

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)

УДК 621.224:621.311.21

**ТУРБИНИ ГВИНТОВОГО ТИПУ: ІННОВАЦІЇ В БУДІВНИЦТВІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
УСТАНОВОК**

Аспірант О. В. Герба

SCREW-TYPE TURBINES: INNOVATIONS IN ENERGY FACILITY CONSTRUCTION

Postgraduate student O. V. Herba

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327108>



***Анотація.** Турбіни гвинтового типу відіграють важливу роль у розвитку сучасних енергетичних установок. Їхні унікальні конструктивні рішення забезпечують оптимальне використання потоків води або повітря, що проходять через турбіну, підвищуючи ефективність, порівняно зі шнековими аналогами. У статті розглянуто основні конструктивні особливості гвинтових турбін і їхній потенціал для впровадження в будівництво енергетичних об'єктів.*

Особливу увагу приділено перевагам гвинтових турбін, де завдяки продуманому дизайну вони демонструють більшу ефективність для перетворення кінетичної енергії рідин і газів у механічну обертальну енергію. Це забезпечує оптимальні умови для роботи в умовах малих перепадів висот (від 1 м) і низьких витрат потоків (від 0,5 м³/с).

Акцент зроблено на покращених експлуатаційних характеристиках турбін гвинтового типу порівняно з традиційними шнековими аналогами. Подано результати досліджень, які підтверджують ефективність нового дизайну лопатей із виїмками в корпусі. Така конструкція сприяє природному руху рідини та повітря відповідно до теорії Шаубергера. Особливості дизайну, включно з формуванням виїмок у корпусі, дають змогу оптимізувати потік, зменшити тертя і підвищити обертальний момент. Крім того, завдяки маховиковому ефекту гвинтові турбіни здатні накопичувати енергію, забезпечуючи стабільну роботу, зменшуючи механічні коливання в системі.

У статті також розглянуто можливості застосування гвинтових турбін у будівництві енергетичних об'єктів, зокрема малих гідроелектростанцій. Запропоновані рішення сприяють підвищенню ефективності використання природних ресурсів у змінних умовах навколишнього середовища. Подальші дослідження будуть спрямовані на детальніше вивчення ефективності цих нововведень і адаптацію конструкції до різних експлуатаційних умов. Це підкреслює важливість і доцільність застосування гвинтових турбін у сучасному будівництві та енергетиці.

***Ключові слова:** гвинтова турбіна, енергетичні установки, будівництво, гідроенергетика, ефективність, надійність.*

***Abstract.** Screw-type turbines play a significant role in the development of modern energy systems. Their unique design features ensure optimal utilization of water or air flows passing through the turbine, enhancing efficiency compared to screw-type analogs. This article examines the primary design characteristics of screw turbines and their potential for integration into energy facilities construction. Special attention is given to the advantages of screw turbines, where, due to their*

thoughtfully conceived design, they demonstrate higher effectiveness in converting kinetic energy from liquids and gases into mechanical rotational energy. This design provides optimal operating conditions for applications involving low head differences (from 1 meter) and low flow rates (starting from 0.5 m³/s). The focus is on the enhanced operational characteristics of screw-type turbines compared to traditional screw analogs.

Research results confirming the efficiency of the new blade design incorporating notches in the housing are presented. This construction aids in the natural movement of fluids and air in line with the principles of Schaubberger's theories. The design features, including the formation of notches in the housing, facilitate the optimization of flow, reduce friction, and increase torque. Additionally, thanks to the flywheel effect, screw turbines are capable of energy storage, ensuring stable operation while minimizing mechanical vibrations within the system. The article also explores the application possibilities of screw turbines in the construction of energy facilities, particularly small hydroelectric power plants.

Proposed solutions contribute to the improved efficiency of utilizing natural resources under varying environmental conditions. Future research will focus on a more in-depth assessment of the efficiency of these innovations and the adaptation of turbine designs for various operational settings. This underscores the importance and feasibility of employing screw turbines in contemporary construction and energy sectors. By adopting these advanced turbine designs, we can accelerate the transition to more sustainable energy solutions while maximizing the effectiveness of renewable energy sources. The integration of screw turbines offers a promising approach towards achieving greater energy efficiency and environmental sustainability in modern infrastructure projects.

