечного перерізу турбіни, м²;

v – швидкість потоку, м/с;

C_p – коефіцієнт потужності турбіни (визначає, яка частка енергії потоку перетворюється в механічну енергію). Реальні значення коефіцієнта потужності турбіни з урахуванням механічних і гідродинамічних втрат –

$$C_p \approx 0.6 - 0.8 \quad [102]$$

ККД турбіни дозволяє оцінити ефективність використання енергії потоку турбіною та визначити втрати при перетворенні механічної енергії в електричну.

В результаті планування дослідів було визначено основні параметри досліджень, які варто контролювати під час експериментальних досліджень. До цих параметрів віднесені такі:

Q – витрата рідини, ($\text{м}^3/\text{с}$);

v – швидкість потоку води, м^3 ;

n_1 – кількість обертів турбіни в режимі холостого ходу, об/хв;

n_2 – кількість обертів турбіни під навантаженням (21 Вт), об/хв;

n_3 – кількість обертів турбіни під навантаженням (42 Вт), об/хв;

n_4 – кількість обертів турбіни під навантаженням (63 Вт), об/хв;

U_1 – вироблена генератором електрична напруга без навантаження, В;

U_2 – вироблена генератором напруга під навантаженням (21 Вт), В;

U_3 – вироблена генератором напруга під навантаженням (42 Вт), В;

U_4 – вироблена генератором напруга під навантаженням (63 Вт), В;

h – рівень води у верхньому б'єфі, м;

h_1 – рівень води на п'єзометрі, м;

h_0 – рівень води у верхньому б'єфі, при якому проходить страгування турбіни, м;

P_1 – електричне навантаження в режимі холостого ходу, потужність 0 Вт;

P_2 – електричне навантаження потужністю 21Вт;

P_3 – електричне навантаження потужністю 42Вт;

P_4 – електричне навантаження потужністю 63Вт.

Випробувальний модуль для досліджень у водяному потоці оснащений пристроєм, який дозволяє змінювати напрям кута потоку на 90° відносно лопатей турбіни. Це дає змогу відтворювати умови водяного потоку з регулюванням параметрів нахилу (45° та 90°), що дозволяє моделювати різні режими роботи турбіни.

Для вимірювання швидкості обертання турбіни та генерованої електричної напруги використовуються прилади, інтегровані у блок контролера. Для забезпечення точності даних, паралельно до генератора підключено мультиметр, а також встановлено електричний тахометр. Витрата води вимірюється за допомогою трикутного водозливу із позначкою рівня на п'єзометрі (рис. 3.2)

Зняття показників виробленої електричної напруги здійснюється в режимах холостого ходу (P_1) та під навантаженням (P_2, P_3, P_4). Для цього генератор підключено до блоку керування навантаженням. Як навантаження використовуються три лампи розжарювання на 24 В і потужністю 21 Вт кожна. Електричний опір R однієї лампи вираховується за формулою:

$$R = \frac{U^2}{P_2} = \frac{24^2}{21} = 27,43 \text{ Ом} \quad (6.9)$$

Для дослідження впливу кількох параметрів одночасно, таких як висота води у верхньому б'єфі, ступінь навантаження, кут нахилу потоку та геометрія лопатей турбін, застосовано методи факторного планування [86, 87]. Цей підхід дає змогу аналізувати вплив кількох змінних одночасно та оцінювати їхній взаємозв'язок і вплив на продуктивність турбін. Для забезпечення надійності результатів експерименти повторювалися кілька разів за різних умов.

Для порівняння ефективності запропонованих конструкцій турбін із класичними прототипами була виготовлена шнекова турбіна відповідних розмірів ($\varnothing 200$ мм, 210 мм), а також вдосконалена турбіна гвинтового типу, в якій кожна лопать виконувала 0,75 обертів навколо своєї осі. Площа поперечного перерізу на вході ($\Delta S = 0,0314 \text{ м}^2$) та виході ($\Delta S_1 = 0,0191 \text{ м}^2$) була оптимізована для створення умов, що забезпечують точні результати контрольних експериментів. Це дозволило зіставити роботу шнекової турбіни з іншими конструкціями та визначити їхню відносну ефективність.

Проведення експериментальних досліджень у водному потоці структуроване на чотири етапи:

1 – Експериментальні дослідження турбін з різною вагою. Виконуються у водному потоці, спрямованому під кутом 45° до лопатей турбіни.

2 – Експериментальні дослідження турбін із вирівняною вагою. Проводяться з фіксованою вагою турбін у водному потоці під кутом 45° до лопатей.

3 – Експериментальні дослідження турбін із вирівняною вагою в потоці під кутом 90° . Виконуються з фіксованою вагою турбін у направленому водному потоці з кутом 90° до лопатей турбіни.

4 – Аналіз та порівняння результатів. Здійснюється оцінка отриманих даних з метою визначення оптимальної конструкції турбіни, яка забезпечує найкращі показники ефективності.

Таким чином забезпечується систематичність і достовірність експериментальних досліджень, а також дозволяє встановити залежність ефективності роботи турбіни від ключових конструктивних і експлуатаційних параметрів.

Проведені експерименти шифрувалися наступним чином: римська цифра на початку шифру означає досліджуваної турбіни з початковою вагою, а розміщена в нижньому індексі за нею латинська цифра (_{2,3}) – означає що вага такої турбіни збільшена до рівня ваги, найважчої серед досліджуваних моделей з похибкою в $\pm 5\%$ [62]. Шифри відповідають таким назвам турбін:

I – турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі вагою 922г;

I₂ – турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі вагою 1092г;

II – турбіна з спіралеподібними лопатями що збільшуються в об'ємі вагою 925г;

II₂ – турбіна з спіралеподібними лопатями що збільшуються в об'ємі вагою 1089г;

III – турбіна з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу вагою 755 г;

III₃ – турбіна з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу вагою 1090 г;

IV – турбіна гвинтового типу вагою 1096 г;

V – шнекова турбіна вагою 690 г;

V₂ – шнекова турбіна вагою 1092 г.

Під час проведення експериментів усі отримані дані, зокрема швидкість обертання, вироблена напруга в різних режимах, рівень води у верхньому б'єфі тощо, записуються у спеціально розроблену таблицю (табл. 6.1). Ця таблиця служить основою для подальшого аналізу та формулювання висновків.

Зібрані дані можуть бути оброблені за допомогою методів регресійного або дисперсійного аналізу. Це дозволяє визначити залежності між параметрами водяного потоку (кут нахилу, рівень води, навантаження) та продуктивністю турбін, оцінити вплив кожного з параметрів на ефективність роботи турбіни, ідентифікувати оптимальні умови для максимальної ефективності турбін.

Такий підхід забезпечує комплексну оцінку результатів експериментів і сприяє створенню рекомендацій для оптимізації конструкцій та режимів роботи турбін.

Таблиця 6.1

Схема планування експериментів досліджуваних турбін у водному потоці

Шифр турбіни	P	$h_0, м$	$h, м$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	P_1		$U_1, В$					
			$n_1, об/хв$					
	P_2		$U_2, В$					
			$n_2, об/хв$					
	P_3		$U_3, В$					
			$n_3, об/хв$					
	P_4		$U_4, В$					
			$n_4, об/хв$					
			$h_1, м$					

Після збору та обробки даних експериментів, слід проаналізувати отримані результати та визначити оптимальні параметри конструкцій для

максимальної ефективності турбін. Оцінити, як зміна конструкції впливає на вироблену генератором напругу в різних режимах роботи.

Планування експерименту дозволить не тільки перевірити ефективність турбін в різних умовах, але й розробити рекомендації для оптимізації їх роботи в реальних умовах.

Існують різні методи планування постановки експериментів, направлені на зменшення кількості дослідів. Якщо запланувати дослід по принципу активного експерименту, який полягає в тому, що розташування точок вимірювання у міжфакторному просторі алгоритмізоване, то кількість необхідних дослідів зменшиться у 5-10 разів у порівнянні з традиційними методами [85-88].

Для визначення найкращого варіанту турбіни на основі аналізу впливу рівня води у верхньому б'єфі на конструкції досліджуваних турбін в режимах холостого ходу (P_1) та під навантаженням (P_2 , P_3 , P_4) кожній з них надаватимемо по шість значень рівня верхнього б'єфа (h). Тоді для визначення ефективнішого варіанту серед досліджуваних турбін, необхідно зробити $5 * 24 * 3 = 360$ дослідів, при яких потрібно зняти 720 показників (табл. 6.2 – 6.15).

6.2. Експериментальні дослідження турбін з різною вагою в направленому водному потоці під кутом 45° до лопатей

Наступним етапом у дослідженні ефективності вдосконалених турбін стало їх тестування у лабораторній установці за умов штучно створених водних напорів, максимально наближених до реальних експлуатаційних середовищ.

Сучасні гідроенергетичні системи, особливо у сфері малої гідроенергетики, вимагають високої ефективності перетворення енергії потоку води в електроенергію при мінімальних витратах та стабільній роботі за різних умов. Саме тому одним із завдань дослідження стало виявлення

впливу геометричних особливостей та маси турбін на їхню роботу в умовах змінного напору та навантаження.

Основною метою цього експерименту був порівняльний аналіз роботи турбін однакових геометричних розмірів, але з відмінними конструктивними особливостями та масою, що дозволяє оцінити вплив конструкції на ефективність гідродинамічного перетворення.

Для оцінки ефективності роботи вдосконалених шнекових і спіралеподібних турбін було проведено експериментальні випробування п'яти конфігурацій турбін, які розміщувалися у водному потоці під кутом 45° відносно лопатей. У дослідженні брали участь такі варіанти турбін:

Турбіна I – з лопатями, сконструйованими за принципом «золотої спіралі», маса – 922 г;

Турбіна II – з спіралеподібними лопатями, що поступово розширюються, маса – 925 г;

Турбіна III – з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу, маса – 755 г;

Турбіна IV – гвинтова турбіна, маса – 1096 г;

Турбіна V – шнекова турбіна, маса – 690 г.

Таке порівняння дозволяє визначити вплив геометрії лопатей і маси конструкції на ключові показники роботи турбіни – швидкість обертання (n) та електричну напругу на виході (U).

Усі випробування проводились у суворо контрольованих умовах лабораторної установки, яка була спеціально сконструйована для моделювання гідротехнічних процесів малої гідроенергетики. Установка обладнана системою регулювання рівня води у верхньому б'єфі, що дозволяє точно задавати напір, а також модулем навантаження, який забезпечує поетапну зміну електричного навантаження на генератор, імітуючи різні режими експлуатації гідротурбінного комплексу.

З метою підвищення точності отриманих даних вимірювання здійснювались у автоматичному режимі та з використанням приладів. Для

фіксації кількості обертів ротора застосовувався електронний тахометр, а для вимірювання вихідної напруги – цифровий вольтметр високої точності. Також фіксувалися додаткові параметри, необхідні для подальшого аналізу енергетичної ефективності та побудови регресійних моделей поведінки кожної з досліджуваних турбін.

Для глибшого аналізу ефективності роботи турбінних моделей проведено факторний експеримент, який дозволяє дослідити вплив основних незалежних змінних – висоти води у верхньому б'єфі (напір – h) та навантаження на генератор (P) – на вихідні характеристики системи. Такий підхід дає змогу не лише оцінити окремий вплив кожного з факторів, а й виявити ефекти їхньої взаємодії.

Факторний експеримент [83] вважається ефективним інструментом для аналізу гідроенергетичних систем, оскільки дає можливість побудувати математичні залежності між змінними параметрами потоку і електротехнічними характеристиками роботи турбіни. Для кожної комбінації рівнів напору води та навантаження на генератор було зафіксовано значення кількості обертів турбіни (n) та вихідної напруги (U), що відображено в таблиці 6.2. Такий підхід дозволяє систематизувати отримані дані та виявити оптимальні параметри для кожної турбіни.

Також у процесі випробувань було визначено критичний рівень води (h_0), за якого досліджувані турбін розпочинали обертання (страгування) у водному потоці, що був спрямований під кутом 45° до площини лопатей. Одночасно здійснювалося вимірювання рівня води за допомогою п'єзометра, встановленого на трикутному водозливі, що дозволило провести подальший розрахунок витрати води та оцінити її вплив на динаміку запуску кожної турбіни.

Таблиця 6.2

Отримані показники вироблених турбінами з різною вагою (I, II, III, VI, V)
у водному потоці обертів (n) та вихідної напруги (U) з генератора в
чотирьох режимах навантаження ($P_1 - P_4$) та при п'яти рівнях напору
(h)

Шифр турбіни	P	$h_0, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	0,2	0,3	0,4	0,51	0,6
I	P_1	0,138	$U_1, \text{ В}$	6,8	10,8	14,3	17	19
			$n_1, \text{ об/хв}$	163	259	337	409	461
	P_2	0,156	$U_2, \text{ В}$	4,7	8,9	12	14,6	16,8
			$n_2, \text{ об/хв}$	116	207	285	343	405
	P_3	0,168	$U_3, \text{ В}$	3,2	6,9	10,1	12,8	15
			$n_3, \text{ об/хв}$	93	165	245	303	357
	P_4	0,179	$U_4, \text{ В}$	2,3	5,4	8,5	11,3	13,5
			$n_4, \text{ об/хв}$	73	133	197	268	321
			$h_1, \text{ м}$	0,25	0,272	0,287	0,305	0,312
II	P	$h_0, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	0,2	0,31	0,42	0,51	0,6
	P_1	0,135	$U_1, \text{ В}$	7,4	11,4	14,7	17	18,8
			$n_1, \text{ об/хв}$	177	273	346	409	458
	P_2	0,152	$U_2, \text{ В}$	5,7	10,2	13,5	15,3	17,2
			$n_2, \text{ об/хв}$	141	247	321	363	414
	P_3	0,166	$U_3, \text{ В}$	4,7	8,5	11,9	13,9	15,8
			$n_3, \text{ об/хв}$	116	197	284	327	378
	P_4	0,177	$U_4, \text{ В}$	3,7	7,1	10,2	12,4	14,4
			$n_4, \text{ об/хв}$	102	167	247	296	340
			$h_1, \text{ м}$	0,25	0,274	0,29	0,305	0,312
III	P	$h_0, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	0,2	0,3	0,41	0,5	0,6
	P_1	0,129	$U_1, \text{ В}$	6,4	10,3	13,7	16,3	18,2
			$n_1, \text{ об/хв}$	157	248	325	390	439
	P_2	0,156	$U_2, \text{ В}$	4,4	8,4	11,6	14	15,7
			$n_2, \text{ об/хв}$	112	195	277	330	375
	P_3	0,171	$U_3, \text{ В}$	3	6,7	9,9	12,2	14,1
			$n_3, \text{ об/хв}$	88	160	242	290	333
	P_4	0,186	$U_4, \text{ В}$	2	5,5	8,7	10,8	12,6
			$n_4, \text{ об/хв}$	61	135	201	259	300
			$h_1, \text{ м}$	0,252	0,274	0,291	0,305	0,315

продовження таблиці 6.2

Шифр турбіни	P	h_0 , м	h , м	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
IV	P_1	0,098	U_1 , В	9,5	13,4	17,2	19,9	22
			n_1 , об/хв	227	320	414	489	551
	P_2	0,123	U_2 , В	7,9	12,2	15,5	18,3	20,5
			n_2 , об/хв	185	290	368	441	504
	P_3	0,138	U_3 , В	6,7	10,9	14	16,8	18,8
			n_3 , об/хв	160	261	330	405	454
	P_4	0,152	U_4 , В	5,4	9,6	12,7	15,5	17,5
			n_4 , об/хв	133	230	301	368	420
			h_1 , м	0,25	0,272	0,287	0,301	0,312
V	P	h_0 , м	h , м	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	P_1	0,149	U_1 , В	4,5	7,5	10,2	12,5	14,8
			n_1 , об/хв	113	178	247	299	348
	P_2	0,165	U_2 , В	2,9	5,9	8,6	10,8	13,1
			n_2 , об/хв	80	146	199	259	314
	P_3	0,182	U_3 , В	1,2	4,5	7	9,2	11,4
			n_3 , об/хв	37	113	166	218	273
	P_4	0,198	U_4 , В	0,2	3,1	5,5	7,8	10,1
			n_4 , об/хв	5	83	135	183	245
			h_1 , м	0,288	0,312	0,332	0,348	0,365

На основі отриманих експериментальних даних із таблиці 6.2 простежується чітка залежність між напором води у верхньому б'єфі, навантаженням на генератор та вихідними параметрами турбін – швидкістю обертання (n) і напругою (U). У всіх турбінах спостерігається закономірне зростання обертів та вихідної напруги із підвищенням рівня напору, що відповідає гідродинамічним законам. Водночас, зі збільшенням електричного навантаження (від P_1 до P_4) показники n та U зменшуються, що свідчить про зростання опору у системі електрогенерації.

Найвищі значення обертів та напруги були зафіксовані у гвинтової турбіни (турбіна IV), що, ймовірно, пов'язано з її більшою масою (1096 г) та специфічною формою лопатей, яка сприяє ефективнішому захопленню водного потоку. Натомість найнижчі результати продемонструвала шнекова

турбіна (турбіна V), що можна пояснити її меншою масою та геометричними особливостями конструкції.

Порівняння турбін I–III, які мають спіралеподібну форму лопатей, демонструє, що варіант із лопатями за принципом «золотої спіралі» (турбіна I) забезпечує стабільні показники в умовах змінного навантаження, що може свідчити про її кращу адаптацію до змін у потоці. Турбіна II, з поступовим розширенням лопатей, показала дещо вищу продуктивність за рахунок кращого захоплення потоку, особливо на середніх і високих рівнях напору.

Отримані результати становлять основу для побудови математичних моделей, які дозволять прогнозувати роботу турбін у змінних гідравлічних умовах, а також можуть бути використані при конструюванні повномасштабних гідроенергетичних систем на основі спіралеподібних та шнекових турбін.

Для глибшого розуміння особливостей роботи кожної турбіни та виявлення тенденцій зміни вихідних параметрів залежно від гідравлічних умов було побудовано графіки функціональних залежностей за результатами експериментальних даних.

Зокрема, для всіх досліджуваних турбін побудовано такі графіки:

– графіки залежності напруги від висоти води у верхньому б'єфі $U = f(h)$ для кожного рівня навантаження на генератор (P_1 – P_4), що відображені на рисунках 6.1, 6.3, 6.5, 6.7, 6.9. Ці графіки дозволяють оцінити, як змінюється електричний вихід залежно від зростання напору при сталому навантаженні.

– графіки залежності швидкості обертання від висоти води $n = f(h)$ при тих самих рівнях навантаження (P_1 – P_4), представлені на рисунках 6.2, 6.4, 6.6, 6.8, 6.10. Це дає змогу простежити вплив гідродинамічного середовища на кінематичну характеристику турбіни – частоту обертання ротора.

Аналіз отриманих графіків забезпечує візуалізацію впливу конструктивних особливостей турбін на їх продуктивність у змінних умовах водного потоку та дозволяє провести порівняльну оцінку енергоефективності турбін.

