

# Експериментальні дослідження моделей турбін малих гідроелектростанцій

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.024>

Олександр Герба

Національний університет водного господарства  
та природокористування, Рівне  
[o.v.herba@nuwm.edu.ua](mailto:o.v.herba@nuwm.edu.ua)

**Анотація** – Вдосконалення турбін шнекового типу є одним із перспективних напрямів у розробці сучасних енергетичних установок. Запропоновані конструкції шнекових турбін поліпшеного типу мають особливий дизайн, що дозволяє ефективніше використовувати потоки повітря або рідини, які проходять через турбіни, збільшуючи їх ефективність. У статті описано дослідження і аналіз конструкційних особливостей шнекових турбін поліпшеного типу.

**Ключові слова** – спіралеподібна турбіна, турбіна гвинтового типу, шнекова турбіна, гідроелектростанції, ефективність.

## I. ВСТУП

При експлуатації малих ГЕС часто використовують шнекові, гвинтові, спіралеподібні та інші типи турбін. Для роботи на малих перепадах (від 1 м до 10м), та у потоках води (від 0,5 м<sup>3</sup>/с до 10 м<sup>3</sup>/с), зазвичай використовують шнекові турбіни [1]. Однією з переваг шнекових турбін є висока ефективність роботи при малій швидкості обертання валу (більше 80 %). Діапазон потужності складає від 10 кВт до 650 кВт [2].

Поліпшеним типом шнекових турбін є запропоновані спіралеподібні турбіни [3, 4] та турбіни гвинтового типу [5], які привертають увагу завдяки своїм унікальним конструкційним особливостям, що сприяють підвищенню ефективності та надійності. Спіралеподібні та гвинтові турбіни, що мають спеціальну геометрію лопатей, які нерухомо з'єднані з корпусом, дозволяють підвищити ефективність перетворення енергії. Останні дослідження спрямовані на вдосконалення цих моделей турбін, зокрема на покращення їхньої аеродинаміки і експлуатаційних характеристик.

Основне завдання в дослідженнях поліпшеного типу шнекових турбін полягає у визначенні оптимальної геометрії спіралеподібних та гвинтових турбін для підвищення їх енергоефективності.

## II. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ У ВОДЯНОМУ ПОТОЦІ З МОДЕЛЯМИ ТУРБІН

Для оцінки ефективності поліпшених шнекових турбін були проведені експериментальні дослідження у водяному потоці п'яти моделей турбін: трьох спіралеподібних [3, 4], однієї гвинтового типу [5], та однієї шнекової [1].

Планування експериментів для спіралеподібних (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 експериментального стенду в лабораторну установку [6] з направленим водним потоком.

Основною метою експериментальних досліджень поліпшених моделей 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;
- вивчення впливу параметрів потоку та аналіз того, як зміна рівня води у верхньому б'єфі впливає на продуктивність турбіни.

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

- $n_1$  – кількість обертів турбіни в режимі холостого ходу, об/хв;
- $n_2$  – кількість обертів турбіни під навантаженням (1·12в/21 Вт), об/хв;
- $n_3$  – кількість обертів турбіни під навантаженням (2·12в/21 Вт), об/хв;
- $n_4$  – кількість обертів турбіни під навантаженням (3·12в/21 Вт), об/хв;
- $U_1$  – вироблена генератором електрична напруга без навантаження, В;
- $U_2$  – вироблена генератором напруга під навантаженням (1·12в/21 Вт), В;
- $U_3$  – вироблена генератором напруга під навантаженням (2·12в/21 Вт), В;
- $U_4$  – вироблена генератором напруга під навантаженням (3·12в/21 Вт), В;
- $h$  – рівень води у верхньому б'єфі, см;
- $h_1$  – рівень води у нижньому б'єфі, см;
- $h_0$  – рівень води у верхньому б'єфі, при якому проходить страгування моделі турбіни, см;
- $P_1$  – 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.