Keywords: screw turbine, energy systems, hydropower, fluid dynamics, efficiency, renewable energy, sustainability.

Вступ. У сучасній енергетиці велику увагу приділяють розробленню ефективних і надійних технологій для надійного виробництва електричної енергії. Турбіни є основними компонентами в багатьох енергетичних установках, включаючи гідроелектростанції, вітрові турбіни, а також теплові електростанції.

Для роботи з малими перепадами (від 1 м) і витратами води (від 0,5 м³/с на одну турбіну) зазвичай використовують шнекові турбіни [1]. Однією з переваг шнекової турбіни є висока ефективність роботи (більше 80 %) за малої швидкості обертання вала. Діапазон потужності складає від 10 до 650 кВт [2].

Поліпшеним типом шнекових турбін є спіралеподібні турбіни [3], які привертають увагу завдяки своїм унікальним конструкційним особливостям, що сприяють підвищенню ефективності та надійності. Спіралеподібні турбіни, які мають спеціальну геометрію лопатей, нерухомо з'єднаних із корпусом,

підвищують ефективність перетворення енергії. Вони здатні працювати в широкому діапазоні умов і знижувати вібраційні навантаження, що сприяє їхній довговічності. Після досліджень спіралеподібних турбін, спрямованих на вдосконалення і покращення їхньої аеродинаміки та експлуатаційних характеристик, виникли варіанти оптимізації геометрії турбін.

Передумови та особливості проєктування гвинтових турбін. Під час проведення дослідів у трьох режимах повітряного потоку трьох модифікацій турбін зі спіралеподібними лопатями була помічена закономірність підвищення ефективності за рахунок збільшення ваги корпусу. Виник задум вдосконалити найкращий варіант серед раніше запропонованих спіралеподібних турбін [3] шляхом поліпшення конструкції за умови збереження принципу їхньої роботи. Лопаті турбіни, розташовані під кутом до вхідного потоку, створюють обертальний момент

відносно осі обертання та одночасно перенаправляють потік до корпусу турбіни. Завдяки будові корпусу з поступовим збільшенням об'єму в напрямку руху потоку створюється додаткова реактивна тяга. При цьому буде забезпечений найбільший обертальний момент, що також дає змогу значно знизити необхідну для страгування турбіни швидкість водного чи повітряного потоку [3].

Ідея турбіни гвинтового типу направлена на вдосконалення спіралеподібної турбіни, у якій шляхом зміни конструкції, дизайну та форми можна досягти збільшення об'єму корпусу та поступового відведення потоку (рідини, газу) від більшого діаметра корпусу на вході до меншого діаметра корпусу на виході з турбіни [4]. Використання досвіду спіральних заокруглень Шаубергера [5] призводить до зменшення природного гальмування (тертя) опору реактивному руху за рахунок конструктивних криволінійних (заокруглених) заглиблень (виїмок) у корпусі. Зростання швидкості потоку (води, газу або іншого робочого тіла) дає змогу збільшити ККД установки.

Конструктивні аспекти та конфігурація турбіни гвинтового типу. Як і в моделях спіралеподібних турбін [3], гвинтові лопаті турбіни розташовані у вигляді спіралі і нерухомо з'єднані з корпусом і розташовані так, що максимально перекривають безперешкодний рух потоку, тим самим значно збільшуючи тиск на них, при цьому додано конструкційні криволінійні виїмки в корпусі, які є ніби продовженням лопатей. Для створення виїмок поступово збільшують площу поперечного перерізу турбіни до виходу, що дає змогу збільшити вагу корпусу. Збільшення ваги корпусу дає змогу гвинтовій турбіні працювати з ефектом маховика [6], щоб накопичувати, зберігати і віддавати енергію, згладжуючи коливання в роботі механічної системи разом із генератором. Такі модифікації сприяють створенню природних завихрень

потоку, який не спричиняє опору (гальмування), стабілізують і зменшують нерівномірності обертання вала з генератором, відповідно збільшуючи ККД усієї установки.