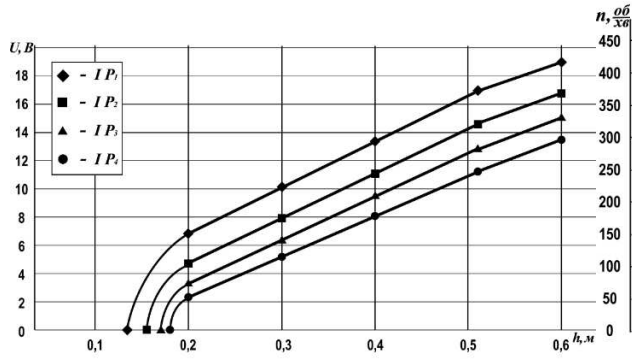


Рис. 6.1. Залежність $U=f(h)$ для турбіни I

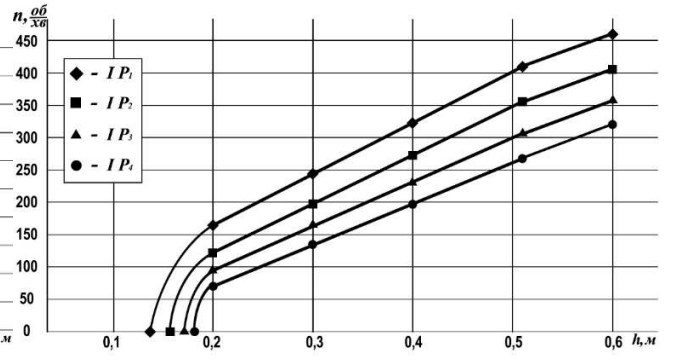


Рис. 6.2. Залежність $n=f(h)$ для турбіни I

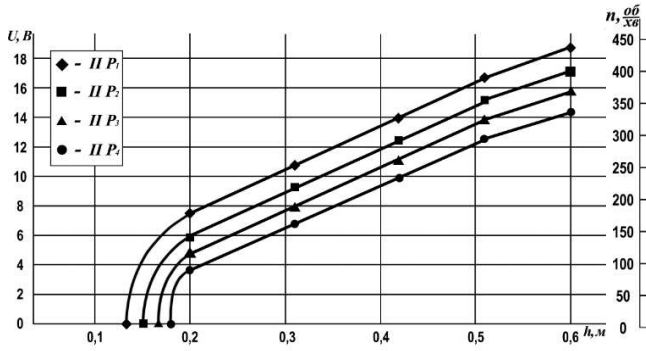


Рис. 6.3. Залежність $U=f(h)$ для турбіни II

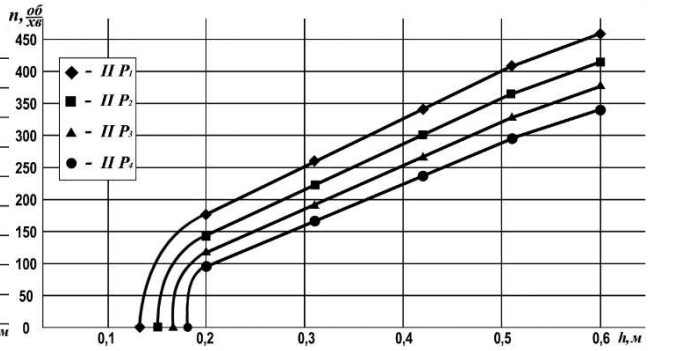


Рис. 6.4. Залежність $n=f(h)$ для турбіни II

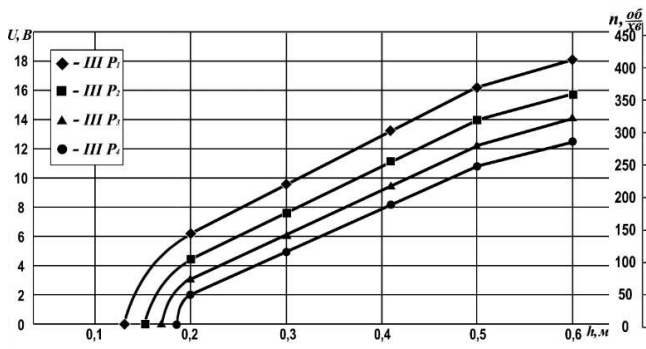


Рис. 6.5. Залежність $U=f(h)$ для турбіни III

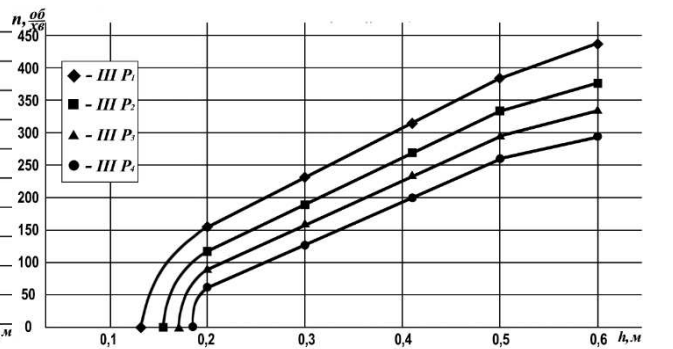


Рис. 6.6. Залежність $n=f(h)$ для турбіни III

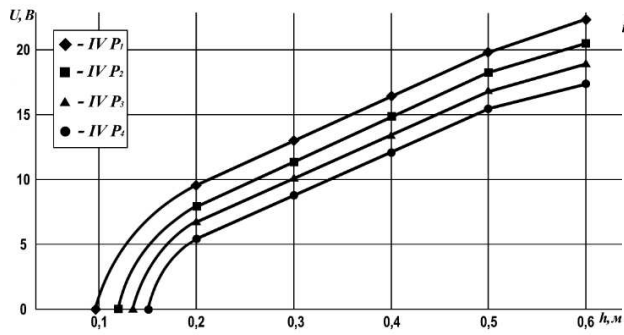


Рис. 6.7. Залежність $U=f(h)$ для турбіни IV

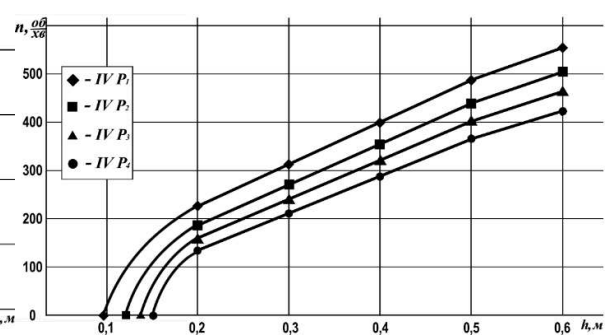


Рис. 6.8. Залежність $\eta=f(h)$ для турбіни IV

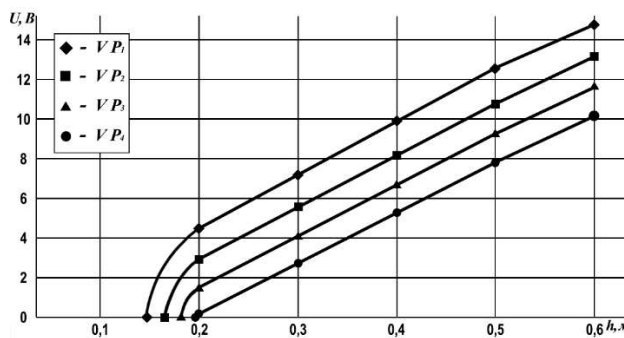


Рис. 6.9. Залежність $U=f(h)$ для турбіни V

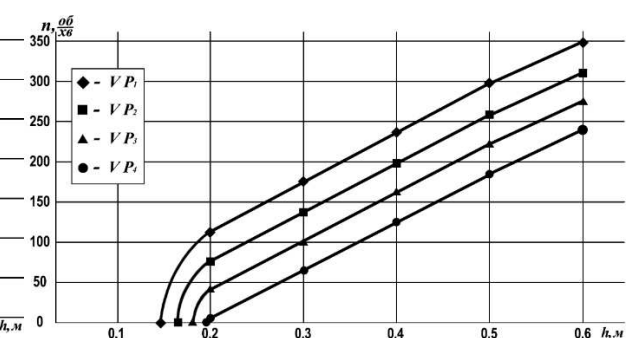


Рис. 6.10. Залежність $\eta=f(h)$ для турбіни V

Дослідження роботи турбін із різною масою, встановлених у водному потоці під кутом 45° до площини лопатей, підтвердило істотний вплив маси конструкції на динамічні та енергетичні характеристики системи. Аналіз експериментальних даних і графічних залежностей показав, що маса турбіни безпосередньо впливає на стійкість обертання, момент інерції, рівень страгування та ефективність генерації електроенергії при змінних гідродинамічних умовах і навантаженнях на генератор.

Легші турбіни (наприклад, шнекова турбіна – 690 г) характеризуються швидшим запуском (менше значення h_0), однак виявляють меншу вихідну напругу за високих рівнів навантаження, що свідчить про обмежену енергоефективність при інтенсивному режимі експлуатації. Натомість більш масивні турбіни (зокрема гвинтова – 1096 г) демонструють стабільніші

показники обертання та вищу продуктивність за рахунок кращого захоплення і перетворення кінетичної енергії потоку води.

Таким чином, результати випробувань дозволяють сформулювати рекомендації щодо необхідності уніфікації маси дослідних турбін для забезпечення коректного порівняння та об'єктивної оцінки впливу лише геометричних і конструктивних параметрів. Зокрема, доцільно проводити подальші дослідження із приведенням маси всіх турбін до рівня найважчої конструкції, що дозволить усунути вплив інерційного чинника як неконтрольованої змінної та зосередитись на аналізі форми, кута атаки та профілю лопатей.

6.3. Експериментальні дослідження турбін з однаковою вагою у наведеному водному потоці під кутом 45° до лопатей

Продовженням досліджень ефективності вдосконалених турбін стало їх тестування у лабораторній установці за умов штучно створених водних напорів, максимально наближених до реальних умов експлуатації.

Метою експерименту була оцінка ефективності роботи шнекових і спіралеподібних турбін шляхом порівняльного аналізу п'яти конструкцій з вирівняною вагою, встановлених у водному потоці під кутом 45° до площини лопатей. Такий підхід забезпечував наближеність до природних умов функціонування та дозволяв виявити специфіку взаємодії конструкцій із потоком.

Для забезпечення коректного порівняння турбін маса кожної турбіни була додатково врівноважена шляхом намотування дроту на корпус із фіксацією, а також подальшим балансуванням. При цьому відхилення за масою не перевищувало допустимі межі $\pm 5\%$, що гарантує об'єктивність отриманих результатів [103].

Експеримент був зосереджений на порівнянні турбін з ідентичними зовнішніми геометричними параметрами та однаковим принципом дії, проте з

різною внутрішньою конфігурацією. Такий підхід дозволив виявити вплив конкретних конструктивних рішень на ефективність гідродинамічного перетворення енергії.

У дослідженні брали участь такі варіанти турбін:

Турбіна I_2 – з лопатями за принципом «золотої спіралі», маса – 1100 г;

Турбіна II_2 – з спіралеподібними лопатями, що поступово розширюються, маса – 1089 г;

Турбіна III_2 – з спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу, маса – 1090 г;

Турбіна IV – гвинтова турбіна, маса – 1096 г;

Турбіна V_2 – шнекова турбіна, маса – 1092 г.

Таке порівняння дає змогу проаналізувати вплив геометрії лопатей за умов вирівняної маси конструкцій на ключові робочі параметри турбіни – швидкість обертання (n) та вихідну напругу генератора (U).

Усі випробування проводилися в контрольованих умовах лабораторної установки, спеціально сконструйованої для моделювання гідротехнічних процесів малої гідроенергетики. Система дозволяє точно регулювати рівень води у верхньому б'єфі, забезпечуючи стабільний і керований напір. Для моделювання навантаження на генератор використовується модуль регульованого навантаження, який дозволяє імітувати різні режими роботи гідроенергетичної системи.

З метою підвищення точності експерименту всі вимірювання здійснювались в автоматизованому режимі з використанням цифрових приладів. Для реєстрації кількості обертів використовувався електронний тахометр, для контролю напруги – високоточний цифровий вольтметр. Окрім основних показників, також фіксувалися додаткові параметри, необхідні для подальшого аналізу енергетичної ефективності та побудови регресійних моделей.

Для глибшого розуміння впливу зовнішніх факторів на роботу турбін було проведено факторний експеримент, що дозволяє дослідити вплив

незалежних змінних – висоти води у верхньому б'єфі (h) та навантаження на генератор (P) – на вихідні характеристики системи. Такий підхід не лише дає змогу оцінити окрему дію кожного з факторів, але й виявити ефекти їхньої взаємодії.

Факторний експеримент є ефективним інструментом для аналізу гідроенергетичних систем, оскільки дозволяє побудувати математичні моделі залежностей між параметрами потоку та електротехнічними характеристиками турбіни. Для кожної комбінації рівнів напору та навантаження було зафіксовано відповідні значення обертів (n) і напруги (U), що представлені у таблиці 6.3. Це дало змогу систематизувати результати та виявити оптимальні параметри для кожної конструкції.

Окрім основних показників ефективності роботи турбін, під час випробувань було визначено критичний рівень води (h_0), за якого турбіни починали самостійне обертання, що відповідає моменту страгування. Для визначення витрати води використовувався п'єзометр, встановлений на трикутному водозливі, що дозволило проаналізувати вплив витрати на динаміку запуску турбін та їхню роботу в різних режимах навантаження [103].

Таблиця 6.3

Отримані показники вироблених турбінами з однаковою вагою (I_2 , II_2 , III_2 , VI , V_2) у водному потоці під кутом 45° обертів (n) та вихідної напруги (U) з генератора в чотирьох режимах навантаження ($P_1 - P_4$) та при п'яти рівнях напору (h)

Шифр турбіни	P	$h_0, м$	$h, м$	0,2	0,31	0,41	0,51	0,6
I_2	P_1	0,128	$U_1, В$	7,2	11,1	14,1	16,9	19,4
			$n_1, об/хв$	169	265	333	407	473
	P_2	0,149	$U_2, В$	5,8	9,6	12,5	15,1	17,6
			$n_2, об/хв$	143	230	299	361	423
	P_3	0,161	$U_3, В$	4,6	8,1	11	13,5	16
			$n_3, об/хв$	115	190	264	321	384
	P_4	0,173	$U_4, В$	3,5	6,9	9,7	12,2	14,6
			$n_4, об/хв$	96	165	235	290	343
			$h_1, м$	0,25	0,274	0,289	0,305	0,312

продовження таблиці 6.3

Шифр турбіни	P	$h_0, м$	$h, м$	0,2	0,32	0,43	0,51	0,6
II ₂	P_1	0,106	U ₁ , В	7,6	12	15,6	18,3	20,3
			n ₁ , об/хв	180	286	372	441	500
	P_2	0,135	U ₂ , В	6,2	10,6	14,1	16,6	18,6
			n ₂ , об/хв	153	256	333	399	450
	P_3	0,149	U ₃ , В	4,9	8,9	12,6	14,8	16,9
			n ₃ , об/хв	123	207	299	348	407
	P_4	0,164	U ₄ , В	3,8	7,5	11,2	13,4	15,5
			n ₄ , об/хв	103	178	266	321	368
			h ₁ , м	0,25	0,276	0,292	0,305	0,312
III ₂	P	$h_0, м$	$h, м$	0,19	0,3	0,4	0,5	0,6
	P_1	0,105	U ₁ , В	8,5	13,1	15,5	18,2	20,5
			n ₁ , об/хв	197	314	368	439	504
	P_2	0,134	U ₂ , В	6,9	11,1	13,8	16,4	18,7
			n ₂ , об/хв	165	265	325	392	452
	P_3	0,148	U ₃ , В	4,9	9,2	12,1	14,5	16,8
			n ₃ , об/хв	123	218	287	342	405
	P_4	0,164	U ₄ , В	3,7	8,3	11	13,2	15,5
			n ₄ , об/хв	102	192	264	316	368
			h ₁ , м	0,25	0,273	0,289	0,303	0,313
IV	P	$h_0, м$	$h, м$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	P_1	0,098	U ₁ , В	9,5	13,4	17,2	19,9	22
			n ₁ , об/хв	227	320	414	489	551
	P_2	0,123	U ₂ , В	7,9	12,2	15,5	18,3	20,5
			n ₂ , об/хв	185	290	368	441	504
	P_3	0,138	U ₃ , В	6,7	10,9	14	16,8	18,8
			n ₃ , об/хв	160	261	330	405	454
	P_4	0,152	U ₄ , В	5,4	9,6	12,7	15,5	17,5
			n ₄ , об/хв	133	230	301	368	420
			h ₁ , м	0,25	0,272	0,287	0,301	0,312
V ₂	P	$h_0, м$	$h, м$	0,2	0,31	0,41	0,51	0,6
	P_1	0,136	U ₁ , В	6,1	9,4	12,5	15	16,9
			n ₁ , об/хв	151	223	299	357	407
	P_2	0,151	U ₂ , В	4,6	8,1	11	13,4	15,3
			n ₂ , об/хв	115	189	264	320	363
	P_3	0,167	U ₃ , В	3,3	6,8	9,6	12	13,9
			n ₃ , об/хв	94	163	230	285	327
	P_4	0,18	U ₄ , В	2,1	5,5	8,3	10,6	12,5
			n ₄ , об/хв	65	135	192	256	298
			h ₁ , м	0,288	0,314	0,334	0,35	0,366

Таблиця 6.3 містить порівняльний аналіз ефективності п'яти конструкцій турбін з однаковою масою – I_2 , II_2 , III_2 , IV і V_2 . Випробування проводилися у водному потоці під кутом 45° відносно лопатей, при п'яти рівнях напору (від 0,2 до 0,6 м) та в чотирьох режимах навантаження. Основними оцінюваними параметрами були швидкість обертання турбін (об/хв) та вихідна напруга (В), які виробляє генератор.

Пускові характеристики:

Найменшого напору для запуску потребують турбіни III_2 , II_2 та особливо IV – вони починають обертатись вже при напорі близько 0,1 метра. Це означає, що вони можуть працювати навіть у маловодних умовах. Турбіна IV (гвинтова) має найнижчий поріг запуску – 0,098 м. Натомість турбіна V_2 (шнекова) потребує найбільшого стартового напору – понад 0,13 м. Тобто вона менш чутлива до слабого потоку.

Максимальна ефективність при високому напорі:

При максимальному напорі в 0,6 м і найменшому навантаженні (режим P_1) найвищі результати демонструє гвинтова турбіна IV . Вона виробляє найбільшу напругу (22 В) і має найшвидше обертання (понад 550 об/хв). Дуже близькими до неї є турбіни III_2 і II_2 – вони трохи поступаються, але теж показують високу продуктивність. Турбіна I_2 займає середню позицію, а V_2 значно відстає – вона повільніше обертається і виробляє меншу напругу навіть при максимальному напорі.

Максимальна ефективність при збільшенні навантаження:

Коли навантаження зростає (режими від P_1 до P_4), усі турбіни природно втрачають оберти і знижують вихідну напругу. Проте тут важливо, як сильно падає продуктивність. Найкраще це навантаження витримує гвинтова турбіна IV – у неї падіння мінімальне, і навіть при найвищому навантаженні вона дає високі значення. Турбіни III_2 і II_2 теж показують стійкість. А от шнекова V_2 , навпаки, дуже втрачає в обертах і напрузі – це свідчить про її слабку адаптованість до змін у навантаженні.

Динаміка зростання продуктивності:

Ще один важливий аспект – наскільки швидко зростають оберти та напруга при збільшенні напору. У турбін III_2 і II_2 цей ріст стабільний і досить стрімкий, що говорить про хорошу конструкцію лопатей і геометрії. Особливо виділяється III_2 – її корпус має звуження, що позитивно впливає на швидкість потоку і, відповідно, ефективність. V_2 має найповільніше зростання – навіть коли напір збільшується суттєво, продуктивність зростає повільно.

В підсумку найкращою турбіною виявилася турбіну IV – вона запускається при найменшому напорі, виробляє найбільшу напругу й обертається швидше за всі інші в усіх режимах. На другому місці – турбіна III_2 зі звуженим корпусом: вона стабільна, ефективна й добре витримує навантаження. Далі йдуть II_2 та I_2 , які мають середні характеристики. Найменш ефективною виявилася шнекова V_2 – вона повільно запускається, має найменшу продуктивність і погано працює під навантаженням.

Для наочного відображення динаміки зміни основних параметрів роботи досліджуваних турбін у різних режимах навантаження та при зміні рівня води у верхньому б'єфі на графіках нижче подано залежності вихідної напруги генератора (U) та частоти обертання ротора (n) від висоти напору (h) для кожної з турбін. Побудовані залежності дозволяють оцінити ефективність конструкцій та простежити вплив зміни навантаження і рівня води на ключові робочі характеристики системи.

Зокрема, для всіх турбін представлено такі графіки:

– графіки залежності напруги від висоти води у верхньому б'єфі $U = f(h)$ для кожного рівня навантаження на генератор (P_1 – P_4), що відображені на рисунках 6.11, 6.13, 6.15, 6.17, 6.19.

– графіки залежності швидкості обертання від висоти води $n = f(h)$ при тих самих рівнях навантаження (P_1 – P_4), представлені на рисунках 6.12, 6.14, 6.16, 6.18, 6.20.