Експериментальний стенд для дослідів у водяному потоці дообладнується приладами для вимірювання швидкості обертання досліджуваної моделі турбіни і генерованої електричної напруги. Для зняття показів по виробництву електричної напруги в режимах холостого ходу ( $P_1$ ), та під навантаженням ( $P_2, P_3, P_4$ ), до генератора підключено блок керування навантаженням, де роль навантаження виконують 3 лампи розжарення по 12в, потужністю 21Вт.

Для дослідження впливу кількох параметрів одночасно (висота води у верхньому б'єфі, ступінь навантаження, геометрія лопатей турбін) використано методи факторного планування [7, 8]. Це дозволяє одночасно аналізувати кілька змінних і їхній вплив на продуктивність турбін. Для досягнення надійних результатів експерименти повторювалися по кілька разів при різних умовах.

Щоб порівняти ефективність запропонованих конструкцій турбін з вже існуючими класичними прототипами надруковано шнекову турбіну відповідних розмірів ( $\varnothing$  200мм, 210мм), що дало можливість провести контрольні експерименти з турбіною шнекової конструкції для порівняння результатів з іншими конструкціями та визначення ефективності.

Проведення експериментальних досліджень у водяному потоці заплановано в два етапи, а саме:

- Експериментальні дослідження моделей турбін у водяному потоці під кутом  $45^\circ$  до лопатей;
- Аналіз та порівняння результатів з визначенням оптимальної конструкції моделі турбіни.

Під час проведення експериментів всі дані (швидкість обертання, вироблена напруга в різних режимах, рівень води у верхньому б'єфі тощо) записуються в таблиці (табл. 1-3) для подальших аналізів й висновків. Дані можна обробляти за допомогою методів регресійного або дисперсійного аналізу [9], щоб виявити залежності між параметрами потоку і продуктивністю турбін.

Існують різні методи планування постановки експериментів, направлені на зменшення кількості дослідів. Якщо запланувати досліди 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 [7, 8].

Для визначення найкращого варіанту моделі 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  $5 \cdot 24 = 120$  дослідів, при яких потрібно зняти 240 показників.

### III. ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ ТУРБІН У ВОДЯНОМУ ПОТОЦІ

Для дослідження моделей у водному потоці, в умовах впливу двох змінних на характеристики модифікованих шнекових турбін використано факторний експеримент. Це дозволить дослідити вплив кожного з факторів (висота води у верхньому б'єфі та навантаження), а також їх взаємодію. В результаті потрібно провести експерименти для кожної комбінації рівнів факторів, щоб визначити залежність.

Для наступного порівняння результатів експериментів, розміри досліджуваних моделей турбін надруковано однаковими ( $\varnothing$ 200мм, 210мм), а їх вага приведена до позначки 1100 грам (шляхом намотування витків дроту на корпус з балансуванням). При цьому відхилення по вазі складо допустимих  $\pm 5\%$ .

В таблицях 1 – 3 зафіксовано отримані показники, вироблених досліджуваними моделями турбін, числа обертів ( $n$ ) та вихідної напруги ( $U$ ) з генераторів в чотирьох режимах ( $P_1, P_2, P_3, P_4$ ) та при п'яти рівнях води у верхньому б'єфі ( $h$ ). При цьому також зафіксовано відповідний момент страгування ( $h_0$ ) у водному потоці, під кутом  $45^\circ$  до лопатей.

Таблиця 1. Отримані показники на моделях СПІРАЛЕПОДІБНИХ ТУРБІН: ЧИСЛО ОБЕРТІВ, ВИХІДНА НАПРУГА З ГЕНЕРАТОРА В ЧОТИРЬОХ РЕЖИМАХ ТА ПРИ П'ЯТИ РІВНЯХ ВОДИ У ВЕРХНЬОМУ Б'ЄФІ