На рис. 1 зображено турбіну гвинтового типу в розрізі А-А, на рис. 2 подано вигляд турбіни гвинтового типу зверху, на рис. 3 – вигляд турбіни гвинтового типу знизу, на рис. 4 показано ізометрію турбіни гвинтового типу з розрізом В-А [7].

Турбіна гвинтового типу має корпус 1 із конструктивними виїмками 2, нерухомо зв'язаний щонайменше однією гвинтоподібною лопаттю 3 у середині турбіни з конусним валом 4 (рис. 1) [7].

Технічного результату досягли шляхом утворення в середині турбіни проточних каналів $S'-S1'$; $S''-S1''$; $S'''-S1'''$ (рис. 1-3), що містять виїмки заокругленої форми в корпусі на межі злиття з гвинтоподібною лопаттю 2, 2', 2'', 2''' (рис. 4), з поступовим зменшенням площі проходження потоку до виходу $\Delta S > \Delta S1$ (рис. 1-3), також площа потоку зменшується за рахунок конусної форми вала 4, що дає змогу збільшити потужність установки, використовуючи додатковий перепад тиску на турбіні, фізично посилюючи динамічну взаємодію, яка відбувається за рахунок збільшення кількості і швидкості рідини (повітря), яка природно проходить через турбіну завдяки конструкційним особливостям (виїмкам). При цьому глибина закруглення (виїмки) 2 у корпусі 1 – найменша на вході в турбіну, поступово збільшується до виходу, де корпус товщий, стаючи – 2''', а поступове зростання глибини самого закруглення (виїмки) показано на рис. 4, де $2 < 2' < 2'' < 2'''$. Крім того, велику роль відіграє використання корпусу турбіни 1 зі збільшеним об'ємом маховика [6], що дає змогу максимально ефективно використовувати турбіну, перетворюючи кінетичну енергію потоку [7].