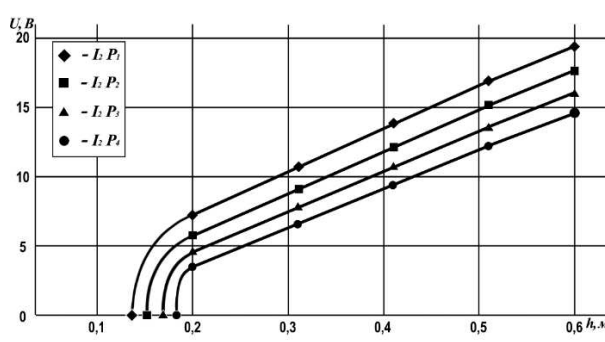


Рис. 6.11. Залежність $U=f(h)$ для турбіни I_2

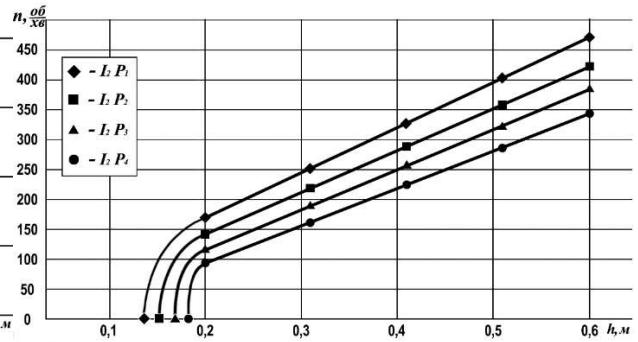


Рис. 6.12. Залежність $\eta=f(h)$ для турбіни I_2

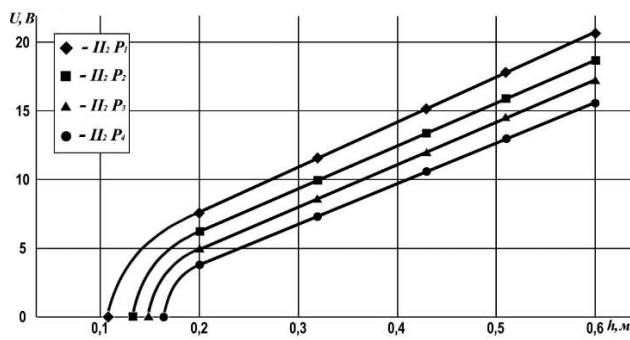


Рис. 6.13. Залежність $U=f(h)$ для турбіни II_2

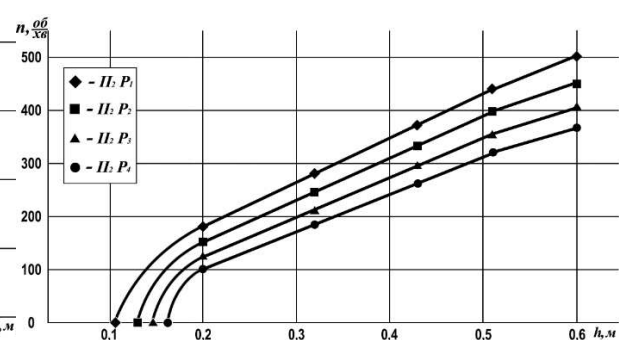


Рис. 6.14. Залежність $\eta=f(h)$ для турбіни II_2

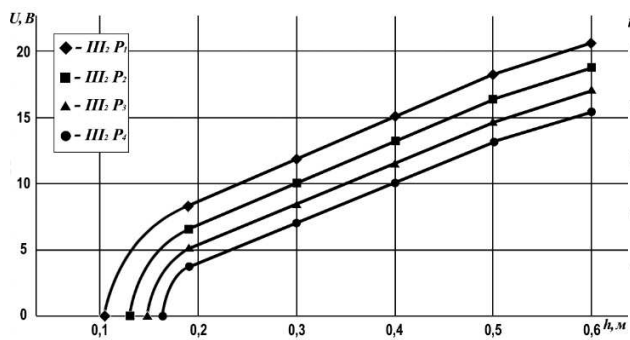


Рис. 6.15. Залежність $U=f(h)$ для турбіни III_3

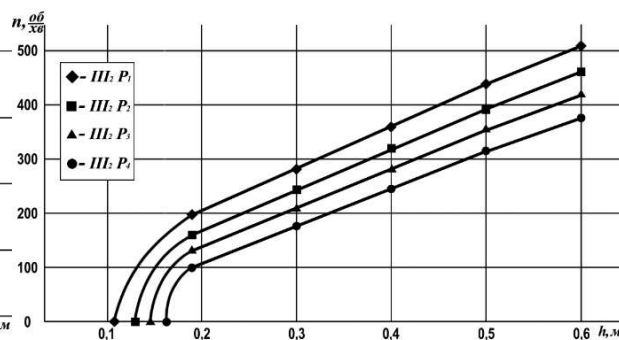


Рис. 6.16. Залежність $\eta=f(h)$ для турбіни III_3

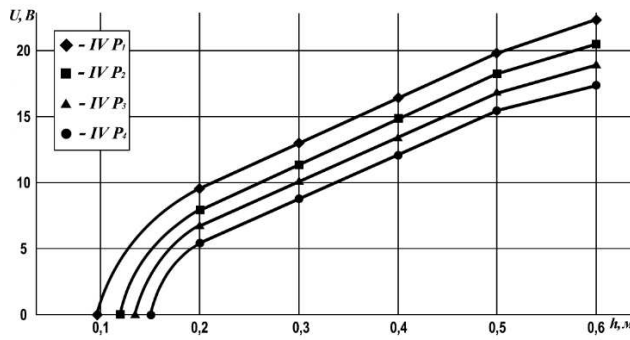


Рис. 6.17. Залежність $U=f(h)$ для турбіни IV

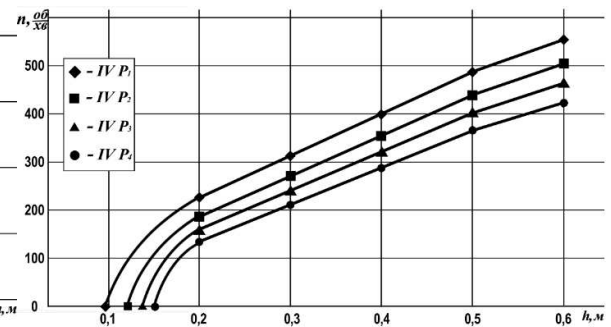


Рис. 6.18. Залежність $n=f(h)$ для турбіни IV

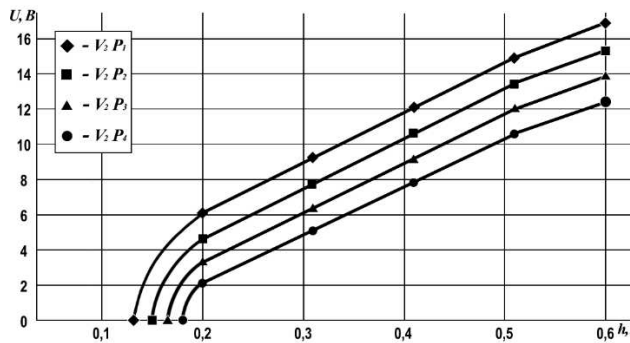


Рис. 6.19. Залежність $U=f(h)$ для турбіни V

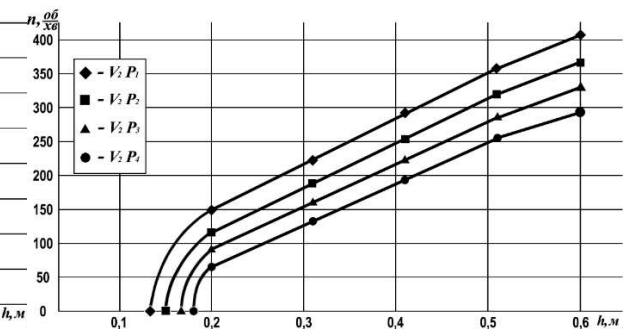


Рис. 6.20. Залежність $n=f(h)$ для турбіни V

Аналіз побудованих графіків підтверджує, що при вирівняній масі турбін конструктивні особливості відіграють ключову роль у формуванні робочих характеристик. Найкращі результати за більшістю параметрів продемонструвала гвинтова турбіна IV, яка поєднує високу швидкість обертання з ефективною генерацією електроенергії в умовах різних рівнів напору та навантаження. Її маса, що становила 1096 г, була найбільшою серед усіх досліджуваних турбін, що свідчить про впровадження у конструкцію інженерних удосконалень, спрямованих на підвищення механічної стабільності та енергоефективності. Саме ця турбіна була обрана як еталонна для подальшого приведення мас інших конструкцій до однакового рівня, що забезпечило рівні умови для експериментального дослідження [103].

З метою підтвердження достовірності попередніх результатів було проведено повторне тестування гвинтової турбіни, яке засвідчило майже повну ідентичність показників із початковими вимірюваннями. Виявлена

похибка не перевищувала 1%, що підтверджує надійність методології експерименту та стабільність роботи лабораторної установки.

Турбіни Π_2 та Π_3 зі спіралеподібною формою лопатей також продемонстрували високі показники, особливо в діапазоні середніх і високих напорів. Це свідчить про потенціал подальшої оптимізації криволінійних форм лопатей.

Отримані результати підтверджують доцільність поглиблених досліджень, зокрема в напрямі оптимізації умов потоку під кутом 90° до площини лопатей, що може сприяти підвищенню коефіцієнта гідродинамічного перетворення. Вирівнювання маси конструкцій дозволило мінімізувати вплив інерційних факторів, забезпечивши об'єктивність порівняння саме геометричних та гідродинамічних параметрів.

Таким чином, результати експерименту дозволяють зробити обґрунтовані висновки щодо конструктивних переваг окремих моделей, закладаючи наукове підґрунтя для розробки ефективніших гідротурбінних систем, орієнтованих на застосування в умовах малої гідроенергетики.

6.4. Експериментальні дослідження турбін з однаковою вагою у наведеному водному потоці під кутом 90° до лопатей

Метою заключного етапу досліджень у межах наукової роботи було вивчення впливу зміни кута взаємодії водного потоку з лопатями турбін на динаміку їх запуску (страгування), швидкість обертання та рівень генерації електричної напруги. Такий підхід дозволив змодельовати режими взаємодії з потоком, що надходить під прямим кутом до площини лопатей, характерні для умов, у яких водний потік не зазнає попереднього прискорення або змінює напрямок через конструктивні особливості гідротехнічних споруд.

Як і на попередньому етапі досліджень, усі турбіни були приведені до однакової маси з допустимим відхиленням не більше $\pm 5\%$, що забезпечило мінімізацію впливу інерційних характеристик на результати. Для забезпечення

можливості зміни кута напрямку потоку до 90° відносно площини лопатей у випробувальний модуль було інтегровано спеціально розроблену направляючу потоку (рис. 3.15). Вона дозволяла точно коригувати кут подачі водного потоку, забезпечуючи стабільність умов експерименту та достовірність порівняльного аналізу турбін.

Експеримент проводився у контрольованих умовах лабораторної установки зі стабілізованим напором води, змінюваним у п'яти рівнях, а також чотирма ступенями електричного навантаження генератора. Для фіксації параметрів роботи використовувалися ті самі вимірювальні прилади, що й у попередніх дослідженнях: цифровий тахометр для визначення обертів та високоточний вольтметр для реєстрації напруги на виході генератора. Додатково фіксувалися критичні значення страгування для кожної турбіни (h_0), а також обчислювався рівень води у верхньому б'єфі (h_1) на кожному етапі дослідження.

Результати експериментів наведено у таблиці 6.4 [104].

Таблиця 6.4

Отримані показники вироблених турбінами з однаковою вагою (I_2 , II_2 , III_2 , VI , V_2) у водному потоці під кутом 90° обертів (n) та вихідної напруги (U) з генератора в чотирьох режимах навантаження ($P_1 - P_4$) та при п'яти рівнях напору (h)

Шифр турбіни	P	$h_0, м$	$h, м$	0,2	0,3	0,4	0,49	0,6
I_2	P_1	0,113	$U_1, В$	9	13	16,7	20	23,7
			$n_1, об/хв$	212	311	403	491	602
	P_2	0,135	$U_2, В$	6,8	10,2	14	17,5	20,9
			$n_2, об/хв$	163	247	330	420	517
	P_3	0,147	$U_3, В$	5,2	8	12	15,5	18,1
			$n_3, об/хв$	129	187	285	368	437
	P_4	0,158	$U_4, В$	3,9	6,7	10,3	13,5	16,2
			$n_4, об/хв$	105	160	248	321	388
			$h_1, м$	0,285	0,311	0,328	0,341	0,357

продовження таблиці 6.4

Шифр турбіни	P	$h_0, \text{м}$	$h, \text{м}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
II ₂	P_1	0,09	U_1, B	9,4	14,1	17,3	20,5	23,9
			$n_1, \text{об/хв}$	223	333	417	504	607
	P_2	0,12	U_2, B	7,5	11,7	14,5	17,8	21,3
			$n_2, \text{об/хв}$	178	280	342	428	532
	P_3	0,134	U_3, B	5,8	9,1	12,6	15,7	18,6
			$n_3, \text{об/хв}$	143	214	300	375	450
	P_4	0,15	U_4, B	4,5	7,4	10,8	13,6	16,5
			$n_4, \text{об/хв}$	113	177	259	322	396
			$h_1, \text{м}$	0,285	0,311	0,328	0,343	0,357
III ₂	P	$h_0, \text{м}$	$h, \text{м}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	P_1	0,088	U_1, B	10,2	14,6	18,5	21,8	24,7
			$n_1, \text{об/хв}$	247	343	447	545	630
	P_2	0,119	U_2, B	7,9	12	15,2	18,8	21,2
			$n_2, \text{об/хв}$	185	285	362	454	527
	P_3	0,134	U_3, B	6,3	9,5	13,1	16,4	18,6
			$n_3, \text{об/хв}$	154	227	314	392	450
	P_4	0,149	U_4, B	4,7	7,6	11,3	14	16,9
			$n_4, \text{об/хв}$	116	180	268	330	407
			$h_1, \text{м}$	0,286	0,313	0,329	0,344	0,358
IV	P	$h_0, \text{м}$	$h, \text{м}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	P_1	0,072	U_1, B	10,8	15,3	19,5	23	26
			$n_1, \text{об/хв}$	259	362	475	582	664
	P_2	0,103	U_2, B	9,2	13,5	17,6	21	24
			$n_2, \text{об/хв}$	218	321	423	520	611
	P_3	0,119	U_3, B	7,5	11,6	15,9	19	21,9
			$n_3, \text{об/хв}$	178	278	381	461	548
	P_4	0,133	U_4, B	6,1	10	14,3	17,5	20,3
			$n_4, \text{об/хв}$	129	243	337	420	500
			$h_1, \text{м}$	0,285	0,311	0,328	0,343	0,357
V ₂	P	$h_0, \text{м}$	$h, \text{м}$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	P_1	0,125	U_1, B	8,7	12,7	16	18,4	20,7
			$n_1, \text{об/хв}$	201	301	384	444	511
	P_2	0,142	U_2, B	6,5	10,3	13,7	16,2	18,1
			$n_2, \text{об/хв}$	158	248	323	388	436
	P_3	0,158	U_3, B	5	8,4	11,7	14,2	16,1
			$n_3, \text{об/хв}$	125	195	280	336	386
	P_4	0,173	U_4, B	3,7	6,7	10,1	12,7	14,5
			$n_4, \text{об/хв}$	102	160	245	301	342
			$h_1, \text{м}$	0,319	0,351	0,375	0,394	0,41

Аналіз отриманих результатів (таблиця 6.4) дозволяє відзначити суттєве зростання ефективності роботи всіх турбін при взаємодії з водним потоком під кутом 90° до площини лопатей. Зменшення критичної висоти страгування (h_0) в більшості випадків свідчить про покращення умов запуску конструкцій за рахунок прямого фронтального тиску води на лопаті. Найнижчі значення h_0 були зафіксовані для турбіни III_2 (0,088 м) та IV (0,072 м), що вказує на їх підвищену чутливість до струменя навіть при незначному напорі [105].

У всіх турбін спостерігається стабільне зростання як швидкості обертання (n), так і вихідної напруги (U) зі збільшенням напору h . Водночас, конструкції III_2 та IV демонструють найбільші значення напруги за однакових умов навантаження, що говорить про їх високий коефіцієнт енергоперетворення в даній конфігурації взаємодії з потоком. Так, наприклад, при максимальному навантаженні (P_4) і $h = 0,6$ м турбіна IV досягла $U = 20,3$ В, що на понад 20% більше порівняно з V2.

Відмінності в динаміці обертів також вказують на відмінні реакції турбіни на зміну гідравлічного режиму. Турбіна IV зберігає найвищу частоту обертання на всіх рівнях напору, зокрема 664 об/хв при $h = 0,6$ м у режимі P_1 , що свідчить про її найвищу механічну продуктивність серед представлених варіантів [106].

Для наочності та кращого розуміння тенденцій зміни параметрів роботи турбін при куті взаємодії 90° , нижче наведено графічні залежності напруги та обертів від рівня напору в усіх режимах навантаження.

Зокрема, для всіх турбін представлено такі графіки:

– графіки залежності напруги від висоти води у верхньому б'єфі $U = f(h)$ для кожного рівня навантаження на генератор (P_1 – P_4), що відображені на рисунках 6.21, 6.23, 6.25, 6.27, 6.29.

– графіки залежності швидкості обертання від висоти води $n = f(h)$ при тих самих рівнях навантаження (P_1 – P_4), представлені на рисунках 6.22, 6.24, 6.26, 6.28, 6.30.