Мод.	$P$	$h_0$	$h$	20	30	40	50	60	
турбіна з будовою лопатей за принципом зологої спіралі	$P_1$	12,8	$U_1, В$	7,5	11,8	13,7	15,4	17,7	
			$n_1, об/хв$	177	270	324	375	420	
	$P_2$	14,2	$U_2, В$	6,1	10,2	12,5	14,4	16,2	
			$n_2, об/хв$	151	248	306	348	390	
	$P_3$	15,9	$U_3, В$	4,5	9	10,9	12,9	15	
			$n_3, об/хв$	127	226	278	326	360	
	$P_4$	17	$U_4, В$	3,5	7,9	10,2	12	14,1	
			$n_4, об/хв$	101	200	252	306	337	
			2,1	$h_1$	4,8	9,1	12,2	13,8	14,9
	турбіна з спіралеподібними лопатями, які збільшуються в об'ємі	$P_1$	10,8	$U_1, В$	7,4	11,4	15,4	17	18
				$n_1, об/хв$	168	278	360	412	447
		$P_2$	13,5	$U_2, В$	5,7	10,2	13,8	15,7	16,7
$n_2, об/хв$				141	254	324	384	410	
$P_3$		14,9	$U_3, В$	4,7	8,5	12	14,2	15,2	
			$n_3, об/хв$	118	220	292	353	375	
$P_4$		15,9	$U_4, В$	3,7	7,1	10,4	12	14,4	
			$n_4, об/хв$	101	184	258	304	340	
			2,1	$h_1$	4,8	9,1	12,2	13,8	14,9
турбіна з спіралеподібними лопатями зі зменшеним корпусом		$P_1$	9,3	$U_1, В$	6,8	10,8	14,8	17	19
				$n_1, об/хв$	170	270	335	409	443
		$P_2$	14,7	$U_2, В$	4,7	8,9	12,2	14,4	16,5
	$n_2, об/хв$			138	203	294	365	400	
	$P_3$	16	$U_3, В$	3,2	6,9	10,1	12,7	14,3	
			$n_3, об/хв$	97	175	250	310	353	
	$P_4$	17,2	$U_4, В$	2,3	5,4	8,5	11,2	12,8	
			$n_4, об/хв$	73	150	218	275	323	
			1,9	$h_1$	4,5	9	9,4	12,5	13,8

ТАБЛИЦЯ 2. ОТРИМАНІ ПОКАЗНИКИ МОДЕЛЕЮ ТУРБИНИ ГВИНТОВОГО ТИПУ: ЧИСЛО ОБЕРТІВ, ВИХІДНА НАПРУГА З ГЕНЕРАТОРА В ЧОТИРЬОХ РЕЖИМАХ ТА ПРИ П'ЯТИ РІВНЯХ ВОДИ У ВЕРХНЬОМУ Б'ЄФІ

$P$	$h_0$	$h$	19	30	40	50	60
$P_1$	8,2	$U_1, В$	8,5	13,1	15,5	17,9	20
		$n_1, об/хв$	192	304	379	420	471
$P_2$	13,3	$U_2, В$	6,9	11	13,8	16,3	18
		$n_2, об/хв$	159	264	330	387	430
$P_3$	14,8	$U_3, В$	4,9	9,2	12,1	14,3	16,3
		$n_3, об/хв$	128	236	306	358	401
$P_4$	16	$U_4, В$	3,7	8,3	11	13,1	15,2
		$n_4, об/хв$	106	210	280	330	372
	1,7	$h_1$	4,5	9	12,2	13,8	14,9

ТАБЛИЦЯ 3. ОТРИМАНІ ПОКАЗНИКИ МОДЕЛЕЮ ШНЕКОВОЇ ТУРБИНИ: ЧИСЛО ОБЕРТІВ, ВИХІДНА НАПРУГА З ГЕНЕРАТОРА В ЧОТИРЬОХ РЕЖИМАХ ТА ПРИ П'ЯТИ РІВНЯХ ВОДИ У ВЕРХНЬОМУ Б'ЄФІ