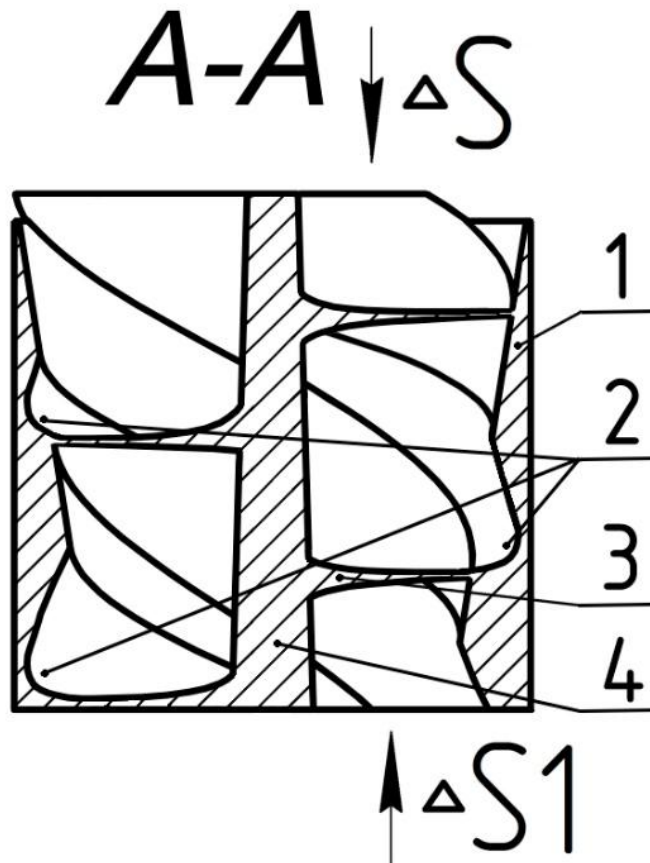


Рис. 1. Схема турбіни гвинтового типу в розрізі А-А

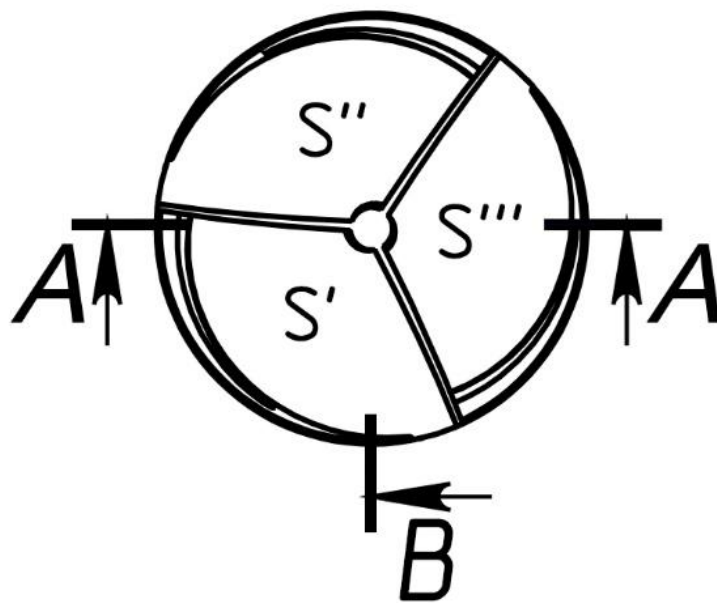


Рис. 2. Схема турбіни гвинтового типу зверху

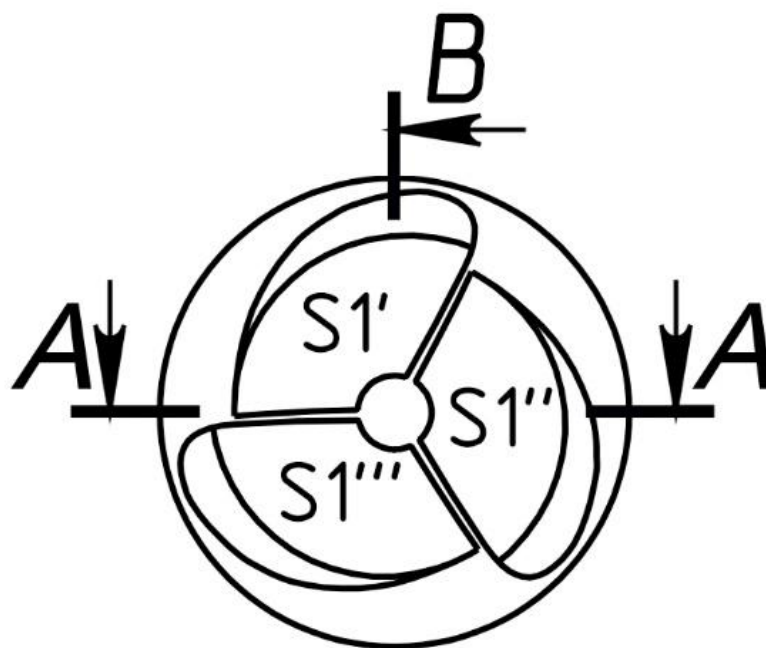


Рис. 3. Схема турбіни гвинтового типу знизу

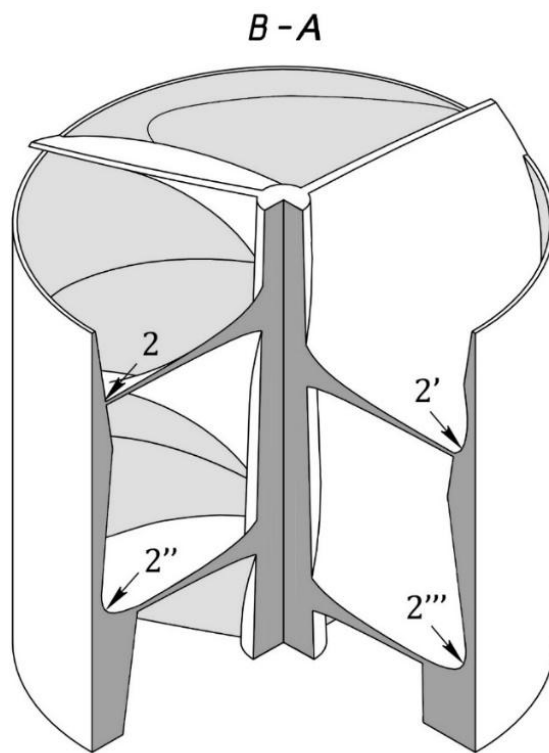


Рис. 4. Схема турбіни гвинтового типу з розрізом В-А в ізометрії

Планування експериментів у водному потоці під кутом 90° до лопатей турбін. Для оцінювання ефективності запроєктованої гвинтової турбіни необхідно провести експериментальні дослідження у водному потоці, порівнявши її роботу з аналогічними моделями за ідентичних розмірів та умов. Важливим етапом цього процесу є планування експериментів, яке включає формулювання мети дослідження, вибір оптимальних параметрів, а також проєктування та налаштування лабораторного стенда для проведення випробувань у спрямованому водному потоці [8].