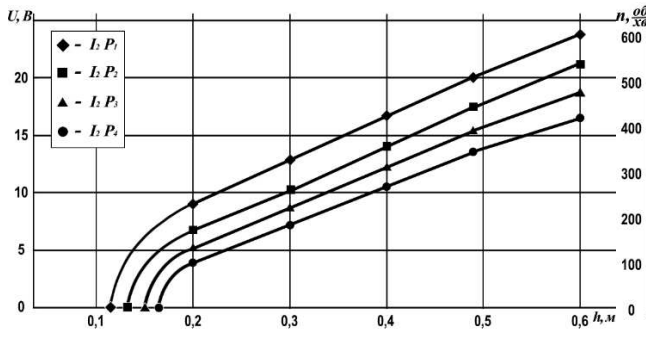


Рис. 6.21. Залежність $U=f(h)$ для турбіни I_2

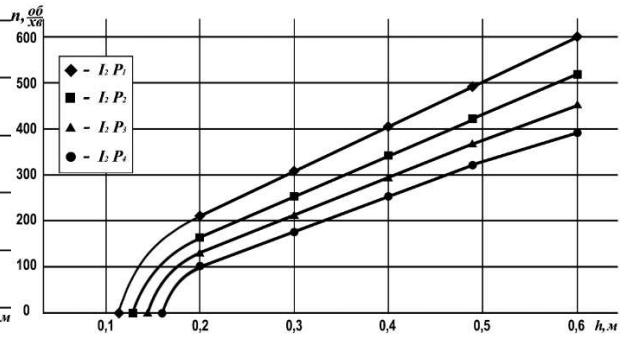


Рис. 6.22. Залежність $n=f(h)$ для турбіни I_2

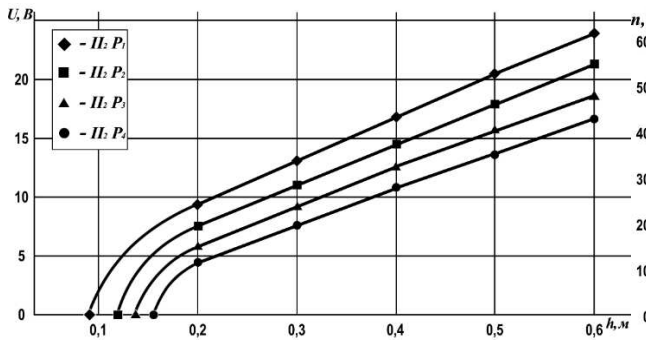


Рис. 6.23. Залежність $U=f(h)$ для турбіни II_2

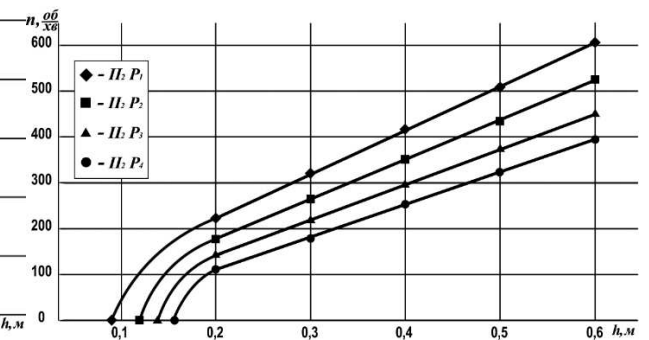


Рис. 6.24. Залежність $n=f(h)$ для турбіни II_2

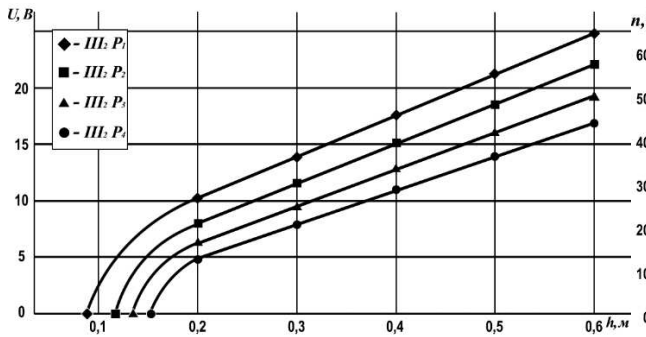


Рис. 6.25. Залежність $U=f(h)$ для турбіни III_2

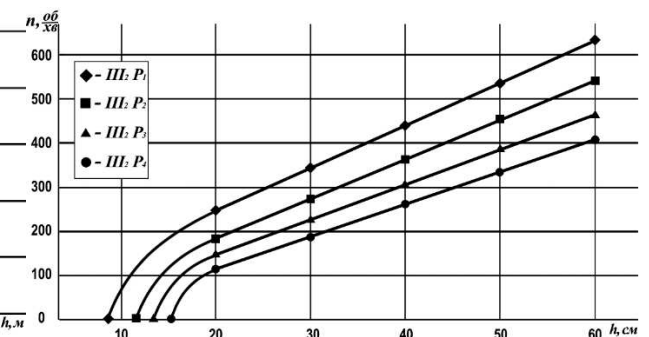


Рис. 6.26. Залежність $n=f(h)$ для турбіни III_2

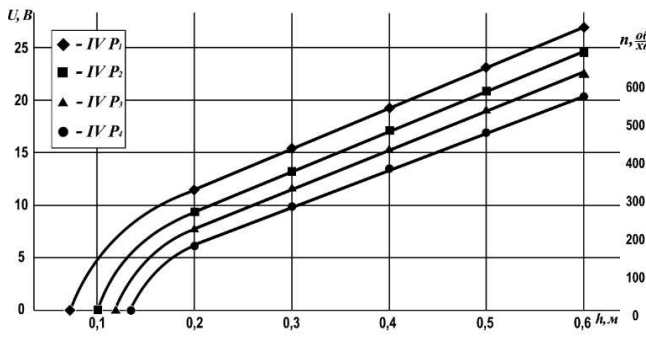


Рис. 6.27. Залежність $U=f(h)$ для турбіни IV

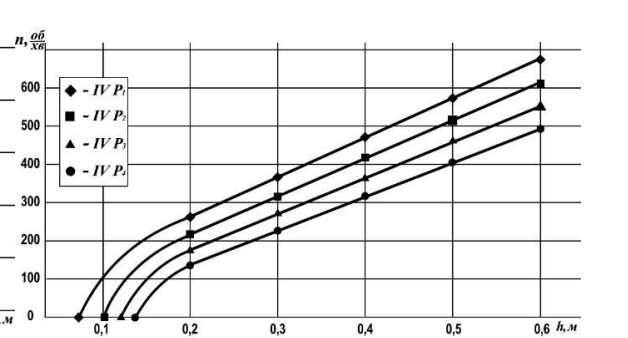


Рис. 6.28. Залежність $n=f(h)$ для турбіни IV

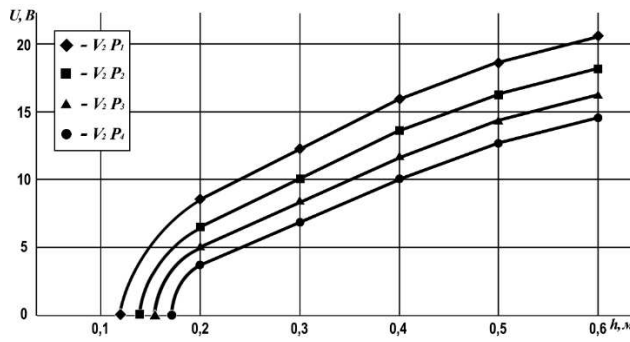


Рис. 6.29. Залежність $U=f(h)$ для турбіни V

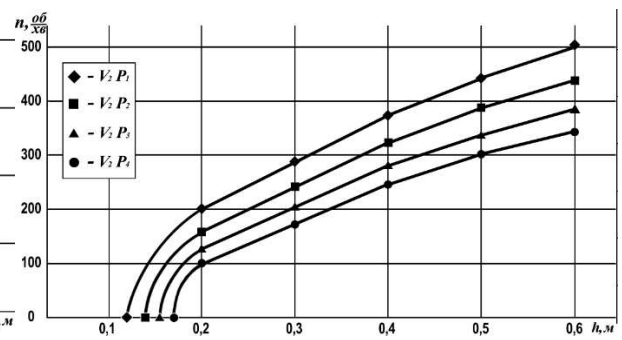


Рис. 6.30. Залежність $\eta=f(h)$ для турбіни V

Проведення заключного етапу лабораторних досліджень – у режимі фронтального обтікання турбін (кут між потоком та лопатями становив 90°) – дозволило глибше розкрити особливості роботи турбін при зміненому напрямі взаємодії з водним потоком. Експерименти, виконані з дотриманням умови вирівнювання мас усіх турбін, забезпечили коректність порівняння енергетичних характеристик різних конструкцій в ідентичних гідродинамічних умовах.

Аналіз отриманих даних свідчить про значне зростання рівня обертів і вихідної напруги генератора при збільшенні напору, що характерно для всіх турбін. Проте ступінь реакції на зміну гідравлічних параметрів варіювався залежно від конструктивних особливостей кожної турбіни. Найвищі результати продемонстрували турбіни III₂ та IV, що підтверджує їхню високу ефективність у фронтальному обтіканні. У той же час турбіни I₂ та V₂ показали менш виражену динаміку зростання параметрів, що може свідчити про наявність певних гідравлічних втрат або конструктивних недоліків у режимі прямого потоку.

Окрему увагу заслуговує порівняння режимів навантаження: при зростанні навантаження (від P_1 до P_4) спостерігається закономірне зниження показників напруги та швидкості обертання для всіх моделей, що свідчить про достатню чутливість турбін до змін робочих умов, але також вказує на межі їх адаптивності.

Загалом, результати досліджень у цьому розділі дозволили виявити найефективніші конфігурації турбін при фронтальному напрямі потоку, що є критично важливим при проектуванні міні-ГЕС або гідромодулів у специфічних умовах встановлення. У подальшому розділі буде виконано узагальнений порівняльний аналіз отриманих експериментальних даних для двох схем взаємодії турбін з однаковою масою із потоком (під кутами 45° і 90°). Це дозволить визначити найбільш раціональні конструктивні рішення з точки зору їх енергоефективності, стабільності та універсальності застосування в практичних умовах.

Висновки до розділу 6

Проведені лабораторні експерименти дозволили всебічно оцінити роботу п'яти конфігурацій турбін у водному потоці за різних умов взаємодії. Дослідження охопили вплив напору, навантаження, кута подачі потоку, маси турбін і конструктивних особливостей на основні енергетичні параметри – швидкість обертання та вихідну напругу генератора.

На основі отриманих результатів сформульовано такі узагальнені висновки:

1. Вплив напору і навантаження:

- напір води прямо впливає на швидкість обертання (n) та вихідну напругу (U);
- зростання навантаження призводить до зниження обертів і напруги через підвищення опору на валу.

2. Роль маси конструкцій:

- легкі моделі турбін швидше стартують, але менш ефективні при навантаженні;
- масивні турбіни демонструють кращу стабільність та інерційність, що сприяє підвищенню ККД;

– приведення всіх турбін до однакової маси дозволило об'єктивно порівняти ефективність.

3. Вплив кута подачі потоку:

– потік під кутом 90° до лопатей забезпечує найкращі енергетичні показники;

– подача під кутом 45° виявилася менш ефективною, особливо при підвищеному навантаженні.

4. Порівняння досліджуваних турбін:

– найвищу ефективність показала гвинтова турбіна IV, стабільно працюючи у змінних умовах потоку;

– турбіни III2 та IV найкраще реагують на фронтальний напрям подачі потоку.

5. Конструктивні особливості:

– геометрія лопатей, маса корпусу та ефект стиснення потоку є визначальними факторами для стартових характеристик, динаміки обертання та загальної ефективності турбін.

6. Методологічні аспекти:

– використання уніфікованої методики дослідження забезпечило сумісність результатів, високу точність фіксації параметрів і об'єктивність висновків.

7. Практичне значення:

– результати можуть бути використані для створення мікро гідроелектростанцій, особливо в умовах змінного потоку і невеликого напору.

– гвинтова турбіна (турбіна IV) рекомендована для автономних енергосистем побутового та фермерського типу.

8. Перспективи досліджень:

– потрібні подальші дослідження з оптимізації конструкцій залежно від гідродинамічних умов і специфіки об'єктів впровадження.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [44, 53, 62, 84, 85, 87-106].

РОЗДІЛ 7

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ТУРБІН НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

7.1. План проведення аналізу експериментальних даних

Процес аналізу отриманих результатів експериментальних досліджень реалізовано у кілька послідовних етапів, кожен із яких спрямований на вивчення ключових характеристик розроблених конструкцій турбін та забезпечення високої достовірності інтерпретації отриманих даних. Запропонована методика дозволяє систематизовано дослідити ефективність енергоперетворення, гідродинамічну поведінку турбін та виявити закономірності, що визначають їхню продуктивність.

1. Аналіз залежності вихідної напруги від параметрів потоку

На першому етапі заплановано аналіз вихідної напруги, яка є інтегральним показником ефективності перетворення кінетичної енергії потоку в електричну. Для зручності обробки, побудови графіків та візуалізації експериментальних результатів, аналіз роботи всіх турбін було здійснено у двох граничних режимах їхньої роботи:

- режим холостого ходу ($P_1 = 0$ Вт, $R = 0$ Ом), за якого відсутнє навантаження на генератор. Це дозволяє ізолювати вплив геометричних і конструктивних особливостей турбін на електричну генерацію, виключаючи енергетичні втрати через навантаження;

- режим максимального навантаження ($P_4 = 63$ Вт, $R = 82.29$ Ом), що дає можливість оцінити функціонування турбін в умовах реального енергоспоживання, включаючи навантажувальні характеристики генератора.

З метою спрощення аналізу та підвищення точності інтерпретації даних, основна увага зосереджена на показниках напруги (U), оскільки попередні графіки показали високу кореляцію між напругою та швидкістю обертання турбін (n). Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив похибок вимірювання

швидкості обертання та отримати більш інформативні результати щодо енергетичного потенціалу кожної турбіни [107].

2. Аналіз витрати води та її вплив на гідродинамічну ефективність

Для оцінки гідродинамічної ефективності турбін буде проведено зіставлення фактичних показників витрати води, отриманих під час експериментів, із теоретично розрахованими значеннями. Такий підхід дозволяє:

- оцінити точність гідродинамічної турбіни експериментальної установки;
- визначити відповідність реальних параметрів умовам тестування та виявити потенційні фактори, що впливають на розбіжності між теоретичними і практичними даними.

Таке порівняння дозволяє не лише підтвердити достовірність експериментальних умов, але й оцінити ступінь ефективного використання водного ресурсу кожною з конструкцій, що є критично важливим для практичного впровадження турбін у реальні гідросистеми [108].

3. Аналіз коефіцієнта корисної дії.

Завершальний етап аналізу включає розрахунок коефіцієнта корисної дії для кожної експериментальної моделі у визначених умовах експлуатації. ККД визначається як відношення корисної енергії, отриманої у вигляді електричної потужності, до загальної енергії потоку, що впливає на турбіну. Цей етап дозволяє:

- визначити ефективність перетворення енергії водяного потоку в механічну та електричну;
- виконати порівняльний аналіз між різними конструкціями, виявити залежності між геометричними параметрами, конфігурацією лопатей, масою корпусу та загальною продуктивністю;
- сформулювати рекомендації щодо оптимізації форми турбін для забезпечення максимальної енергетичної віддачі при збереженні конструктивної простоти.

Результати цього етапу становлять основу для подальших досліджень і технічного вдосконалення систем малої гідроенергетики [109].

Запропонована поетапна методика аналізу забезпечує високу точність, репрезентативність та наукову обґрунтованість отриманих результатів. Комплексне вивчення електричних, гідродинамічних та конструктивних характеристик дозволяє не лише оцінити ефективність розроблених турбін, але й сформулювати перспективні напрямки вдосконалення для подальшого підвищення ефективності малих турбін шнекового типу.

7.2. Аналіз взаємозв'язку рівня води у верхньому б'єфі та вихідної електричної напруги

Після завершення експериментів із досліджуваними турбінами у змінних умовах водного потоку було проведено детальний аналіз впливу висоти води у верхньому б'єфі та рівня навантаження на основний вихідний параметр – електричну напругу. Особливу увагу приділено роботі турбін за умов потоку води під кутом 90° до лопатей, оскільки це положення спрямовує потік води перпендикулярно до лопатей, оптимізуючи взаємодію з конструкцією турбіни. У той час як кут 45° створює нестандартний напрям потоку, за якого використання кінетичної енергії є частковим, що впливає на продуктивність турбін.

Вибір кута 90° обумовлений його здатністю забезпечити найкращі гідродинамічні умови для ефективного генерування електричної напруги через оптимальну взаємодію потоку з лопатями та створення обертального моменту.

Ефективність такого підходу підтверджують результати, наведені в таблицях 6.3 – 6.4. Дані демонструють, що показники, отримані за умов кута 90° , є репрезентативними для оцінки характеристик турбін і дозволяють точно порівнювати їхню ефективність у різних конструктивних і робочих умовах.

Для забезпечення максимальної достовірності отриманих результатів під час експериментальних досліджень п'яти конфігурацій турбін за різних умов ваги та водного потоку показники знімалися двома незалежними методами: за допомогою вимірювальних пристроїв і через автоматизовану систему збору даних. Паралельне використання цих методів дозволило виконати комплексну верифікацію отриманих параметрів.

Зіставлення результатів, отриманих різними методами, виявило випадкові похибки, спричинені людським фактором. Зокрема, при вимірюванні ручним тахометром не завжди дотримувалася оптимальна відстань фіксації пристрою від обертового валу генератора (0,25 метра), що призводило до розбіжностей, які у деяких випадках досягали 20%. Розбіжність показників напруги, виміряних вольтметром вручну, була значно меншою – до $\pm 3\%$ порівняно з автоматизованою системою. Це також можна пов'язати з впливом людського фактору, зокрема під час зчитування показів.

З огляду на виявлені похибки для аналізу залежності $U=f(h)$ для кожної турбіни обиралися показники, отримані автоматизованою системою збору даних. Це дозволило забезпечити максимальну точність і надійність результатів, які стали основою для оцінки ефективності досліджуваних турбін.

На основі результатів досліджень, наведених у таблицях 6.4, було побудовано графік (рис. 7.1.). Він ілюструє залежність електричної напруги, виробленої генератором, від висоти води у верхньому б'єфі (h) для досліджуваних турбін (I_2 , II_2 , III_2 , IV , V_2). Для зручності інтерпретації результати представлені для двох режимів навантаження: холостого ходу (P_1) та максимального навантаження (P_4). Графік чітко демонструє вплив конструктивних особливостей та експлуатаційних умов на продуктивність турбін.

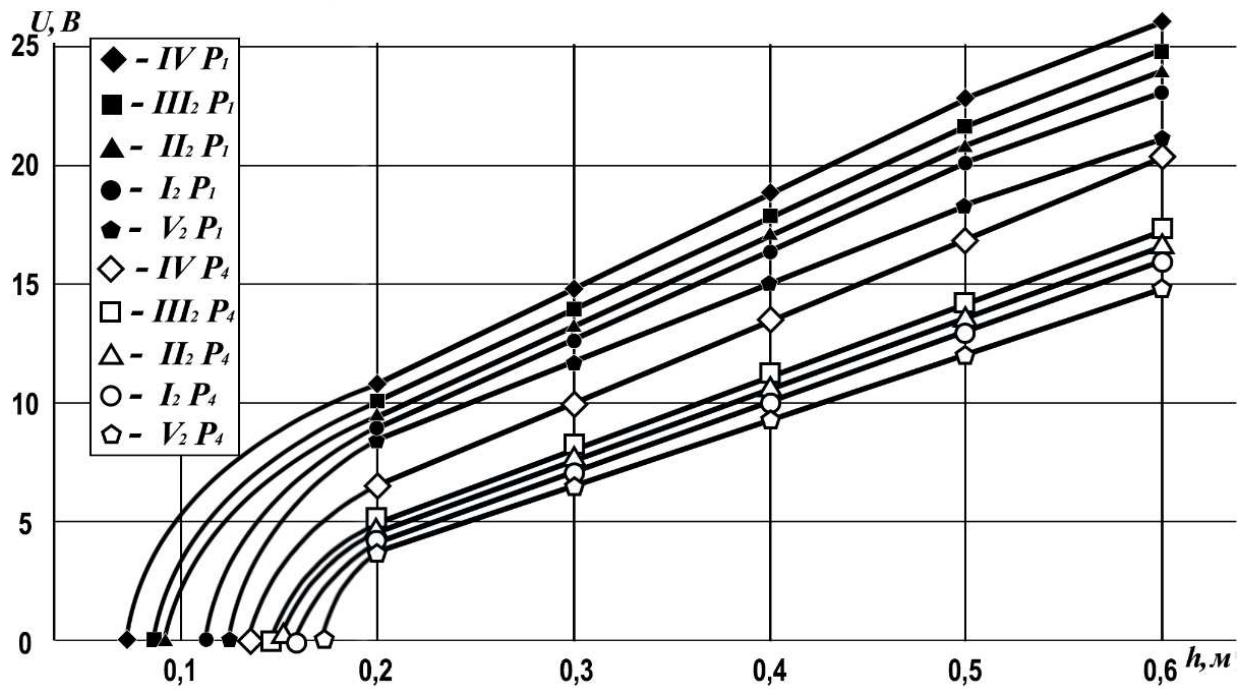


Рис. 7.1. Графік залежності $U=f(h)$ для всіх досліджуваних турбін ($I_2, II_2, III_2, IV, V_2$) за двох рівнів навантаження (P_1, P_4)

Аналіз отриманих експериментальних результатів свідчить, що висота води у верхньому б'єфі (h) є визначальним фактором, який впливає на потенційну енергію потоку. Зі збільшенням рівня води підвищується швидкість потоку, що, в свою чергу, призводить до зростання частоти обертання турбін і, відповідно, до збільшення виробленої електричної напруги.

Як свідчать графіки (рис. 6.1. – 6.30.), для страгування всіх досліджуваних моделей турбін у різних режимах роботи було необхідно витратити значно більше енергії порівняно з енерговитратами після початку руху. Це явище пояснюється наявністю додаткового опору на етапі запуску, коли турбіна перебуває у стані спокою, а потік води ще не повністю подолав сили інерції та тертя. Зазначена особливість чітко відображена у вигляді криволінійного зростання напруги на початкових етапах підвищення рівня води, що поступово трансформується у майже прямолінійну залежність, коли турбіни досягають сталого режиму роботи.

Під час експериментальних досліджень встановлено, що в номінальному режимі роботи (починаючи з висоти води $h \approx 0,2$ м) електрична напруга зростає лінійно пропорційно до підвищення рівня води в межах допустимого діапазону лабораторної установки ($h \leq 0,6$ м). Така лінійна залежність свідчить про стабільну динаміку роботи турбін у зазначеному інтервалі, що забезпечує прогнозовану ефективність перетворення потенціальної енергії водного потоку в електричну енергію.

Отримані результати підтверджують, що ефективність роботи турбін залежить не лише від конструктивних особливостей, а й від гідродинамічних характеристик водного потоку в умовах підвищення рівня води. Особливості поведінки напруги на різних етапах роботи дозволяють більш детально оцінити ефективність кожної турбіни та розробити рекомендації для оптимізації їх використання у практичних умовах.