$P$	$h_0$	$h$	20	31	41	51	60
$P_1$	13,8	$U_1, В$	7,2	11,2	13,1	15,4	17
		$n_1, об/хв$	187	275	328	368	400
$P_2$	15,2	$U_2, В$	5,5	9,6	11,8	13,7	15,5
		$n_2, об/хв$	140	227	286	328	370
$P_3$	16,7	$U_3, В$	4,2	8,3	10,5	12,5	14,3
		$n_3, об/хв$	109	201	257	302	340
$P_4$	18	$U_4, В$	3	7,2	9,4	11,4	13,2
		$h$	81	175	230	280	315
	2,1	$U_1, В$	4,6	9,2	12,4	14	15,3

Після проведення експериментів досліджуваних моделей турбін на кожній позначці рівнів висоти води у верхньому б'єфі ( $h$ ) та зміні навантаження ( $P$ ), виконано аналіз впливу факторів на вихідні параметри (швидкість обертання турбіни  $n$ , електрична напруга ( $U$ ), для вибору оптимальної моделі турбіни, а також визначення її ефективності. З метою проведення аналізу ефективності турбін, побудовано графіки залежностей виробленої напруги ( $U$ ) генератором від висоти води у верхньому б'єфі ( $h$ ) для кожного рівня навантаження ( $P$ ) (рис. 1, 2), а також графіки залежності виробленої турбінами числа обертів від висоти води у верхньому б'єфі ( $h$ ), для кожного рівня навантаження (рис. 3, 4).

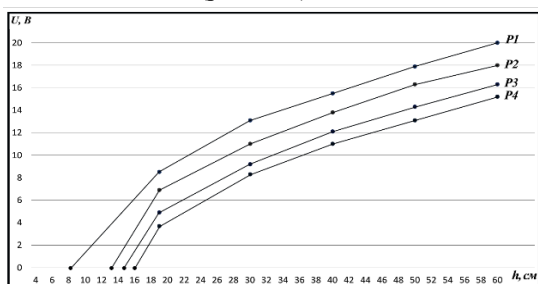


Рис. 1. Графік залежності вироблення генератором та турбіною гвинтового типу напруги в різних режимах навантаження від рівня води у верхньому б'єфі

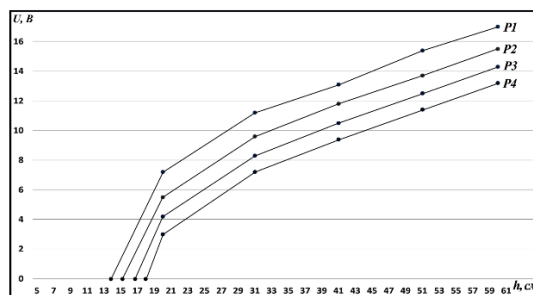


Рис. 2. Графік залежності вироблення генератором та шнековою турбіною напруги в різних режимах навантаження від рівня води у верхньому б'єфі

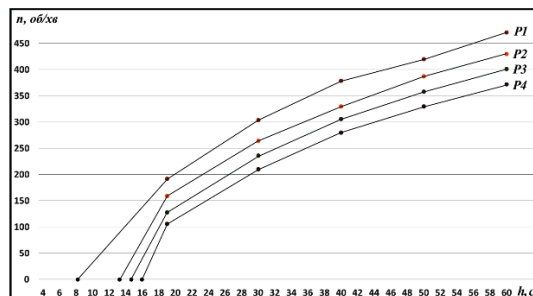


Рис. 3. Графік залежності вироблення генератором та турбіною гвинтового типу обертів  $n$  в різних режимах навантаження від рівня води у верхньому б'єфі

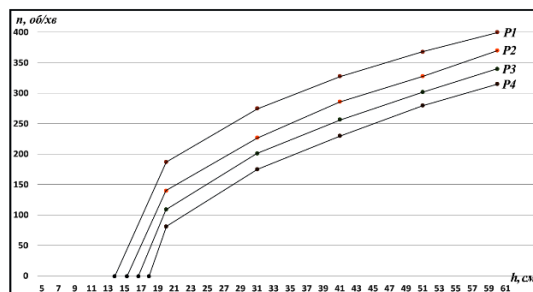


Рис. 4. Графік залежності вироблення генератором та шнековою турбіною обертів  $n$  в різних режимах навантаження від рівня води у верхньому б'єфі

Щоб вивчити взаємозв'язок висоти води у верхньому б'єфі і навантаження на моделі турбін у направленому потоці під кутом  $45^\circ$  до лопатей проведено порівняння отриманих параметрів для шнекової турбіни та турбіни гвинтового типу. Це дозволяє визначити як зміна одного фактору (наприклад, висоти води у верхньому б'єфі) впливає на вихідний параметр при різних значеннях другого фактору (навантаження).