Для оцінювання продуктивності турбін проведено експериментальні дослідження у водному потоці п'яти моделей: однієї гвинтової типу [7], трьох спіралеподібних [3, 9] та однієї традиційної шнекової [10].

У результаті планування експериментів визначені основні параметри, які необхідно контролювати під час досліджень:

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

n_2 – кількість обертів турбіни з навантаженням ($1 \cdot 21 \text{ Вт}$), об/хв;

n_3 – кількість обертів турбіни з навантаженням ($2 \cdot 21 \text{ Вт}$), об/хв;

n_4 – кількість обертів турбіни з навантаженням ($3 \cdot 21 \text{ Вт}$), об/хв;

U_1 – вироблена генератором електрична напруга без навантаження, В;

U_2 – вироблена генератором напруга з навантаженням ($1 \cdot 21 \text{ Вт}$), В;

U_3 – вироблена генератором напруга з навантаженням ($2 \cdot 21 \text{ Вт}$), В;

U_4 – вироблена генератором напруга з навантаженням ($3 \cdot 21 \text{ Вт}$), В;

h – рівень води у верхньому б'єфі, см;

h_0 – рівень води у верхньому б'єфі, за якого відбувається страгування моделі турбіни, см;

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

P_2 – електричне навантаження потужністю 21 Вт;

P_3 – електричне навантаження потужністю 42 Вт;

P_4 – електричне навантаження потужністю 63 Вт.

Експериментальний стенд для досліджень у водному потоці оснащений приладами для вимірювання швидкості обертання досліджуваної моделі турбіни та генерованої електричної напруги. Для зняття показників електричної напруги за режимів холостого ходу (P_1) і з навантаженням (P_2, P_3, P_4) до генератора підключено блок керування навантаженням, де роль навантаження виконують три лампи розжарювання номіналом 12 В і потужністю 21 Вт кожна.

Для дослідження одночасного впливу кількох параметрів (висота води у верхньому б'єфі, ступінь навантаження, геометрія лопатей турбін) застосовано методи факторного планування [11]. Цей підхід дає змогу аналізувати кілька змінних одночасно та оцінювати їхній вплив на продуктивність турбін. Для забезпечення надійності результатів експерименти проводили кілька разів за різних умов, що дає змогу врахувати можливі варіації та отримати точніші дані.

Для порівняння ефективності запропонованих конструкцій турбін з сучасними класичними прототипами виготовлено шнекову турбіну таких самих розмірів, як і в інших моделей ($\varnothing 200 \text{ мм}$, 210 мм). Їхня вага була приведена до маси найважчої – 1100 г шляхом намотування дроту на корпус із балансуванням, при цьому відхилення за вагою становило допустимі $\pm 5 \%$. Це дало змогу провести контрольні експерименти зі шнековою турбіною, що забезпечило можливість порівняння отриманих результатів з іншими конструкціями та об'єктивного оцінювання їхньої ефективності.

Проведення досліджень у водному потоці заплановано у два етапи:

- експериментальні дослідження моделей турбін у водному потоці під кутом 90° до лопатей;

- аналіз і порівняння результатів із визначенням оптимальної конструкції моделі турбіни.

Для визначення найкращого варіанта моделі турбіни на основі аналізу впливу рівня води у верхньому б'єфі на конструкції досліджуваних турбін у режимах холостого ходу (P_1) і з навантаженням (P_2, P_3, P_4) кожній із турбін надано по шість значень рівня верхнього б'єфа (h). Отже, для оцінювання ефективності різних варіантів серед досліджуваних турбін необхідно провести $5 \cdot 24 = 120$ експериментів, під час яких буде отримано 240 показників.