Серед досліджених турбін найвищі показники продуктивності в усіх чотирьох режимах навантаження продемонструвала турбіна гвинтового типу (IV). Її ефективність була найбільш очевидною при різних рівнях води у верхньому б'єфі та при різних кутах напору водного потоку відносно лопатей. Особливості конструкції гвинтової турбіни, зокрема її оптимальна геометрія лопатей і сприятливий розподіл маси на корпусі, забезпечують стабільне перетворення кінетичної енергії води на механічну та електричну енергію.

Високі показники роботи цієї турбіни підтверджуються залежностями, наведеними в графіках (рис. 6.1. – 6.30.) і таблицях 6.2 – 6.4 дослідження. Гвинтова турбіна досягала максимального значення електричної напруги за умов максимального навантаження, сталого рівня води та оптимального кута потоку, що підтверджує її універсальність та адаптивність до різних гідродинамічних умов. Крім того, її стабільність у режимі максимального навантаження свідчить про високу надійність та можливість використання у реальних експлуатаційних системах.

Натомість найнижчі показники продуктивності були зафіксовані у традиційної шнекової турбіни (V₂). Ця турбіна продемонструвала значно

нижчу ефективність у всіх режимах навантаження та за різних рівнів води у верхньому б'єфі порівняно з іншими досліджуваними моделями. Основними чинниками такої низької продуктивності є конструктивні особливості шнекової турбіни, зокрема її невисока адаптивність до змінних гідродинамічних умов і обмежена здатність до ефективного перетворення енергії потоку.

Ці висновки підтверджуються аналізом експериментальних даних турбіни V_2 , представлених на графіках рис. 6.1. – 6.30. і в таблицях 6.2. – 6.4.. Показники демонструють слабе зростання електричної напруги у всіх режимах навантаження зі збільшенням висоти води у верхньому б'єфі. Хоча шнекова турбіна виявила стабільність за умов низького навантаження, її максимальні значення напруги суттєво поступаються результатам інших моделей, особливо в режимах навантаження P_4 .

Такі характеристики шнекової турбіни обмежують її використання у системах із високими енергетичними вимогами. Водночас ця турбіна може бути застосована у випадках, де ключовими перевагами є простота конструкції, стабільність роботи у номінальних умовах та низька вартість експлуатації.

Дослідження показали, що навантаження суттєво впливає на частоту обертання всіх моделей турбін: зі збільшенням навантаження оберти турбін сповільнюються, що пропорційно знижує вироблену електричну напругу.

Загалом, результати експериментів підтвердили, що розроблена турбіна гвинтового типу має вищу ефективність в усіх режимах навантаження та рівнях води, що пояснюється оптимізованою конструкцією. Додаткову перевагу забезпечило використання корпусу турбіни як маховика, що сприяло покращенню роботи в умовах максимального навантаження.

7.3. Аналіз витрати води залежно від режимів напору водяного потоку на лопаті турбін

Для забезпечення максимальної достовірності отриманих результатів під час експериментальних досліджень п'яти конфігурацій турбін за різних умов водного потоку, показники витрати води знімалися двома незалежними методами: за допомогою п'єзометра на трикутному вимірювальному водозливі (детально описаного в розділі 3.1) та через автоматизовану систему збору даних (розділ 3.3). Паралельне використання цих методів дозволило виконати комплексну верифікацію результатів.

У таблиці 7.1. наведено розрахункові витрати води (Q_1 , м³/с), визначені за допомогою програмного забезпечення для всіх турбін (I_2 , II_2 , III_2 , IV , V_2), за режимів напору під кутами 45° та 90° відносно лопатей, відповідно до рівня води у верхньому б'єфі (h). Розрахунки виконано за формулами (3.7, 3.12) на основі рівня води та площ перерізів направляючої камери і пристрою спрямування потоку.

Таблиця 7.1

Таблиця розрахункових витрат (Q_1) при різних кутах подачі потоку (45° і 90°) та рівнях води у верхньому б'єфі (h)

Кут потоку	$h \approx 0,2\text{м}$	$h \approx 0,3\text{м}$	$h \approx 0,4\text{м}$	$h \approx 0,5\text{м}$	$h = 0,6\text{м}$
45°	0,069	0,084	0,097	0,108	0,119
90°	0,096	0,117	0,135	0,151	0,166

Таким чином, розрахункові результати досліджень наведені в таблиці 6.16 підкреслюють важливість комплексного підходу до програмування та калібрування вимірювальних систем із урахуванням конструкції турбіни, що є критичним для отримання точних і достовірних даних.

Для остаточного аналізу були використані значення витрати води (Q , м³/с), визначені за допомогою п'єзометра відповідно до рівнів водяного стовпа (h_1 , м), зафіксованих у таблицях 6.2 – 6.4. Розрахунки проводилися за

формулою Томсона (3.2), яка враховує як гідродинамічні параметри потоку, так і конструктивні особливості турбін. Отримані результати зафіксовані в таблиці 7.2, забезпечили високу точність оцінки витрати води та стали надійною основою для подальшого аналізу ефективності досліджуваних турбін.

Таблиця 7.2

Розрахункові витрати води (Q) за даними п'єзометричних вимірювань при кутах подачі потоку 45° і 90° та різних рівнях води у верхньому б'єфі (h)

Шифр турбін	Кут потоку	$h \approx 0,2\text{м}$	$h \approx 0,3\text{м}$	$h \approx 0,4\text{м}$	$h \approx 0,5\text{м}$	$h = 0,6\text{м}$
I ₂	45°	0,044	0,055	0,063	0,072	0,076
	90°	0,061	0,076	0,086	0,095	0,107
II ₂	45°	0,044	0,056	0,065	0,072	0,076
	90°	0,061	0,076	0,086	0,096	0,107
III ₂	45°	0,044	0,055	0,063	0,071	0,077
	90°	0,061	0,077	0,087	0,097	0,107
IV	45°	0,044	0,054	0,062	0,070	0,076
	90°	0,061	0,076	0,086	0,096	0,107
V ₂	45°	0,062	0,077	0,090	0,101	0,113
	90°	0,080	0,102	0,121	0,136	0,151

Аналіз отриманих даних виявив значні розбіжності між методами, зумовлені особливостями процесу вимірювання. Зокрема, при використанні автоматизованої системи не було враховано звуження потоку, спричинене конструкцією турбіни, що суттєво впливає на ефективну площу проходу води. Розрахунок проводився на основі площі перерізу направляючої камери потоку ($S_k = 0,0346\text{м}^2$) без корекції на звуження з вхідного перерізу турбіни ($S = 0,0314\text{м}^2$) до вихідного ($S_1 = 0,0191\text{м}^2$). У результаті реальна площа проходу потоку була зменшена до $0,0223\text{м}^2$, проте це зменшення не було враховане при програмуванні автоматизованої системи.

Неврахування конструктивних особливостей призводило до завищення обчисленої витрати води порівняно з фактичними значеннями, зафіксованими п'єзометром. У деяких випадках розбіжність між результатами сягала 36%, що свідчить про необхідність адаптації автоматизованих вимірювальних систем до геометрії турбіни.

Як видно з таблиць 7.1. і 7.2, витрата води значно зросла при напрямі потоку під кутом 90° відносно лопатей турбін. Це зростання обумовлено конструктивними особливостями направляючого пристрою, який має збільшений вхідний діаметр ($d_0 = 0,315\text{м}$), що плавно звужується до входу в направляючу камеру. Така геометрія пристрою сприяє формуванню чітко спрямованого потоку води, який створює ефект стиснення струменя.

Також таблиці 7.1. і 7.2. демонструють що конструкція шнекової турбіни показала найвищу витрату води максимально наближену до розрахункових витрат. Це також підтверджує той факт що при програмуванні таких розрахунків необхідно враховувати звуження потоку яке спричиняє конструкція турбіни.

Таблиці 7.1. і 7.2. демонструють, що модель шнекової турбіни V_2 показала найвищу витрату води, яка була максимально наближена до розрахункових значень, із різницею, що становила $\approx 9\%$. Цей результат підкреслює важливість врахування звуження потоку, спричиненого конструктивними особливостями турбіни, у процесі програмування алгоритмів для розрахунків витрати води.

Аналіз результатів також вказує на те, що якби звуження турбін було повністю враховано під час програмування розрахункових алгоритмів, то використання коефіцієнта витрати $\mu = 0,62$, який враховувався в розрахунках, дозволило б досягти результатів, ще ближчих до реальних показників. Це підкреслює значущість точного відображення конструктивних особливостей у турбінах розрахунків для підвищення їхньої відповідності експериментальним даним.

7.4. Аналіз ефективності роботи турбін за ККД

Для оцінки ефективності роботи досліджуваних турбін було використано основні параметри, що дозволяють визначити їхню механічну та електричну продуктивність. Аналіз проводився на основі експериментальних даних, які відображають залежність між витратою води, висотою водяного стовпа у верхньому б'єфі та вихідною електричною потужністю турбін.

Особливу увагу приділяли коефіцієнту корисної дії, який відображає ефективність перетворення кінетичної та потенціальної енергії водяного потоку в електричну енергію. Для цього використовувалися як розрахунки, так і виміряні значення ключових параметрів, що забезпечило всебічний підхід до оцінки продуктивності турбін за різних режимів роботи.

Коефіцієнт корисної дії турбін доцільно визначати за умов максимального навантаження (P_4) в рамках досліджень, оскільки саме за таких умов система функціонує в режимах, максимально наближених до реальних експлуатаційних. За відсутності навантаження виникає критична проблема – опір генератора наближається до нуля, що робить неможливим точне вимірювання корисної електричної потужності. Відповідно, розрахунок ККД за таких умов стає некоректним, адже не враховується фактична робота системи в умовах навантаження.

Розрахунок коефіцієнта корисної дії за умов максимального навантаження дозволяє не лише оцінити загальну ефективність енергетичного перетворення, але й порівняти продуктивність різних конструкцій турбін. Саме максимальне навантаження забезпечує створення стабільного електричного опору на обмотках генератора, необхідного для генерації електроенергії, та формує умови, за яких взаємодія кінетичної і потенціальної енергії водяного потоку з лопатями турбіни відбувається з максимальною ефективністю.

Крім того, аналіз ККД у таких режимах дає змогу виявити конструктивні особливості, що впливають на передачу енергії від водного потоку до

генератора, включаючи форму лопатей, геометрію пристрою для направлення потоку та ефективність використання витрати води.

ККД (η) турбіни визначається як співвідношення корисної електричної потужності генератора (P_g , розраховується за формулою 6.2) до вхідної механічної потужності, що діє на турбіну (P_m , розраховується за формулою 6.7).

У таблиці 7.3. представлені значення ККД (η) для кожної моделі турбін (I_2 , II_2 , III_2 , IV , V_2) за двох напрямків потоку відносно лопатей турбін (45° та 90°), розраховані на основі експериментальних даних за умов максимального навантаження на різних рівнях води у верхньому б'єфі (h). Отримані результати дають змогу порівняти ефективність турбін у реальних умовах експлуатації та обґрунтувати вибір найбільш оптимальної конструкції залежно від гідротехнічних параметрів.

Таблиця 7.3

ККД (η) турбін (I_2 , II_2 , III_2 , IV , V_2) за умов максимального навантаження при кутах подачі потоку 45° та 90° до лопатей на різних рівнях води у верхньому б'єфі (h)

Шифр турбін	Кут потоку	$h = 0,2м$	$h = 0,3м$	$h = 0,4м$	$h = 0,5м$	$h = 0,6м$
I_2	45°	0,12	0,25	0,35	0,39	0,43
	90°	0,19	0,32	0,45	0,53	0,58
II_2	45°	0,14	0,28	0,39	0,45	0,48
	90°	0,22	0,35	0,47	0,55	0,60
III_2	45°	0,15	0,29	0,40	0,47	0,51
	90°	0,25	0,38	0,50	0,57	0,63
IV	45°	0,28	0,41	0,52	0,60	0,66
	90°	0,45	0,60	0,72	0,82	0,89
V_2	45°	0,06	0,19	0,28	0,33	0,34
	90°	0,17	0,31	0,43	0,50	0,53

Аналіз таблиці 7.3 демонструє чітку залежність коефіцієнта корисної дії (η) турбін від рівня води у верхньому б'єфі (h) та кута подачі потоку. В усіх турбінах спостерігається стабільне зростання ККД зі збільшенням рівня води, що є закономірним результатом покращення умов для енергетичного перетворення водяного потоку.

Найвищі значення ККД спостерігаються у турбіни IV, яка показала максимальний ККД – 0,89 при $h = 0,6$ м та куті 90° , що свідчить про високу ефективність конструкції цієї турбіни. Також ця модель демонструє значну різницю між кутами 45° і 90° , що підкреслює чутливість конструкції до прямої подачі потоку.

Турбіна III₂ займає друге місце за показниками ККД, демонструючи хорошу ефективність при обох кутах, особливо за 90° , де ККД сягає 0,63.

Турбіни I₂ та II₂ показали середні результати: при максимальному рівні $h = 0,6$ м та куті 90° їх ККД становить 0,58 та 0,60 відповідно. Хоча ці показники поступаються лідерам, вони залишаються на прийнятному рівні для практичного застосування в умовах середньої напірності.

Найнижчі результати спостерігаються у турбіни V₂, особливо за кута 45° , де ККД залишається низьким по всьому діапазону h (наприклад, лише 0,06 при $h = 0,2$ м). Це свідчить про менш сприятливу конструкцію для використання енергії потоку під непрямым кутом. Водночас при куті 90° турбіна демонструє значно кращі показники (до 0,53).

Загалом, результати таблиці підтверджують, що кут 90° є оптимальним для забезпечення максимальної ефективності турбін, а також підкреслюють необхідність врахування гідродинамічних умов і конструктивних характеристик при виборі типу турбіни для конкретних гідротехнічних об'єктів.

Для кращої візуалізації результатів, наведених у таблиці 7.3., побудовано графік (рис. 7.2.), що відображає залежність коефіцієнта корисної дії турбін ($\eta = f(h)$) від рівня води у верхньому б'єфі (h) для кожної турбіни (I₂, II₂, III₂, IV, V₂). Графік побудовано за експериментальними даними,

отриманими за умов максимального навантаження та двох напрямків подачі потоку – під кутом 45° та 90° до площини лопатей.

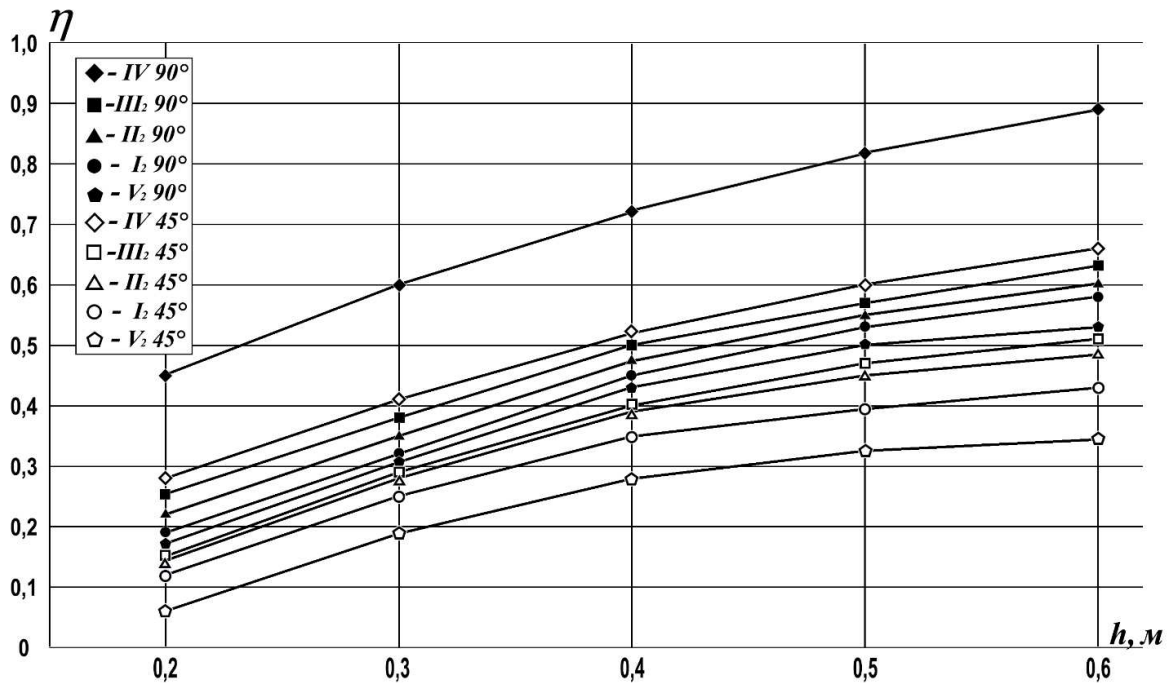


Рис. 7.2. Залежність коефіцієнта корисної дії (η) від рівня води у верхньому б'єфі (напір – h) для турбін (I_2 , II_2 , III_2 , IV , V_2) за умов максимального навантаження (P_4) та двох напрямків подачі потоку (45° і 90°)

Графік (рис. 7.2.) дозволяє наочно порівняти динаміку зміни ККД залежно від умов подачі потоку та висоти напору, що особливо важливо для виявлення оптимальних режимів експлуатації кожної турбіни. Побудова кривих на основі експериментальних даних за умов максимального навантаження забезпечує достовірну оцінку енергетичної ефективності досліджуваних турбін у реальних гідротехнічних умовах.

7.5. Порівняльний аналіз та обґрунтування вибору конструкцій для роботи у потоці з низьким напором

У межах експериментального дослідження було проведено порівняння ефективності кількох типів турбін, включаючи авторські розробки – три

конструкції турбін зі спіралеподібними лопатями та турбіну гвинтового типу, створені з урахуванням природних гідродинамічних закономірностей та адаптовані для роботи у відкритому потоці за умов низького або наднизького напору.

Дослідження охоплює порівняння чотирьох типів турбін:

- турбіна гвинтового типу (пат. №156567)[97];
- турбіни зі спіралеподібними лопатями (пат. №150304) [53];
- шнекова турбіна (класична Архімедова конструкція);
- осьова турбіна (реактивного типу).

Межі робочого напору визначено на основі результатів лабораторних випробувань, конструктивних особливостей турбін та аналізу джерел [110, 111].

Осьові турбіни ефективно працюють у діапазоні 2–10 м, однак потребують наявності напірної камери або греблі, що значно ускладнює їх застосування у відкритих руслах без спеціальної гідротехнічної інфраструктури.

Класична шнекова турбіна здатна функціонувати за напору 0,5–10 м, проте її ефективність суттєво знижується при мілководних потоках через відкриту геометрію та обмежену глибину занурення.

Гвинтова турбіна IV (пат. №156567) та спіралеподібна турбіна III₂ (пат. №150304) досліджувалися в однакових умовах лабораторного стенду з максимальною висотою напору до 0,6 м. Обидві конструкції продемонстрували стабільну та ефективну роботу в діапазоні 0,2 – 0,6 м, що підтверджує їх високу придатність до роботи у відкритому потоці.

Обмеження лабораторної установки не дозволили досягти граничного ефективного рівня напору, однак за конструктивним задумом обидві турбіни орієнтовані на роботу в діапазоні 0,2 – 3 м, що відповідає умовам більшості малих річок і каналів. Подальше визначення верхньої межі ефективності доцільно здійснювати в реальних польових умовах.

Обидві турбіни мають нероз’ємну монолітну конструкцію, що мінімізує гідравлічні втрати, забезпечує стабільність в умовах змінного потоку та дозволяє експлуатацію без греблі – шляхом занурення у природну течію річки. Вони можуть встановлюватися безпосередньо у русло, не потребують формування напірного резервуару та демонструють стабільну генерацію за умов спрямованої подачі води.

Таким чином, гвинтова та спіралеподібна турбіни, на відміну від осьових і класичних шнекових, є найбільш адаптивними до реальних умов експлуатації, таких як змінна течія, обмежені перепади, або відсутність можливості будівництва гідроспоруд.