Висота води у верхньому б'єфі визначає потенціальну енергію потоку. Зі збільшенням рівня води  $h$  збільшується швидкість потоку, що в свою чергу призводить до збільшення швидкості обертання турбіни гвинтового типу  $n_1 = 471$  об/хв та вироблення напруги генератором  $U_1 = 17,7$ в (табл. 2). При цьому відповідні показники шнекової турбіни в режимі холодного ходу становили:  $n_1 = 400$  об/хв;  $U_1 = 17$ в (табл. 3).

Навантаження на турбіни впливає на їх швидкість обертання та вироблення електричної енергії генераторами. Як видно на рис. 3, 4 зі збільшенням навантаження, частота обертання порівнювальних турбін зменшуються, що призводить до зниження напруги, а саме: напруга

на генераторі гвинтової турбіни при максимальному навантаженні  $U_4 = 15,2\text{в}$ , проти  $U_4 = 13,2\text{в}$  на генераторі шнекової турбіни. Також відрізняється частота обертання турбін: турбіна гвинтового типу має частоту  $n_4 = 372$  об/хв при навантаженні  $P_4$ , а шнекова турбіна при такому ж навантаженні -  $n_4 = 315$  об/хв.

При конструктивних відмінностях досліджуваних турбін і однакової масі вдалося досягти кращих показників турбіни гвинтового типу порівняльно зі шнековою турбіною. При цьому напруга при холостому ході ( $P_1$ ) підвищилась на  $0,7\text{в}$  (4%), та на  $2\text{в}$  (15%) при максимальному навантаженні ( $P_4$ ).

#### IV. ВИСНОВКИ

1. На основі отриманих даних досліджень у водному потоці запропонованих варіантів моделей турбін було виявлено оптимальний варіант – турбіна гвинтового типу.

2. Підтвердилася дослідним шляхом ідея можливості використання корпусу турбіни як маховика.

3. Турбіна гвинтового типу виявилась на 15% більш ефективною від шнекової за виробітком електричної енергії при максимальному навантаженні та на 4% при роботі в режимі холостого ходу.

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Шнекова турбіна <https://promenergia.com.ua/hidroturbiny/shnekova-turbina/> (дата звернення: 12.10.2024)
- [2] Вовчак В., Тесленко О., Самченко О. Мала гідроенергетика України. Технологічні особливості малих ГЕС. Том II. 2018 <https://energyukraine.org/wp-content/uploads/2018/05/Otchet-MGES2.pdf> (дата звернення: 12.10.2024)
- [3] Герба О. В. Використання турбін зі спіралеподібними лопатями / О. В. Герба // Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць. - Рівне : НУВГП, 2023. - Вип. 4(104). - С. 3-12.
- [4] Герба О.В. Патент на корисну модель №150304 «Турбіна зі спіралеподібними лопатями» 26.01.2022р. Бюл. №4
- [5] Герба О.В., Клюха О.О. Патент на корисну модель №156567 «Турбіна гвинтового типу» 10.07.2024р. Бюл. №28
- [6] Рябенко О.А. Хвилястий стрибок: монографія. – Рівне: НУВГП, 2022. – 277 с.
- [7] Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука. 1976. 296 с.
- [8] Протодюконов М. М., Тедер Р. И. Методика рационального планирования экспериментов / М.. Наука. 1970. 76 с.
- [9] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling and Brian P. Cambridge University, Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, Third Edition, 2007. – 1235p.