Проведені експерименти шифрували так: римська цифра на початку шифру позначає модель досліджуваної турбіни. Шифри відповідають таким назвам турбін:

I – турбіна з будовою лопатей за принципом золоті спіралі;

II – турбіна з прямими спіралеподібними лопатями, що збільшуються в об'ємі;

III – турбіна з прямими спіралеподібними лопатями зі звуженням корпусу;

IV – турбіна гвинтового типу;

V – шнекова турбіна.

Під час проведення експериментів усі отримані дані, зокрема швидкість обертання, вироблена напруга в різних режимах, рівень води у верхньому б'єфі тощо, записали до спеціально розробленої таблиці, яка служить основою для подальшого аналізу та формулювання висновків.

Дослідження моделей турбін у водному потоці та аналіз отриманих результатів. Для дослідження моделей у водному потоці за умови впливу двох змінних на характеристики модифікованих шнекових турбін використано факторний експеримент. Це дасть змогу дослідити вплив кожного з факторів (висота води у верхньому б'єфі та навантаження), а також їхню взаємодію. У результаті потрібно

провести експерименти для кожної комбінації рівнів факторів, щоб визначити залежність.

У таблиці зафіксовано отримані показники, вироблені досліджуваними моделями турбін (I, II, III, IV, V), обертів (n), вихідної напруги (U) із генератора в чотирьох режимах (P_1, P_2, P_3, P_4) і за п'яти рівнів води у верхньому б'єфі (h), також зафіксовано відповідний момент страгування (h_0) у водному потоці під кутом 90° до лопатей.

Після проведення експериментів із досліджуваними моделями турбін на кожному рівні висоти води у верхньому б'єфі (h) і зі зміною навантаження (P) проаналізовано вплив цих факторів на основний вихідний параметр – електричну напругу (U). Для оцінювання ефективності турбін побудовано графік (рис. 5), що відображує залежність виробленої генератором електричної напруги (U) від висоти води у верхньому б'єфі (h) для всіх досліджуваних моделей (I, II, III, IV, V) 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 у свою чергу призводить до зростання частоти обертання турбін і відповідно збільшення виробленої електричної напруги.

Серед досліджених моделей найвищі показники в усіх чотирьох режимах навантаження за різних рівнів води у верхньому б'єфі продемонструвала турбіна гвинтового типу (IV):

– напруга в режимі холостого ходу (IVP_1) відповідно до рівня води відповідала: $h_{20} = 10,8$ В; $h_{30} = 14,6$ В; $h_{40} = 18,5$ В; $h_{50} = 21,8$ В; $h_{60} = 24,7$ В;

– напруга в режимі максимального навантаження (IVP_4): $h_{20} = 6,1$ В; $h_{30} = 10,0$ В; $h_{40} = 14,3$ В; $h_{50} = 17,5$ В; $h_{60} = 20,3$ В.

Отримані показники експериментів досліджуваних моделей турбін у водному потоці за режимами навантаження (P_1, P_2, P_3, P_4)

Навантаження	Турбіна	h_0	h	20	30	40	50	60
P_1	I	11,3	B	9	13	16,7	20	23,7
			об/хв	212	311	403	491	602
	II	9	B	9,4	14,1	17,3	20,5	23,9
			об/хв	223	333	417	504	607
	III	8,8	B	10,2	14,6	18,5	21,8	24,7
			об/хв	247	343	447	545	630
	IV	7,2	B	10,8	15,3	19,5	23	26
			об/хв	259	362	475	582	664
	V	12,5	B	8,7	12,7	16	18,4	20,7
			об/хв	201	301	384	444	511
P_2	I	13,5	B	6,8	10,2	14	17,5	20,9
			об/хв	163	247	330	420	517
	II	12	B	7,5	11,7	14,5	17,8	21,3
			об/хв	178	280	342	428	532
	III	11,9	B	7,9	12	15,2	18,8	21,2
			об/хв	185	285	362	454	527
	IV	10,3	B	9,2	13,5	17,6	21	24
			об/хв	218	321	423	520	611
	V	14,2	B	6,5	10,3	13,7	16,2	18,1
			об/хв	158	248	323	388	436
P_3	I	14,7	B	5,2	8	12	15,5	18,1
			об/хв	129	187	285	368	437
	II	13,4	B	5,8	9,1	12,6	15,7	18,6
			об/хв	143	214	300	375	450
	III	13,4	B	6,3	9,5	13,1	16,4	18,6
			об/хв	154	227	314	392	450
	IV	11,9	B	7,5	11,6	15,9	19	21,9
			об/хв	178	278	381	461	548
	V	15,8	B	5	8,4	11,7	14,2	16,1
			об/хв	125	195	280	336	386
P_4	I	15,8	B	3,9	6,7	10,3	13,5	16,2
			об/хв	105	160	248	321	388
	II	15	B	4,5	7,4	10,8	13,6	16,5
			об/хв	113	177	259	322	396
	III	14,9	B	4,7	7,6	11,3	14	16,9
			об/хв	116	180	268	330	407
	IV	13,3	B	6,1	10	14,3	17,5	20,3
			об/хв	129	243	337	420	500
	V	17,3	B	3,7	6,7	10,1	12,7	14,5
			об/хв	102	160	245	301	342