Таблиця 7.4

Порівняльна характеристика турбін

Критерій	Осьова турбіна	Шнекова турбіна	Гвинтова, спіралеподібна турбіни
Діапазон робочих напорів, м	2–70	0,5–10	0,2–3
Потреба у греблі або напірній камері	Так	Так, Ні	Так, Ні
Можливість занурення у відкритий потік	Ні	Так	Так
Стійкість до забруднення	Низька	Висока	Середня
Конструктивна складність	Висока	Низька	Висока, Середня
Екологічна безпечність	Обмежена	Так	Так
Габарити для мобільного монтажу	Середні	Великі	Компактні
Можливість серійного виготовлення	Так	Так	Так (3D-друк, лиття, формування корпусу)

Отже, гвинтова та спіралеподібні турбіни, є найбільш перспективними рішеннями для автономного використання в малих гідроустановках, включаючи мікро-ГЕС, системи рекуперації в технічних потоках, а також

об'єкти в умовах обмеженої інфраструктури. Їх ефективність у відкритому потоці, відсутність потреби у греблі, низька вартість реалізації та екологічна безпечність роблять ці конструкції особливо придатними для впровадження у сфері відновлюваної енергетики.

7.6. Рекомендації щодо практичного застосування досліджених турбін

На основі результатів експериментальних досліджень сформульовано низку рекомендацій щодо використання та впровадження розроблених гвинтових і спіралеподібних турбін у малих гідроенергетичних установках. Отримані дані засвідчили їхню високу ефективність в умовах низького напору та змінних параметрів потоку, що робить ці турбіни перспективними для широкого спектра практичного застосування (рис. 7.3).

На рисунку 7.3 узагальнено основні напрямки потенційного використання досліджених турбін у різних сферах. Нижче наведено їх детальний опис:

1. Автономні енергетичні системи.

Турбіни можуть забезпечувати електроенергією віддалені населені пункти, гірські поселення, екопоселення, а також польові станції та гідропости в районах без централізованого енергопостачання. Завдяки високій ефективності роботи при низькому напорі вони є ідеальним рішенням для автономних енергосистем, забезпечуючи стабільне та надійне енергопостачання.

2. Екологічно чиста енергетика на річках.

Ефективність турбін у безнапірних або низьконапірних умовах дозволяє застосовувати їх у екологічно чутливих зонах, де традиційні конструкції неефективні або шкідливі для довкілля. Турбіни не потребують масштабного будівництва дамб і мінімізують вплив на природні екосистеми, що є важливим для збереження біорізноманіття.



Рис. 7.3. Рекомендації щодо практичного застосування досліджених турбін

3. Мікро ГЕС (до 10 кВт).

Ідеальне рішення для сільськогосподарських підприємств, ферм та приватних господарств із доступом до природних водних потоків. Використання таких турбін дозволяє забезпечити локальну електрифікацію та стабільне електропостачання, що особливо актуально в регіонах зі слабкою або нестабільною енергетичною мережею.

4. Навчальні та дослідницькі лабораторії.

Турбіни можуть використовуватись як експериментальні турбіни для досліджень у галузі гідродинаміки, енергоперетворення та оптимізації лопатевих конструкцій. Такі турбіни стануть корисними для вишів, наукових центрів та лабораторій, сприяючи розвитку нових технологій у сфері відновлюваної енергетики.

5. Рекуперація енергії в технічних системах.

Турбіни можуть бути інтегровані у системи водопостачання або каналізації, де є постійний рух води. Це дає змогу генерувати електроенергію без витрат додаткових ресурсів, підвищуючи енергоефективність міської інфраструктури.

6. Модифікація для вітрових установок.

Конструкція спіралеподібних лопатей дозволяє адаптувати турбіни до вітрових умов, особливо для роботи при низькошвидкісному вітрі. Це відкриває можливості для створення гібридних енергетичних систем, де поєднується функціонування у водному та повітряному середовищах.

7. Інтеграція у системи гібридного енергозабезпечення.

Комбінування роботи розроблених турбін із сонячними панелями або акумуляторами може створювати енергоефективні децентралізовані системи, адаптовані для різноманітних умов експлуатації.

8. Спеціальні інженерні системи.

Турбіни можуть бути інтегровані в інженерні системи для створення тиску або розрідження у технологічних процесах. Наприклад, у промисловості, на транспортувальних об'єктах, системах охолодження чи насосних станціях, де є сталі або змінні потоки рідини чи газу.

9. Використання у системах енергетичної рекуперації на транспорті.

Турбіни можуть застосовуватись у технологічних водних або повітряних потоках транспортних систем для часткової генерації електроенергії. Зокрема, можливе їхнє розміщення у гідровузлах водного транспорту, вбудовування у корпус або дах електротранспорту в спеціальні повітроходи, а також інтеграція у вентиляційні тунелі метрополітену. Це дає змогу ефективно

використовувати наявну кінетичну енергію потоків для живлення допоміжних систем або накопичення енергії в акумуляторах.

10. Аварійне енергопостачання.

Розроблені гвинтові та спіралеподібні турбіни можуть бути використані як надійне джерело резервної енергії для об'єктів критичної інфраструктури – таких як насосні станції, медичні заклади, центри зв'язку, водоочисні споруди, склади життєво важливих ресурсів та аварійно-рятувальні пункти. У разі перебоїв із централізованим електропостачанням, ці турбіни здатні оперативно забезпечити базову енергозалежність систем життєзабезпечення.

11. Науково-практичний внесок.

Отримані результати досліджень і випробувань підтверджують високу наукову та практичну цінність розроблених турбін для роботи в складних експлуатаційних умовах. Їх впровадження дозволяє суттєво розширити можливості автономного енергозабезпечення, сприяє розвитку екологічно чистої енергетики, а також підвищенню енергоефективності інфраструктурних і промислових об'єктів. Проведені експерименти закладають наукову базу для модернізації малих гідроустановок, інтеграції гібридних енергетичних систем та створення нових проектних підходів у сфері відновлюваної енергетики, що розширює горизонти їх використання не лише в гідроенергетиці, а й у суміжних інженерних галузях.

Висновки до розділу 7

У ході лабораторних досліджень було проведено всебічну оцінку роботи п'яти конструкцій турбін у водному потоці з метою встановлення їх продуктивності за різних гідравлічних і навантажувальних умов. Отримані результати дозволили сформулювати ключові наукові висновки та практичні рекомендації щодо оптимального використання досліджених конструкцій.

Ключові результати досліджень:

1. Гідравлічна адаптація конструкцій. Встановлено важливість звуження потоку для підвищення точності розрахунку витрати та ефективності енергоперетворення. Застосування поправочного коефіцієнта витрати ($\mu = 0,62$) дозволило узгодити теоретичні та експериментальні результати.

2. Оптимальний напрямок подачі води. Подача потоку під кутом 90° до площини лопатей забезпечує найвищий ККД, що підтверджує важливість орієнтації турбіни при монтажі у відкритому потоці.

3. Вплив напору на ефективність. Експерименти показали майже лінійну залежність ККД і вихідної напруги від рівня напору в діапазоні $h = 0,2\text{--}0,6$ м, особливо за умови правильно спрямованого потоку під кутом 90° .

4. Найкращі результати продемонструвала гвинтова турбіна (турбіна IV), яка продемонструвала найвищу ефективність та стабільність за змінних умов, зокрема при підвищеному електричному навантаженні, що робить її найбільш придатною для практичного застосування.

5. Турбіна зі спіралеподібними лопатями турбіна III_2 рекомендована для умов з обмеженим простором та низьким напором, завдяки простоті виготовлення й надійності в роботі.

6. Стійкість до навантажень. Підвищення електричного навантаження знижує оберти та напругу, проте масивніші конструкції (як у гвинтової турбіни) демонструють кращу стабільність генерації у таких режимах.

7. Більш масивні конструкції демонструють кращу стабільність обертання і ефективніше перетворення енергії потоку в електричну енергію, порівняно з легкими турбінами, які забезпечують швидший старт, але гіршу роботу під навантаженням.

8. Точність і методи вимірювання. Автоматизована система збору даних забезпечила похибку в межах $1\text{--}3\%$, тоді як ручні методи мали до 20% розбіжностей. Це підтверджує необхідність цифрових технологій у гідроенергетичних дослідженнях.

9. Конструктивні чинники ефективності. Геометрія лопатей, маса ротора, напрямок та швидкість потоку є визначальними чинниками ефективності, що має бути враховано при подальшій оптимізації конструкцій.

10. Перспективи застосування в енергетичних системах. Розроблені турбіни доцільно впроваджувати у мікро- та міні-ГЕС, автономних системах енергозабезпечення, установках для рекуперації енергії в інженерних мережах, а також як навчальні стенди у вишах.

11. Науково-практичний потенціал. Проведені дослідження формують основу для подальшої модернізації малих гідроустановок, створення гібридних енергетичних систем, адаптації до нестандартних умов (низький напір, змінна течія) та впровадження нових стандартів проектування турбін в галузі відновлюваної енергетики.

Матеріали розділу опубліковані в роботах [53, 97, 107 – 111].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі досліджено конструктивні особливості та умови роботи турбін шнекового типу, зокрема гвинтових і спіралеподібних турбін, призначених для використання у малих гідроенергетичних системах із низьким напором і змінними параметрами потоку. У межах дослідження враховано актуальні енергетичні виклики, пов'язані з децентралізацією енергозабезпечення, енергетичною кризою та потребою у використанні відновлюваних джерел енергії в Україні. Особливу увагу приділено впливу кута подачі потоку (кута атаки), маси турбіни, геометрії лопатей і гідродинамічних характеристик потоку на ефективність енергоперетворення.

Основні результати дослідження:

1. У межах дослідження було здійснено аналіз гідропотенціалу малих річок України та технічного стану малих гідроелектростанцій, що дало змогу поглибити теоретичні засади розвитку малої гідроенергетики. Визначено рівень енергоефективності існуючих МГЕС, виявлено основні проблеми їхньої експлуатації та обґрунтовано потребу в модернізації. Результати дослідження дозволили уточнити класифікаційні підходи до малих ГЕС, узагальнити параметри їхнього технологічного оснащення та сформулювати рекомендації щодо оптимального вибору обладнання відповідно до умов експлуатації. Це створює науково-практичну основу для підвищення ефективності використання доступного гідроенергетичного ресурсу в Україні та формує напрям подальших досліджень у сфері модернізації агрегатів МГЕС.

2. Результати дослідження технологічних рішень, запропонованих провідними виробниками та винахідниками, дозволили виявити конструктивні недоліки сучасних гідротурбін, що стало підґрунтям для формування інженерних рекомендацій із їх модернізації та підвищення ефективності роботи малих ГЕС. Особливу увагу приділено адаптації конструкцій до природних гідродинамічних умов, зокрема застосуванню

ефекту внутрішнього завихрення потоку для покращення енергетичного перетворення. На основі проведеного аналізу розроблено інженерну модель турбіни з оптимізованими параметрами, яка забезпечує зниження енергетичних втрат і підвищення загальної продуктивності установки. Запропоновані технічні рішення можуть бути інтегровані в сучасні стратегії реконструкції малих гідроелектростанцій, сприяючи більш раціональному й ефективному використанню гідроресурсів.

3. Запропоновані й запатентовані в межах одного патенту на корисну модель конструкції трьох типів спіралеподібних турбін реалізують єдиний принцип дії, який забезпечує поступове стискання та прискорення потоку з ефективним перетворенням його кінетичної енергії в механічну. Кожна конструкція має індивідуальні геометричні та функціональні особливості, що дозволяють адаптувати її до різних умов експлуатації – від слабонапірних течій до середовищ зі змінними гідродинамічними характеристиками.

Застосування різних профілів лопатей сприяє рівномірному розподілу навантаження, а інтеграція маховикової функції корпусу забезпечує згладження енергетичних пульсацій, зниження стартової швидкості обертання та стабільність динамічної відповіді турбіни на змінне навантаження. Завдяки поєднанню цих конструктивних рішень досягнуто поліпшення умов енергетичного перетворення та створено передумови для практичного використання таких турбін в автономних гідроенергетичних системах, установках малої потужності та при модернізації наявних гідротехнічних об'єктів.

4. У межах наукового дослідження було модернізовано лабораторну установку шляхом інтеграції випробувального модуля, що забезпечує комплексне тестування турбін в умовах змінних гідродинамічних і електричних параметрів. Це дозволило проводити всебічну оцінку ефективності турбін у режимах роботи з водним і повітряним потоками під навантаженням. З метою підвищення точності вимірювань та достовірності отриманих результатів установка була дооснащена сучасними

вимірювальними приладами, зокрема лазерним тахометром для визначення частоти обертання ротора, мультиметром для реєстрації рівня згенерованої напруги, а також автоматизованою системою збору та обробки даних SCADA (Система диспетчерського керування та збору даних), що забезпечила безперервний моніторинг параметрів та архівацію даних у реальному часі. Проведена модернізація суттєво розширила експериментальні можливості установки, дозволяючи більш глибоко та об'єктивно аналізувати роботу турбін у визначеному діапазоні експлуатаційних умов.

5.3 метою підвищення точності досліджень та моделювання реальних експлуатаційних режимів роботи турбін розроблено спеціалізований пристрій для спрямування водного потоку під заданим кутом до площини лопатей. Зокрема, конструкція забезпечує подачу потоку під прямим кутом 90° , що суттєво відрізняється від базової конфігурації лабораторної установки без пристрою, в якій обтікання здійснюється під кутом близько 45° , типового для природних умов. Ключовою конструктивною особливістю пристрою є збільшений вхідний діаметр та поступове звуження поперечного перерізу до виходу, що забезпечує ефект додаткового стискання потоку й підвищує його лінійну швидкість безпосередньо перед взаємодією з робочими органами турбіни. Впровадження такого технічного рішення дозволило реалізувати змінні умови подачі потоку в лабораторній установці, що стало підґрунтям для проведення порівняльного дослідження ефективності роботи турбін за різних кутів атаки. Встановлено, що орієнтація потоку суттєво впливає на динаміку запуску, стабільність обертання ротора та інтенсивність електрогенерації. Зокрема, змінюється характер навантаження на лопаті, що в підсумку визначає загальну енергетичну продуктивність установки.

Отримані результати слугують базою для подальшої оптимізації геометричних параметрів спрямовуючих пристроїв та вдосконалення схем підведення води до робочих елементів турбіни з урахуванням особливостей гідродинаміки малих водотоків.

6. Розвиток науково-прикладних засад експериментального випробування спіралеподібних турбін шнекового типу в повітряному потоці полягав у встановленні кількісної залежності ефективності їхньої роботи від параметрів повітряного середовища, насамперед тиску, а також у виявленні конструктивних рішень, здатних адаптуватися до змінної аеродинаміки. У лабораторних умовах з використанням компресорного обладнання проведено серію випробувань трьох типів турбін за регульованого тиску стисненого повітря (2, 4, 6 атм). Результати експериментів засвідчили відмінності в показниках енергетичної ефективності між дослідженими турбінами. Так, турбіна з будовою лопатей за принципом золотої спіралі (I), виявила найнижчу стабільність, при 2 та 4 атм генератор зупинявся під навантаженням, а при 6 атм напруга падала до 2В, що свідчить про турбулентні втрати та неефективний розподіл тиску. Турбіна з спіралеподібними лопатями зі зростаючим об'ємом (II), демонструвала роботу при 6 атм із напругою 2,4В, але показала недостатню адаптивність при зниженому тиску. Найкращі результати зафіксовано у турбіни зі спіралеподібними лопатями та звуженням корпусу (III₁): напруга в режимі холостого ходу становила 8,1В, а під навантаженням – 4,3В, що відповідно на 44% і 115% перевищувало результати турбіни I.

Отримані результати підтвердили високий потенціал окремих конструкцій до ефективної роботи за змінного тиску та дали змогу ідентифікувати ключові геометричні параметри, що визначають стабільність обертання та рівень генерації енергії. Вони формують основу для подальшого вдосконалення турбін шнекового типу, орієнтованих на застосування в нестабільних повітряних і водних потоках.

7. Проведені експериментальні випробування спіралеподібних турбін у повітряному потоці засвідчили суттєвий вплив параметрів потоку, насамперед тиску, на продуктивність установок і рівень генерації напруги. Удосконалена методика порівняльного аналізу експериментальних даних забезпечила об'єктивну оцінку ефективності різних конструкцій і дала змогу

сформулювати науково обґрунтовані рекомендації для подальшої оптимізації. Встановлено, що зміна геометрії лопатей істотно впливає на стабільність обертання ротора, рівень електрогенерації та адаптивність турбіни до змін аеродинамічних умов, що є критично важливим для ефективної роботи в нестабільному повітряному середовищі. Ключовими напрямками вдосконалення конструкцій визначено утворення виїмок у зоні з'єднання лопатей із корпусом для зниження локальних турбулентних втрат, збільшення маси корпусу для реалізації маховикового ефекту й стабілізації обертального руху, а також впровадження конструктивного звуження каналу потоку для концентрації енергії й зменшення гідродинамічного опору. Зазначені технічні рішення формують базу для подальшого розвитку ефективних конструкцій турбін, здатних працювати в умовах змінного повітряного та водного потоку.

8. Проведені дослідження в умовах повітряного потоку з урахуванням рекомендацій щодо вдосконалення спіралеподібних турбін дозволили створити конструкцію удосконаленої гвинтової турбіни, адаптованої до експлуатації в умовах змінного електричного навантаження та варіативного напору. Ключовими інженерними рішеннями стали збільшення маси корпусу для реалізації маховикового ефекту та впровадження криволінійних заокруглень у зоні з'єднання лопатей із корпусом з метою зниження гідродинамічного опору та впровадження конструктивного звуження каналу потоку, що забезпечило підвищену стабільність обертання ротора та покращене енергетичне перетворення. Розробка супроводжується повним комплектом конструкторської документації й уже захищена патентом України на корисну модель (№ 156567), що відкриває перспективи її впровадження у проектах малої гідроенергетики, автономного енергозабезпечення та сучасних систем енергоефективного проектування.

9. Проведені дослідження турбін із різною вагою у водному потоці при куті подачі 45° до лопатей підтвердили істотний вплив маси на стабільність роботи установок, їхню взаємодію з потоком та рівень генерації електроенергії. Легші конструкції демонструють швидший запуск, проте

мають нижчу ефективність у режимах підвищеного навантаження. Натомість більш масивні турбіни забезпечують стабільніше обертання, вищий момент інерції та ефективніше перетворення кінетичної енергії потоку в електричну енергію навіть за змінних умов експлуатації.

Отримані результати дозволяють сформулювати рекомендації щодо оптимального балансу маси, відповідно до яких для коректного проведення наступних досліджень та визначення ефективності роботи турбін за умови приведення маси всіх турбін до рівня найважчої конструкції.

10. Проведені експериментальні дослідження турбін за поєднаних умов (однакова маса моделей, кути подачі потоку 45° і 90°) дозволили об'єктивно порівняти їхню ефективність. Встановлено, що подача потоку під кутом 90° сприяє зменшенню енергетичних втрат, стабілізації обертання та підвищенню коефіцієнта перетворення кінетичної енергії навіть за умов підвищеного навантаження. Навпаки, при куті 45° спостерігається зниження ефективності, особливо у режимах максимального навантаження. Крім того, підтверджено позитивний вплив підвищення напору на продуктивність турбін.

11. Результати комплексного аналізу впливу напору на витрату води, рівень генерації напруги та коефіцієнт корисної дії спіралеподібних турбін шнекового типу з урахуванням кута подачі потоку, електричного навантаження та маси конструкцій дозволили виявити низку важливих закономірностей. Встановлено, що підвищення напору в межах $0,2 - 0,6$ м зумовлює майже лінійне зростання як вихідної напруги, так і ККД, причому подача потоку під кутом 90° забезпечує в середньому на $30 - 45\%$ вищу ефективність енергетичного перетворення порівняно з кутом 45° . За результатами порівняльних випробувань п'яти експериментальних турбін шнекового типу при максимальному навантаженні ($P_4 = 63$ Вт, $R = 82,29$ Ом) найвищі показники енергетичної ефективності продемонструвала гвинтова турбіна при фронтальній подачі потоку (90°) вона забезпечила генерацію напруги до $20,3$ В і досягла ККД $0,89$ при витраті $Q = 0,107$ м³/с. Високу стабільність обертання в умовах змінного електричного навантаження також

продемонструвала спіралеподібна турбіна зі звуженим у напрямку потоку корпусом, яка забезпечила вихідну напругу 16,9 В і ККД 0,63 при аналогічній витраті. Найнижчу ефективність зафіксовано у класичній шнекової турбіни – 14,5 В і ККД 0,53, що, незважаючи на найвищу витрату $Q = 0,151 \text{ м}^3/\text{с}$ (внаслідок відсутності зовнішнього корпусу та збільшеної площі проходження потоку), не забезпечила пропорційного приросту енергетичних показників.