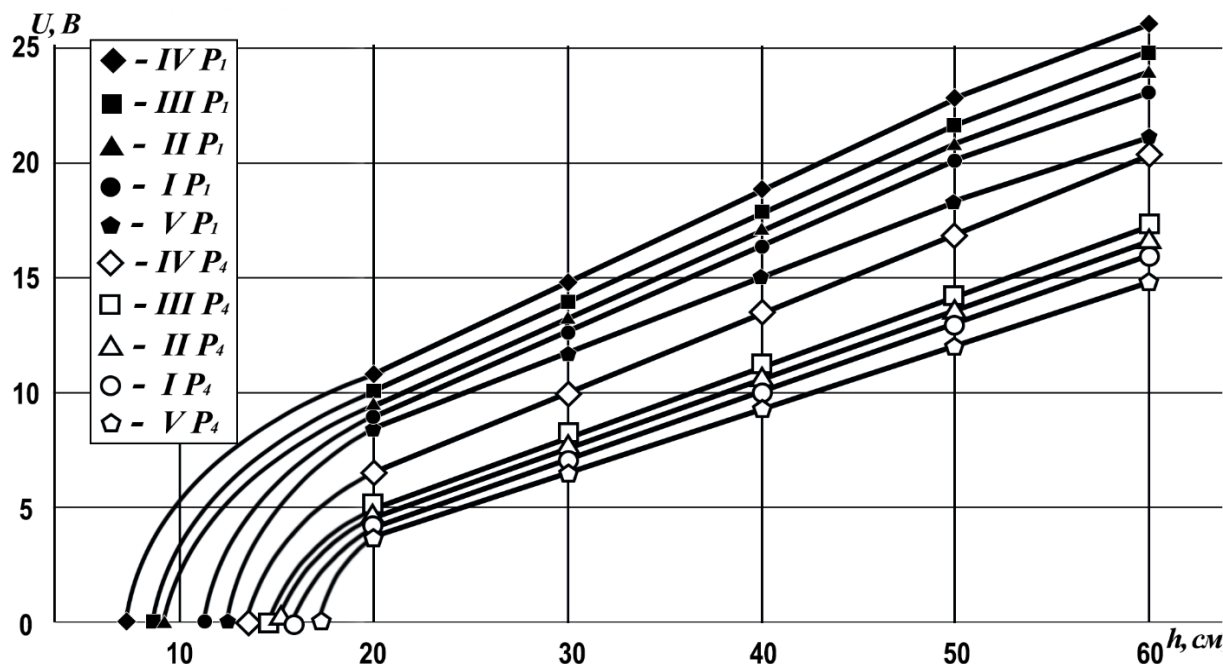


Рис. 5. Графік залежності виробленої генератором електричної напруги (U) від висоти води у верхньому б'єфі (h) для всіх досліджуваних моделей (I, II, III, IV, V) за двох рівнів навантаження (P_1 , P_4).

Натомість найнижчі результати зафіксовано у традиційної шнекової турбіни (V):

– напруга в режимі холостого ходу (VP_1): $h_{20} = 8,7$ В; $h_{30} = 12,7$ В; $h_{40} = 16,0$ В; $h_{50} = 18,4$ В; $h_{60} = 20,7$ В;

– напруга в режимі максимального навантаження (VP_4): $h_{20} = 3,7$ В; $h_{30} = 6,7$ В; $h_{40} = 10,1$ В; $h_{50} = 12,7$ В; $h_{60} = 14,5$ В.

Навантаження на турбіні суттєво впливає на їхню частоту обертання: зі збільшенням навантаження турбіни уповільнюються, що призводить до пропорційного зниження напруги. Однак за однакової маси та геометричних розмірів гвинтовій турбіні вдалося досягти кращих показників порівняно зі шнековою завдяки конструктивним особливостям. Зокрема, напруга в режимі P_1 за h_{60} у гвинтової турбіни була на 4,0 В (19 %) вище, ніж у шнекової, а в режимі максимального навантаження (P_4) різниця становила 6,2 В (40 %). Це свідчить про значну перевагу гвинтової конструкції в умовах змінного навантаження.

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.

Висновки. Гвинтові турбіни мають великий потенціал для використання в будівництві гідроенергетичних установок завдяки їхній компактності, ефективності та надійності. Вони повністю прийнятні для умов із малими перепадами, зокрема на малих гідроелектростанціях.

Запропонована конструкція турбіни гвинтового типу з виїмками та збільшеним в об'ємі корпусом дає змогу більш ефективно використовувати кінетичну енергію потоку. При цьому така конструкція зменшує кінцеві гідравлічні втрати на тертя і від

завихрень із кінців лопатей, збільшуючи ККД турбіни.

Подальші дослідження доповнюють повноту картини з визначення продуктивності поданих турбін і підтверджують теоретичні розрахунки ефективності турбіни гвинтового типу.

Майбутні дослідження в цій сфері можуть включати інтеграцію турбін

гвинтового типу в системи вироблення енергії, розвиток технологій відновлюваної енергетики, а також адаптацію цих турбін для використання в різних кліматичних умовах.

Гвинтові турбіни є надійним рішенням для багатьох галузей, включаючи гідроенергетику, будівництво вентиляційних систем.

Список використаних джерел

1. Brada K., Radlik K.A. Water Screw Motor to Micro Power Plant - First Experiences of Construction and Operation. 1998.
2. Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України. Технологічні особливості малих ГЕС. Київ, 2018. Т. II. 144 с.
3. Турбіна зі спіралеподібними лопатями: пат. № 150304 / О. В. Герба; u202104720; заявл. 17.08.2021; опубл. 26.01.2022; Бюл. № 4. 17 с.
4. Nailu G., Varchola M., Hlbocan P. Design of Hydrodynamic Machines: Pumps and Hydro-Turbines ISBN-978-0367439613, CRC Press; 1st edition 2022. 268 p.
5. Schauburger V. The Energy Evolution: Harnessing Free Energy from Nature. Gateway 2000. 272 p.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. Изд. 2-е, испр. Москва: Наука, 1965. Т. 1. 204 с.
7. Турбіна гвинтового типу: пат. № 156567 / О. В. Герба, О. О. Клюха; u202400504; заявл. 30.01.2024; опубл. 10.07.2024; Бюл. № 28.
8. Рябенко О. А. Хвилястий стрибок: монографія. Рівне: НУВГП, 2022. 277 с.
9. Герба О. В. Використання турбін зі спіралеподібними лопатями. *Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць*. Рівне : НУВГП, 2023. Вип. 4(104). С. 3-12.
10. Шнекова турбіна. URL: <https://promenergia.com.ua/hidroturbiny/shnekova-turbina/>.
11. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. Москва: Наука. 1976. 296 с.

Герба Олександр Володимирович, аспірант кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин, Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна.
ORCID. ID: <https://orcid.org/0009-0009-7592-800X>. E-mail: o.v.herba@nuwm.edu.ua.

Herba Oleksandr Volodymyrovych, postgraduate student at the department of hydropower engineering, thermal power engineering and hydraulic machines. National University of Water and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine).
ORCID. ID: <https://orcid.org/0009-0009-7592-800X>. E-mail: o.v.herba@nuwm.edu.ua.

Статтю прийнято 18.02.2025 р.