12. На основі отриманих експериментальних результатів було сформовано науково обґрунтовані рекомендації щодо практичного застосування гвинтових і спіралеподібних турбін шнекового типу у малих гідроенергетичних установках, з урахуванням їхніх технічних та експлуатаційних особливостей. Набуло подальшого розвитку обґрунтування доцільності їхнього використання в умовах низького напору, змінного електричного навантаження та нестабільних гідродинамічних режимів.

Зокрема, доведено ефективність застосування цих турбін у таких сферах, як автономне енергозабезпечення, екологічно чиста енергетика на річках, мікро - ГЕС, системи рекуперації енергії, гібридні енергетичні комплекси, аварійне енергопостачання та наукові дослідження. Конструктивна адаптивність турбін до роботи як у водному, так і в повітряному середовищі, відкриває широкі перспективи для їхньої інтеграції в інфраструктурні, мобільні та промислові системи.

Узагальнюючи результати дослідження, слід підкреслити, що дисертаційна робота спрямована на вдосконалення умов роботи та конструктивних рішень гідравлічних турбін шнекового типу, з урахуванням специфіки функціонування малих гідроелектростанцій у змінних гідродинамічних і енергетичних умовах.

На початковому етапі було проведено випробування запатентованих конструкцій спіралеподібних турбін у повітряному потоці. Результати експериментів дозволили виявити конструктивні недоліки окремих модифікацій турбін. Усунення виявлених проблем стало підґрунтям для створення вдосконаленої гвинтової турбіни з конструктивними виїмками в

зоні з'єднання лопатей із корпусом, який звужується у напрямку потоку, що була оформлена окремим патентом України на корисну модель.

На наступному етапі виконано експериментальні дослідження всіх типів шнекових турбін у водному середовищі. З метою забезпечення об'єктивного порівняльного аналізу до випробувань було залучено класичну шнекову турбіну, виготовлену як контрольний зразок. Отримані результати підтвердили переваги вдосконалених конструкцій як гвинтової, так і спіралеподібної турбіни за умов змінного гідростатичного напору, електричного навантаження та варіативної орієнтації потоку.

Модернізація лабораторної установки шляхом впровадження випробувального модуля, пристрою для зміни напрямку потоку та інтеграції системи SCADA, яка забезпечила високу точність вимірювань, автоматизований збір і обробку експериментальних даних у реальному часі. Це суттєво підвищило достовірність отриманих результатів та дало змогу встановити кількісні залежності між конструктивними параметрами турбін, гідродинамічними умовами та показниками їх енергетичної ефективності.

Результати роботи поглиблюють науково-прикладні основи проектування гідравлічних турбін шнекового типу, підтверджують доцільність застосування адаптивних конструкцій в умовах малих напорів і нестабільних потоків та створюють інженерно-методичну основу для модернізації малих гідроелектростанцій, автономного енергозабезпечення, а також впровадження новітніх технічних рішень у сфері відновлюваної енергетики.

Таким чином, дисертаційна робота не лише підтвердила високий потенціал розроблених конструкцій для використання у малих ГЕС, а й забезпечила науково обґрунтовану платформу для подальшого вдосконалення гідротехнічного обладнання шнекового типу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Суходоля О. М., Сидоренко А. А., Бегун С. В., Білуха А. А. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку гідроенергетики України : аналіт. доп. К. : НІСД, (Сер. «Національна безпека», вип. 8), 2014. 112 с. URL: <https://surl.li/kvdryk> (дата звернення: 08.12.2021).
2. Ясинский В. А., Винокуров Е. Ю., Байбикова Э. Р. Современное состояние и перспективы развития малой гидроэнергетики в странах СНГ. Алматы, 2016. 36 с.
3. Кенсицький О. Г., Карамушка О. М., Бондаренко Ю. М., Васько П. Ф. Гідроенергетика України : наук. журн. / ПрАТ «Укренерго», Ін-т електродинаміки НАН України, ПАТ «Укргідропроект», ЗАТ АК «ЕНПАСЕЛЕКТРО». Вишгород, 2021. Том 1–2. ISSN 1812-9277.
4. Рябенко О. А. Гідроелектростанції в особливих природно-кліматичних умовах : підручник. Рівне : НУВГП, 2024. 192 с.
5. Industrial Development Organization; International Center on Small Hydro Power. 2019. 96 p. URL: <http://surl.li/rcuijd> (дата звернення: 08.12.2021).
6. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 82 с.
7. Рябенко О. А., Галич О. О., Сунічук С. В., Тимощук В. С., Філіпович Ю. Ю., Герба О. В. Розділ 24. Гідроенергетичний потенціал малих річок Українського полісся. С. 566–596. *Підвищення ресурсного потенціалу Українського Полісся* : монографія / за ред. д.т.н., проф., акад. НААН В. А. Сташука, д.с.-г.н., проф. В. С. Мошинського, д.т.н., проф. А. М. Рокочинського та ін. Рівне : НУВГП, 2024. 792 с. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/30397/3/Monografiya_Polissya_%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80_3-482-792.pdf (дата звернення: 15.10.2024).
8. Відновлювані джерела енергії / за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.

9. Halych O., Bilkova E., Nowak P., Riabenko O. Analysis of Hydropotential and Prospects for Small Hydropower Development in Ukraine. *Environmental and Climate Technologies*. 2023. Vol. 27, no. 1. P. 763–774. URL: <https://doi.org/10.2478/rtuct-2023-0056> (дата звернення: 15.10.2024).

10. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України. *Аналітичний огляд*. Київ, 2018. Т. I. 181 с.

11. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. Київ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p#Text> (дата звернення: 02.03.2022).

12. Філіпович Ю. Ю. Енергоресурси та гідрологічні основи гідроенергетики. Практикум : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2013. 196 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/3708/> (дата звернення: 11.05.2022).

13. *Об'єкти відновлювальних джерел енергії* : вебсайт. URL: <https://www.energo.ua/ua/> (дата звернення: 01.03.2023).

14. Енергоефективність та напрями самоенергозабезпечення регіонів на прикладі Житомирської області / за ред. М. П. Ковалка. Київ : Видавництво «Українські енциклопедичні знання», 2000. 118 с.

15. *Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року* : вебсайт. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/KR140902?an=11> (дата звернення: 01.03.2023).

16. *Енергетична стратегія України на період до 2030 р.* : вебсайт. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13#Text> (дата звернення: 01.03.2023).

17. Шевченко В. В., Петренко М. Я., Шевченко О. С. «Зелений тариф» в електроенергетиці України. Соціальна справедливість, економіка та міжнародне право. *Новітні технології в освіті, науці та виробництві* : зб. матеріалів II МНТК. Покровськ : ДВНЗ «ДонНТУ», 2020. С. 71–74. URL: <https://zenodo.org/records/3950361#.YMScAvn7SLI> (дата звернення: 01.03.2023).

02.03.2023).

18. Касіч Ю. Енергетична децентралізація – розосереджена генерація. Energy club / blog. URL: <https://iclub.energy/blog/yurij-kasich/tpost/fyz5ufdeg1-energetichna-detsentralzatsya-rozoseredz> (дата звернення: 01.24.2023).

19. Алсахов А. Б. Відновлювана енергетика. 2-ге вид., перероб. і доп. М. : ФІЗМАТЛІТ, 2012. 256 с.

20. Гидроэлектростанции малой мощности : учеб. пособие / под. ред. В. В. Елистратова. СПб. : изд-во Политехн. ун-та, 2005. 432 с.

21. Мала гідроенергетика України. *Аналітичний огляд.* / Інститут проблем екології та енергозбереження. Київ, 2018. Том I.

22. Картанбаев Б. А., Жумадилов К. А., Зазульский А. А. Руководство по строительству и эксплуатации микро гидроэлектростанций (микро ГЭС) / Б. : «ДЭМИ», 2011. 57 с.

23. Малая гидроэнергетика / Л. П. Михайлов, Б. Н. Фельдман, Т. К. Марканова и др. ; под ред. Л. П. Михайлова. М. : Энергоатомиздат, 1989. 184 с.

24. Гідравлічна турбіна. Вікіпедія – вільна енциклопедія. URL: <http://surl.li/vakmdo> (дата звернення: 08.12.2021).

25. Парлит В. В. Гидравлические турбины. М., 1987. 328 с.

26. Мала гідроенергетика України. *Аналітичний огляд.* / Інститут проблем екології та енергозбереження. Київ, 2018. Том II.

27. *Andritz AG* : вебсайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Andritz_AG (дата звернення: 10.03.2023).

28. *The Big Difference Fish-Friendly Designs by ANDRITZ HYDRO* : вебсайт. URL: <https://www.andritz.com/hydro-en/hydronews/hn31/fish-friendly-designs> (дата звернення: 10.03.2023).

29. *Mavel* : вебсайт. URL: <https://www.mavel.cz> (дата звернення: 10.03.2023).

30. *Mavel Francis Turbine Range* : вебсайт. URL: <https://mavel.cz/turbines/francis/> (дата звернення: 10.03.2023).

31. *Elektrownia Wodna Oława II* : вебсайт. URL: https://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrownia_Wodna_O%C5%82awa_II (дата звернення: 10.03.2023).
32. *Wtw* : вебсайт. URL: <https://www.wtw-poland.com/pl/> (дата звернення : 10.03.2023).
33. *Предложение турбоагрегатов производства WTW Poland sp.zo.o.* : вебсайт. URL: <https://www.wtw-poland.com/ru/predlozhenie> (дата звернення: 11.03.2023).
34. Schauburger V. Вікіпедія – вільна енциклопедія. URL: <http://surl.li/ykbzoz> (дата звернення: 11.03.2023).
35. Schauburger V. *The Energy Evolution: Harnessing Free Energy from Nature*. Gateway, 2000. 272 с.
36. *Біологічний вакуум – оптимальна рушійна сила для машин* : вебсайт. URL: <https://svpwiki.com/The-Biological-Vacuum-The-Optimal-Driving-Force-for-Machines> (дата звернення: 11.03.2023).
37. Онішко О. Ф. Вікіпедія – вільна енциклопедія. URL: <http://surl.li/htcwif> (дата звернення: 11.03.2023).
38. Курс лекцій з дисципліни: «Фізико-технологічні основи перетворення сонячної енергії» / укладачі А. С. Опанасюк, О. А. Доброжан. Суми : Сумський державний університет, 2022. 223 с.
39. *Ротор Онішко в Україні* : вебсайт. URL: <http://savenergy.info/page/rotor-onipko-v-ukraine/> (дата звернення: 11.03.2023).
40. Умбетов Е. С., Шоколакова Ш. К. Аналіз класифікації конструкцій мікро-ГЕС. / Алматинський університет енергетики та зв'язку. Алмати : Казахстан, 2014. 5 с. URL: <http://cawater-info.net/bk/dam-safety/files/umbetov-shokolakova.pdf> (дата звернення: 11.03.2023).
41. Шнекова турбіна. Вікіпедія – вільна енциклопедія. URL: <http://surl.li/mzqzng> (дата звернення: 11.03.2023).
42. *Princip šnekové turbíny* : вебсайт. URL: <http://www.gess.cz/products/snekove-turbiny> (дата звернення: 18.03.2023).

43. Gess : вебсайт. URL: <https://www.gess.cz> (дата звернення: 18.03.2023).
44. Гвинтова шнекова гідротурбіна гідроелектростанція міні/мікро ГЕС : вебсайт. URL: <https://flagma.ua/vintovaya-shnekovaya-gidroturbina-o4183872.html> (дата звернення: 18.03.2023).
45. Герба О. В. Визначення оптимальних параметрів турбіни зі спіралеподібними лопатями для малих гідроелектростанцій. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки* : зб. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти (м. Рівне, Україна, 11–12 травня 2023 року). Рівне : НУВГП, 2023. 763 с. С. 19–21.
46. Герба О. В. Експериментальні дослідження моделей турбін малих гідроелектростанцій. *Modeling, control and information technologies : Proceedings of VII International scientific and practical conference*. 7–9 листопада 2024 року, м. Рівне, НУВГП, Україна. 2024. № 7. 365 с. С. 91–94. DOI: <https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.024> (дата звернення: 10.09.2024).
47. Пильов В. В. Парові та газові турбіни. НТУ «ХП», 2023. 5 с. URL: https://web.kpi.kharkov.ua/teplo/wp-content/uploads/sites/62/2024/08/23Parovi-ta-gazovi-turbini_2023.pdf (дата звернення: 18.03.2023).
48. Абрамчук Ф. І., Гутаревич Ю. Ф., Долганов К. Є., Тимченко І. І. Автомобільні двигуни : підручник. К. : Арістей, 2006. 476 с. ISBN 966-8458-26-5.
49. Кисликов В. Ф., Луцик В. В. Будова й експлуатація автомобілів : підручник. 6-те вид.— К.: Либідь, 2006. 400 с. ISBN 966-06-0416-5.
50. Сирота В. І. Основи конструкції автомобілів : навч. посіб. для вузів. К. : Арістей, 2005. 280 с. ISBN 966-8458-45-1.
51. Бриль А. О., Васько П. Ф., Кромпляс Б. А. Енергетична ефективність радіально-осьових гідротурбін малої потужності за змінних витрат води. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті* : XXIII міжнародна науково-практична онлайн-конференція 19–20 травня 2022 / Інститут відновлюваної енергетики НАН України. С. 225–227 URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/1231e378-a69f-4221-b504->

[8d125e58be39/content](https://doi.org/10.1016/j.scitech.2023.04.004) (дата звернення: 27.04.2023).

52. Ліньяролоа Л., Рагнія Д., Крішнасваміа Ч., Ченаб К., Феррейра С. Експериментальний аналіз сліду моделі вігрової турбіни з горизонтальною віссю. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148114000494> (дата звернення: 27.04.2023).

53. Турбіна зі спіралеподібними лопатями: пат. 150304 Україна: МПК F03D1/00. № u202104720; заявл. 17.08.2021; опубл. 26.01.2022, Бюл. № 4. 4 с. (Герба О. В.).

54. Meherwan P. Gas Turbine Engineering Handbook. This handbook offers a detailed overview of gas turbine engineering, including design, construction, and operational aspects. Houston, Texas, 2020 799 p. URL: <https://soaneemrana.org/onewebmedia/GAS%20TURBINE%20ENGINEERING%20HAND%20BOOK%20BY%20MEHERWAN%20P.%20BOYCE%20%282nd%20Edition%29.pdf> (дата звернення: 27.04.2023).

55. Ganvir K., Bomble P., Bagde A., Chavhan A., Gajbhiye R., Chakole A. Design and Analysis of Spiral Wind Turbine with Various Wind Speed. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. Mar 2022. Vol. 09, Issue: 03. 5 p. URL: https://www.academia.edu/84954116/Design_and_Analysis_of_Spiral_Wind_Turbine_with_Various_Wind_Speed (дата звернення: 27.04.2023).

56. Nagy M., Cowell S., Beiu V. On the Construction of 3D Fibonacci Spirals. *Mathematics*. 2024. Vol. 12(2). P. 201. URL: <https://doi.org/10.3390/math12020201> (дата звернення: 27.04.2023).

57. Watanabe E., Tanaka Y. etc. Development of new high efficiency steam turbine. *Mitsubishi Heavy Industries. Ltd. Technical Review*. Aug., 2003. Vol. 40, No. 4.

58. Шевцов В. Л. Досвід ВАТ «Турбоатом» у створенні та вдосконаленні енергозберігаючого обладнання для теплових та атомних електростанцій. *Енергетичні й теплотехнічні процеси та обладнання*. НТУ ХПІ, 2006. № 5. С. 6–11.

59. White F. M. Fluid Mechanics. 9th Edition. McGraw-Hill Education, 2016. 864 p.
60. Munson B. R., Young D. F., Okiishi T. H. Fundamentals of Fluid Mechanics. 8th Edition. Wiley, 2017. 816 p.
61. Çengel Y. A., Cimbala J. M. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. 4th Edition. McGraw-Hill Education, 2018. 992 p.
62. Рябенко О. А. Хвилястий стрибок : монографія. Рівне : НУВГП, 2022. 277 с.
63. Рябенко О. А., Сунічук С. В., Галич О. О., Зайчук Р. М. Науково-технічний супровід експлуатації ГТС ГЕС Дніпровського та Дністровського каскадів : звіт з науково -дослідної роботи № 1504/24; № 2–179. 65 с.
64. Послуги з розроблення методики для забезпечення вимірювання дренажних витрат на кожному водовипуску правобережної та лівобережної земляної греблі при наявності підтоплення водомірів зі сторони НБ для філії «Канівська ГЕС» : звіт з науково-дослідної роботи № 2–167 (заклучний). Рівне : НУВГП, 2021. 72 с.
65. *Description of Ultrasonic sensor UB800-18GM40-I-V1* : вебсайт. URL: <http://surl.li/yrzydu> (дата звернення: 27.04.2023).
66. Рябенко О. А., Галич О. О. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Методи та прилади візуалізації течії» студентами спеціальності 145 «Гідроенергетика» усіх форм навчання. Рівне : НУВГП, 2017. 37 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/8043/1/01-06-27.pdf> (дата звернення: 28.04.2023).
67. Науменко І. І. Гідравліка : підручник для студ. вищ. навч. закл. НУВГП. 2-ге вид., переробл. та доп. Рівне, 2005. 475 с.
68. *Description of Ultrasonic sensor UB800-18GM40-I-V1* : вебсайт. URL: <http://surl.li/yrzydu> (дата звернення: 28.04.2023).
69. Сафоник А. П., Таргоній І. М., Пилипенко В. М.. Розробка системи моніторингу та контролю процесу відведення фільтраційних вод від земляних гребель. МСІТ-2024. Моделювання, керування та інформаційні технології :

VII Міжнародна науково-практична конференція 7–9.11.2024, м. Рівне. URL: [DOI:10.31713/MCIT.2024.112](https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.112). (дата звернення: 26.11.2024).

70. Safonyk A., Tarhoni I., Burduk A., Batako A. Modelling and automation of a process for obtaining coagulum in treatment of industrial. *Journal of Physics : Conference Series*. 2022. 2198. 012021. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2198/1/012058/pdf> (дата звернення: 26.11.2024).

71. Letcher T. Comprehensive Renewable Energy. 2nd Edition. February 22, 2022. 5196 p. URL: <https://shop.elsevier.com/books/comprehensive-renewable-energy/letcher/978-0-12-819727-1> (дата звернення: 07.05.2023).

72. Білецький В. С., Бойко В. С., Букін С. Л., Гайко Г. І., Дриженко А. Ю. Мала гірнича енциклопедія : у 3 т. / за ред. В. С. Білецького. Д. : Донбас, 2004. Т. 1 : А–К. 640 с.

73. Федорець В. О., Педченко М. Н., Федорець О. О. Технічна гідромеханіка. Гідравліка та гідропневмопривод : підручник. Житомир : ЖІТІ, 1998. 412 с.

74. Навроцький Б., Сухін Є. Механіка рідин : підруч. для техн. вузів. К. : ДІА, 2003. 416 с.

75. Гідравліка та гідропривод: збірник задач і вправ : навч. посіб. / Возняк Л. В., Гімер Р. Ф., Гімер П. Р. та ін. Івано-Франківськ : Факел, 2018. 283 с.

76. Луценко В. В. Технічна механіка рідини і газу в тестах і задачах : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2015. 194 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/4033/1/V21.pdf> (дата звернення: 07.05.2023).

77. Ратушний О. В., Гусак О. Г. Гідравліка : підручник. 2-ге вид., перероб. Суми : Сумський державний університет, 2022. 251 с.

78. Павленко О. В. Витікання рідини через отвори і насадки : текст лекції навчальної дисципліни «Гідравліка та гідропневмопристрої авіаційної техніки». Харків : ХНУВС, 2021. 15 с. URL: <https://nm2.univd.edu.ua/download/143103> (дата звернення: 07.05.2023).

79. *Free Software Never Looked This Awesome Blender* : вебсайт. URL: <https://www.blender.org/features/> (дата звернення: 21.05.2023).
80. *Характеристики 3D принтера Anycubic Kobra Max* : вебсайт. URL: <https://ua.anycubic.biz/anycubic-kobra-max> (дата звернення: 21.05.2023).
81. *Верстати балансувальні компанії VTM GROUP* : вебсайт. URL: <https://shvp.com.ua/ua/category/stanki-balansirovochnye-universalnye/> (дата звернення: 21.05.2023).
82. Paziani S. Magnetic field sensors (Hall generators) Quantum Design. Roma Italy, 2020. URL: https://www.qdindustria.it/wp-content/uploads/2020/07/Magnetic_field_sensors_Hall_generators.pdf (дата звернення: 21.05.2023).
83. Кобус А., Тушинський Я. Датчики Холла і магнітрезистори. Ріпол Класік, 1971. 352 с.
84. Возняк О. Т. Планування експерименту та оптимізація вирішень вентиляційної техніки : монографія. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. 220 с.
85. Пинчук С. И. Организация эксперимента при моделировании и оптимизации технических систем : учебное пособие. Днепропетровск : Дива, 2008. 48 с.
86. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М. : Наука, 1976. 296 с.
87. Протодьяконов М. М., Тедер Р. И. Методика рационального планирования экспериментов. М. : Наука, 1970. 76 с.
88. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента / перевод с англ. М. : Мир, 1967. 406 с.
89. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Canada, 1999. 823 p. URL: https://cdn.preterhuman.net/texts/science_and_technology/artificial_intelligence/Neural%20Networks%20-%20A%20Comprehensive%20Foundation%20-%20Simon%20Haykin.pdf (дата звернення: 30.05.2023).

90. Fausett L. Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications. 1994. 476 p. URL: [https://dl.matlabiyar.com/siavash/Neural%20Network/Book/Fausett%20L.-Fundamentals%20of%20Neural%20Networks %20Architectures,%20Algorithms,%20and%20Applications%20\(1994\).pdf](https://dl.matlabiyar.com/siavash/Neural%20Network/Book/Fausett%20L.-Fundamentals%20of%20Neural%20Networks%20Architectures,%20Algorithms,%20and%20Applications%20(1994).pdf) (дата звернення: 30.05.2023).
91. Nyquist H. Regeneration Theory. *Bell System Technical Journal*. 1932. Pp. 126–147. URL: <https://dn790004.ca.archive.org/0/items/bstj11-1-126/bstj11-1-126.pdf> (дата звернення: 30.05.2023).
92. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*. 1948. P. 379–423. URL: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x> (дата звернення: 30.05.2023).
93. Rumelhart D. E., Hinton G. E., & Williams R. J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*. 1986. Pp. 533–536. URL: <https://gwern.net/doc/ai/nn/1986-rumelhart-2.pdf> (дата звернення: 30.05.2023).
94. Герба О. В. Використання турбін зі спіралеподібними лопатями. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки : зб. наук. праць*. 2023. Вип. 4(104). 163 с. С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt420231> (дата звернення: 07.02.2024).
95. *Махове колесо* : Вікіпедія – вільна енциклопедія. URL: <http://surl.li/reayii> (дата звернення: 15.12.2023).
96. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. Изд. 2-е, випр. Наука, 1965. Том 1. 204 с.
97. Турбіна гвинтового типу: пат. 156567 Україна: МПК F03D1/00, F03D9/00. № u202400504; заявл. 30.01.2024; опубл. 10.07.2024, Бюл. № 28. 4 с. (Герба О. В., Клюха О. О.).
98. Спінул Л. Ю., Бурик М. П., Лободзинський В. Ю. Білецький О. О. Теоретичні основи електротехніки : навч. посіб. / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. Частина 2. 167 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/9c9e530c-62dd-4a40-bda6-e4ba751620f9/content> (дата звернення: 15.02.2024).
99. Засєкіна Т. М., Засєкін Д. О. Фізика : підруч. для 8 кл.

загальноосвіт. навч. закладів. К. : УОВЦ «Оріон», 2016. 256 с.

100. Карлов О. М., Кондратенко І. П., Кришук Р. С., Ращепкін А. П. Енергетичні показники торцевих дугостаторних асинхронних двигунів з біметалевими дисковими роторами : праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2017. № 48. 132 с. URL: <https://prc.ied.org.ua/index.php/proceedings/issue/view/18/22> (дата звернення: 15.02.2024).

101. Артюх С. Ф., Червоненко І. І., Система регулювання оптимального ккд гідроагрегатів, що працюють зі змінними напорами. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2013. № 6. С. 68–70. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/28059f9c-42c1-4294-b332-80fef7b77114/content> (дата звернення: 21.02.2024).

102. Aihara J., Aoki T., Fukaya Y., Goto M. High Temperature Gas-Cooled Reactors. *R&D on commercial high temperature gas-cooled reactor*. 2021. Vol. 5 in JSME Series in Thermal and Nuclear Power Generation. P. 313–450. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821031-4.00005-1> (дата звернення: 21.02.2024).

103. Герба О. В. Експериментальні дослідження моделей турбін малих гідроелектростанцій. *Моделювання, керування та інформаційні технології : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Рівне, Україна, 7–9 листопада 2024 року)*. Рівне : НУВГП, 2024. 367 с. С. 91–94. DOI: <https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.024> (дата звернення: 10.01.2025).

104. Герба О. В. Лабораторні дослідження моделей турбін для малих гідроелектростанцій у водному потоці під кутом 90° до лопатей. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки : зб. наук. праць*. 2024. Вип. 4(108). С. 47–58. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt420246> (дата звернення: 10.01.2025).

105. Герба О. В. Дослідження енергетичних характеристик спіралеподібних турбін для систем охолодження ядерних установок. *Технічні науки та технології : наук. журнал*. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. № 4(38). 366 с. С. 359–366. DOI: <https://doi.org/10.25140/2411-5363->

[2024-4\(38\)-359-366](#) (дата звернення: 10.01.2025).

106. Герба О. В. Турбіни гвинтового типу. *Інновації у будівництві енергетичних установок* : зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. Харків : УкрДУЗТ, 2025. Вип. № 211. С. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327108> (дата звернення: 10.03.2025).

107. Бахрушин В. Є. Методи аналізу даних : навч. посіб. для студентів. Запоріжжя : КПУ, 2011. 268 с.

108. Гусак О. Г., Шарапов С. О., Ратушний О. В. Гідрогазодинаміка : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2022. 296 с.

109. Герасімов Г. Г. Виготовлення гідротурбінного обладнання ГЕС : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2016. 331 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/4735/1/V51.pdf> (дата звернення: 10.03.2025).

110. TI-UP Enquiry. Micro-Hydropower – Low Head Turbines. Practical Action, UK Department for International Development. 2009. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/57a08b3bed915d3cfd000bfa/TI_UP_HD_Oct2009_Micro_Hydro_Low_Head_Turbines.pdf (дата звернення: 10.03.2025).

111. UNIDO ITPO Tokyo. Spiral Water Turbine. Technology Database. 2022. URL: https://itpo-tokyo.unido.org/en/technology_db/5276/ (дата звернення: 10.03.2025).

ДОДАТКИ

Додаток А. Список опублікованих праць за темою дисертації

Монографії, розділи в монографіях:

1. Рябенко О. А., Галич О. О., Сунічук С. В., Тимощук В. С., Філіпович Ю. Ю., Герба О. В. Розділ 24. Гідроенергетичний потенціал малих річок Українського полісся. *Підвищення ресурсного потенціалу Українського Полісся* : монографія / за ред. д.т.н., проф., акад. НААН В. А. Сташука, д.с.-г.н., проф. В. С. Мошинського, д.т.н., проф. А. М. Рокочинського [та ін.]. Рівне : НУВГП, 2024. 792 с. С. 580–583. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/30397/3/Monografiya_Polissya_%D0%B2%D0%B8%D0%BF%D1%80_3-482-792.pdf (38,837 д.а.; особистий внесок: опис гвинтових турбін 0,113 д.а.).

Публікації у фахових виданнях України:

2. Герба О. В. Використання турбін зі спіралеподібними лопатями. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер. Технічні науки* : зб. наук. праць. 2023. Вип. 4(104). 163 с. С. 3–12. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt420231> (0,457 д.а.).

3. Герба О. В. Дослідження енергетичних характеристик спіралеподібних турбін для систем охолодження ядерних установок. *Технічні науки та технології* : науковий журнал. Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. No 4(38). 366 с. С. 359–366. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-359-366](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-359-366) (0,598 д.а.).

4. Герба О. В. Лабораторні дослідження моделей турбін для малих гідроелектростанцій у водному потоці під кутом 90° до лопатей. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Сер. Технічні науки* : зб. наук. праць. 2024. Вип. 4(108) С. 47–58 DOI: <https://doi.org/10.31713/vt420246> (0,444 д.а.).

5. Герба О. В. *Турбіни гвинтового типу: Інновації у будівництві енергетичних установок* : зб. наук. праць Українського державного університету залізничного транспорту. Харків : УкрДУЗТ, 2025. Вип. № 211. С. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327108> (0,552 д.а.).

Публікації за матеріалами конференцій:

6. Герба О. В. Визначення оптимальних параметрів турбіни зі спіралеподібними лопатями для малих гідроелектростанцій. *Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки* : зб. тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів і здобувачів вищої освіти (м. Рівне, Україна, 11–12 травня 2023 року). Рівне : НУВГП, 2023. 763 с. С. 19–21. (0,116 д.а.).

7. Герба О. В. Експериментальні дослідження моделей турбін малих гідроелектростанцій. *Моделювання, керування та інформаційні технології* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Рівне, Україна, 7–9 листопада 2024 року). Рівне : НУВГП, 2024. 367 с. С. 91–94. DOI: <https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.024> (0,353 д.а.).

Патенти на корисні моделі:

8. Турбіна зі спіралеподібними лопатями: пат. 150304 Україна: МПК F03D1/00. № u202104720; заявл. 17.08.2021; опубл. 26.01.2022, Бюл. № 4. 4 с. (Герба О. В.).

9. Турбіна гвинтового типу: пат. 156567 Україна: МПК F03D1/00, F03D9/00. № u202400504; заявл. 30.01.2024; опубл. 10.07.2024, Бюл. № 28. 4 с. (Герба О. В., Клюха О. О.).

Додаток Б. Впровадження результатів досліджень

ТОВ «АГРАРНИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ КОНСАЛТИНГ»

р/р 26005054731499 в АТ КБ «ПРИВАТ БАНК»

ЄДРПОУ 14360570, код банку 333391

іпн: 42091540



вул. Біла 16, м. Рівне, Україна, 33001

Email: anc.ua.office@gmail.com

тел.: +38 (066) 333 3935

тел.: +38 (096) 733 4999

АГРАРНИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ КОНСАЛТИНГ

Вих. № 5 від 15.03.2023р.

Довідка

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Герби Олександра Володимировича

на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності
192 - Будівництво та цивільна інженерія

Результати дисертаційної роботи Герби О.В. щодо удосконалення умов роботи та конструкції гідравлічних турбін шнекового типу малих гідроелектростанцій були прийняті при розробці мікро-ГЕС, призначених для забезпечення автономного вуличного освітлення та часткового покриття енергетичних потреб рибного господарства або інших потреб громад у денний період.

Зокрема, при проектуванні мікро-ГЕС для встановлення на дамбах ставків були використані розробки спіралеподібних турбін. Завдяки запатентованим конструкційним рішенням, запропонованим у дисертаційній роботі, вдалося обґрунтовано вибрати оптимальний варіант конструкції турбіни. Впроваджені рішення дозволять забезпечити стабільне функціонування мікро-ГЕС, що сприяє зменшенню витрат на обслуговування та експлуатацію.

В.о. директора

ТОВ «АНК»



Ципяшук Н.І.



Товариство з обмеженою відповідальністю – виробничо-комерційна фірма
«БУДКОМПЛЕКТ»

Юридична адреса: 33018, Рівненська обл., м. Рівне, вул. В. Стельмаха, 16-А
Поштова адреса: 33018, Рівненська обл., м. Рівне, вул. В. Стельмаха, 16-А
р/р UA813052990000026006040706532 в АТ КБ «ПриватБанк»
ЄДРПОУ 22572323, ІПН 225723217165
тел. 067-363-44-43

Вих. № 157 від 20.11.2024р.

Довідка
про впровадження результатів дисертаційної роботи
Герби Олександра Володимировича
на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності
192 - Будівництво та цивільна інженерія

Результати дисертаційної роботи Герби О.В. на тему «Удосконалення умов роботи та конструкції гідравлічних турбін шнекового типу малих гідроелектростанцій» планується впровадити у виробничу діяльність ТОВ ВКФ «БУДКОМПЛЕКТ» для серійного виготовлення мікро-ГЕС.

Розроблені технічні рішення будуть використані у виробництві мікро-ГЕС для подальшого продажу з метою комерційного та приватного використання, зокрема на виконання завдань забезпечення автономного енергопостачання об'єктів туристично-рекреаційних комплексів, приватних домогосподарств, органів місцевого самоврядування та інших споживачів енергетичних послуг.

У процесі проектування мікро-ГЕС використано інноваційну конструкцію турбіни гвинтового типу, запатентованої на основі результатів дисертаційного дослідження. Очікується, що впровадження цих рішень забезпечить підвищення енергоефективності, надійності та конкурентоспроможності продукції на ринку. Крім того, зниження експлуатаційних витрат і спрощення обслуговування сприятимуть підвищенню економічної доцільності впровадження таких систем для кінцевого споживача.



Директор
ТОВ ВКФ "БУДКОМПЛЕКТ"
М.П.

В.ШЕВЧУК



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, тел. (0362) 63-30-98, факс (0362) 63-32-09, mail@nuwm.edu.ua

Від 20.03.25 № ЗН-25
 На № _____ від _____

ДОВІДКА

про використання досліджень
Герби Олександра Володимировича,
 отриманих при виконанні дисертаційної роботи
 на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
 192 - будівництво та цивільна інженерія (технічні науки),
 в науково-дослідних роботах, які виконувалися у науково-дослідній частині
 Національного університету водного господарства та природокористування

Видана *Гербі Олександру Володимировичу* з підтвердженням того, що результати досліджень, викладених в дисертаційній роботі на тему «Удосконалення умов роботи та конструкцій малих гідравлічних турбін шнекового типу», використовувались при виконанні кафедральної науково-дослідної роботи «Удосконалення методів досліджень, розрахунків і проектування гідроенергетичних об'єктів та гідравлічних машин» (№ держреєстрації 0121U111064, терміни виконання 2021-2025 рр.); де здобувачем у межах цієї роботи здобувачем було розроблено методику експериментальних досліджень турбін, зокрема аналіз впливу зміни кута атаки на ефективність енергоперетворення. Крім того, проведено теоретичне обґрунтування гідродинамічних процесів у спіралеподібних і шнекових турбінах, що стало основою для розробки нових конструктивних рішень. Результатом досліджень стала розробка та патентування інноваційних моделей турбін із покращеними аерогідродинамічними властивостями, що забезпечують зменшення енергетичних втрат, стабільність роботи при змінних умовах потоку та перспективи застосування у малих гідроенергетичних системах.

Проректор з наукової роботи
 та міжнародних зв'язків,
 д.е.н., професор



Наталія САВІНА



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВОДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
(НУВГП)

вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028, тел. (0362) 63 30 98, факс (0362) 63 32 09,
 e-mail: mail@nuwm.edu.ua, web: https://nuwm.edu.ua
 код ЄДРПОУ 02071116

Від 21.01.2025 № 011-03 На № _____ від _____

ДОВІДКА

про використання у навчальному процесі
Національного університету водного господарства та природокористування
результатів досліджень і розробок, одержаних при виконанні дисертації
ГЕРБИ Олександра Володимировича
на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю
192 – Будівництво та цивільна інженерія

Результати наукових досліджень, викладені у дисертації здобувача ступеня доктора філософії Герби О. В., наводяться у вигляді технічних рішень та конструкторських розробок, що забезпечують формування професійних компетентностей здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів та сприяють досягненню програмних результатів навчання.

Отримані наукові результати використовуються в навчальному процесі, зокрема при виконанні індивідуальних розрахункових та курсових робіт при викладанні навчальних дисциплін: «Виготовлення гідротурбінного обладнання ГЕС», «Малі гідроелектростанції», «Розрахунки на міцність та оцінка надійності гідроагрегатів» (включаючи КП), «Експлуатація гідроенергетичних об'єктів», «Моделювання гідротехнічних процесів в енергетиці». Представлені наукові досягнення забезпечують набуття теоретичних знань та сприяють формуванню здатності об'єктивно і критично аналізувати конструкції спіралеподібних та шнекових турбін, застосування інноваційних технічних рішень для автономного енергозабезпечення, а також використання запатентованих розробок у проектуванні малих гідроелектростанцій під час викладання нормативних та вибіркових освітніх компонент при підготовці здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів за спеціальністю 145 «Відновлювані джерела енергії та гідроенергетика» галузі знань 14 «Електрична інженерія»:

- під час викладання навчальної дисципліни «Виготовлення гідротурбінного обладнання ГЕС»: Тема 1. Характеристика технології виробництва гідротурбінного обладнання ГЕС. Технологічні особливості гідротурбін. Характер виробництва і виробничий процес. Основне і спеціалізоване технологічне обладнання;

- під час викладання навчальної дисципліни «Малі гідроелектростанції»: Тема 1. Класифікація та область застосування малих ГЕС; Тема 5. Проектування, будівництво і експлуатація малих ГЕС;

- під час викладання навчальної дисципліни «Розрахунки на міцність та оцінка надійності гідроагрегатів»: Тема 1. Параметри великих гідротурбін. Конструкції гідротурбін і їх установка; Тема 5. Робочі колеса осьових і діагональних гідротурбін;

- під час викладання навчальної дисципліни «Експлуатація гідроенергетичних об'єктів»: Тема 1. Основні положення експлуатації гідроенергетичних об'єктів (ГЕО); Тема 5. Експлуатація і ремонт обладнання гідроенергетичних установок;

- під час викладання навчальної дисципліни «Моделювання гідротехнічних процесів в енергетиці»: Тема 4. Фізичне моделювання гідравлічних процесів.

Проректор з наукової роботи
та міжнародних зв'язків НУВГП
доктор економічних наук,
професор

Виконавець: Олександр РЯБЕНКО +380669935758



Наталія САВІНА

Додаток В. Патенти на корисні моделі





УКРАЇНА

(19) UA (11) 150304 (13) U

(51) МПК (2022.01)

F03D 1/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО "УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2021 04720	(72) Винахідник(и): Герба Олександр Володимирович (UA)
(22) Дата подання заявки: 17.08.2021	
(24) Дата, з якої є чинним: 27.01.2022	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 26.01.2022, Бюл.№ 4	

(54) ТУРБІНА ЗІ СПІРАЛЕПОДІБНИМИ ЛОПАТЯМИ

(57) Реферат:

Турбіна зі спіралеподібними лопатями містить дугоподібну лопать, що розташована концентрично та спіралеподібно вздовж осі обертання турбіни і з'єднана кріпильним елементом із валом, що розташований вздовж осі обертання турбіни. Використовують прийнятні одну дугоподібну лопать, яка разом із валом вміщена у порожнистий циліндричний кожух (корпус) та нерухомо з'єднана із ним, при цьому лопать скомп'юнована із можливістю максимального перекривання простору для аеро- або гідропотоку. При цьому кут розміщення лопаті до кожуха (корпусу) поступово зменшується від входу кожуха (корпусу) до виходу з нього, а турбіна конструкційно виконана із поступовим зменшенням площі каналів аеро- або гідропотоку від входу до виходу кожуха (корпусу).

UA 150304 U





УКРАЇНА

(19) UA (11) 156567 (13) U

(51) МПК (2024.01)

F03D 1/00

F03D 9/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ

ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ "УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

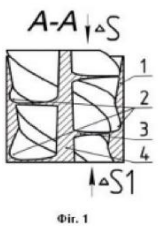
(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2024 00504	(72) Винахідник(и): Герба Олександр Володимирович (UA), Крюка Оксана Олександрівна (UA)
(22) Дата подання заявки: 30.01.2024	
(24) Дата, з якої є чинним: 11.07.2024	
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 10.07.2024, Бюл.№ 28	

(54) ТУРБІНА ГВИНТОВОГО ТИПУ

(57) Реферат:

Турбіна гвинтового типу складається з корпусу, лопаті та вала. В місцях контакту лопаті з корпусом утворений плавний перехід заокругленої форми шляхом впадування виступу в корпусі. При цьому глибина виступу, заокругленого переходу, в корпусі турбіни збільшується від входу до виходу; площа поперечного перерізу корпусу та вала збільшується по довжині турбіни від входу до виходу.



Фір. 1

UA 156567 U