

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до проведення практичної роботи
«Натурні випробовування робочого колеса турбіни»
та організації самостійної роботи
з навчальної дисципліни

**«СУЧАСНІ МЕТОДИ ПРОЄКТУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ТА
НАСОСНИХ СТАНЦІЙ»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної форми
навчання зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія
та водні технології)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2025

Методичні рекомендації до проведення практичної роботи «Натурні випробовування робочого колеса турбіни» та організації самостійної роботи з навчальної дисципліни «Сучасні методи проектування гідравлічних та насосних станцій» (для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної форми навчання зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. А. О. Мозговий. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 21 с.

Укладач д-р техн. наук, доц. А. О. Мозговий

Рецензент

І. В. Храпатова, кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою геотехніки, підземних споруд та гідротехнічного будівництва, протокол № 1 від 20.08.2024

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Практична робота на тему «Натурні випробування робочого колеса турбіни».....	5
1 Опис експериментальної установки.....	5
2 Контрольно-вимірювальна апаратура і методика визначення основних параметрів.....	7
2.1 Вимірювання частоти обертів.....	7
2.2 Визначення крутного моменту.....	9
2.3 Визначення напору.....	9
2.4 Вимірювання витрат.....	10
2.5 Похибка визначення ККД.....	10
3 Методика проведення енергетичних випробувань в турбінному режимі і обробка їх результатів.....	11
3.1 Послідовність виконання випробувань.....	11
3.1.1 Алгоритм для розрахунків параметрів.....	11
3.1.2 Приклад розрахунку на ЕОМ.....	13
Розрахунок основних параметрів.....	14
3.1.3 Побудова характеристик.....	15
3.1.4 Побудова лінії обмеження потужності.....	16
4 Приклад розрахунків на ПЕОМ.....	16
5 Зміст звіту про практичну роботу.....	17
Питання для самоконтролю.....	18
Завдання для самостійної роботи.....	18
Список посилань.....	20

ВСТУП

Гідравлічні машини (гідравлічні турбіни, насоси і обернені гідромашини) – насосотурбіни застосовують для постійної експлуатації на гідроелектричних, насосних і гідроакумуючих станціях.

Об'єкти гідротехнічного будівництва за конструктивним рішенням, розмірами, формами, кліматичними, топографічними, гідрологічними і інженерно-геологічними умовами унікальні. Це накладає відбиток і на гідромашинобудування.

Гідравлічні турбіни, насоси і обернені гідромашини, як правило, розробляються і виготовляються відповідно до вимог конкретного об'єкта. Водночас, типи і параметри гідравлічних машин, що приймаються, суттєво впливають на будівельну частину гідроенергетичних споруд, на обсяги робіт, вартість і техніко-економічні показники, їх ефективність.

Зазначені фактори свідчать про те, що спеціалістам в галузі гідротехнічного будівництва в їх практичній діяльності необхідно розв'язувати завдання, пов'язані з використанням гідромашин [1–9], тому виконання практичної роботи на тему «Натурні випробування робочого колеса турбіни» відіграє важливу роль в підготовці інженера-гідротехніка.

Метою практичної роботи «Натурні випробування робочого колеса турбіни» є набуття майбутніми інженерами-гідротехніками навичок щодо розуміння сучасних конструкцій, робочих процесів і технічних характеристик турбін, а саме:

- а) виконувати розрахунки і вибір основних параметрів гідротурбінного обладнання стосовно заданих умов роботи за напором і потужністю;
- б) визначати основні форми і розміри блока гідроелектростанцій, необхідні відповідно до умов розташування підбраного гідротурбінного обладнання;
- в) проводити лабораторні енергетичні і кавітаційні випробування гідротурбін, виконувати обробку даних експериментальних досліджень;
- г) оцінювати енергетичні і кавітаційні властивості натурних гідротурбін і складати їх експлуатаційні характеристики;
- д) виконувати наближений розрахунок умов регулювання і обирати основні параметри системи регулювання енергетичного обладнання гідроелектростанцій.

Методичні рекомендації сприяють набуттю здобувачами спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» вмінь і практичних навичок із дисципліни «Сучасні методи проєктування гідравлічних та насосних станцій».

ПРАКТИЧНА РОБОТА НА ТЕМУ «НАТУРНІ ВИПРОБУВАННЯ РОБОЧОГО КОЛЕСА ТУРБІНИ»

Мета – визначення залежності коефіцієнта корисної дії від режиму роботи гідромашини (обертів, відкриття спрямовуючого апарату a_0 , кута встановлення лопатей). За результатами енергетичних випробувань визначається діапазон роботи натурної гідротурбіни [1, 3].

1 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Енерго-кавітаційний стенд становить установку із замкненим циклом циркуляції води, що дозволяє проводити енергетичні, кавітаційні, розгінні, силові та ін. спеціальні випробування моделей оборотних гідромашин із діаметром до 500 мм.

Стенд характеризується такими основними параметрами:

- 1) максимальний напір $H_{\text{макс}} = 100$ м;
- 2) витрати, які відповідають максимальному напору $Q = 1,4$ м³/с;
- 3) максимальні витрати $Q_{\text{макс}} = 2,8$ м³/с;
- 4) напір, який відповідає максимальним витратам $H = 50$ м;
- 5) абсолютний тиск під робочим колесом $p = 0,1-3,5$ кгс/см;
- 6) об'єм води в стенді $V = 350$ м³.

Схема стенда зображена на рисунку 1.

Під час енергетичних випробувань моделей обернених гідромашин в турбінному режимі циркуляція води і напір у стенді утворюються одним або двома відцентровими насосами (18). Насоси подають воду через ресорбер (13), вертикальну ділянку трубопроводу (9), заспокійливу решітку (8), двосторонній витратомір (7), бак-розширювач (6) в модельний блок (4). Із модельного блока вода через відсмоктувальну трубу надходить у бак нижнього б'єфа (3) і через вертикальний трубопровід (2) повертається до всмоктувальних патрубків насоса.

Зміна режиму роботи насосів здійснюється шляхом регулювання частоти обертання приводних електродвигунів постійного струму.

У насосному режимі витрата води і напір регулюються засувкою на трубопроводі (9). Як генератор (при випробуваннях в турбінному режимі), використовується вертикальна балансирна машина (5) постійного струму.

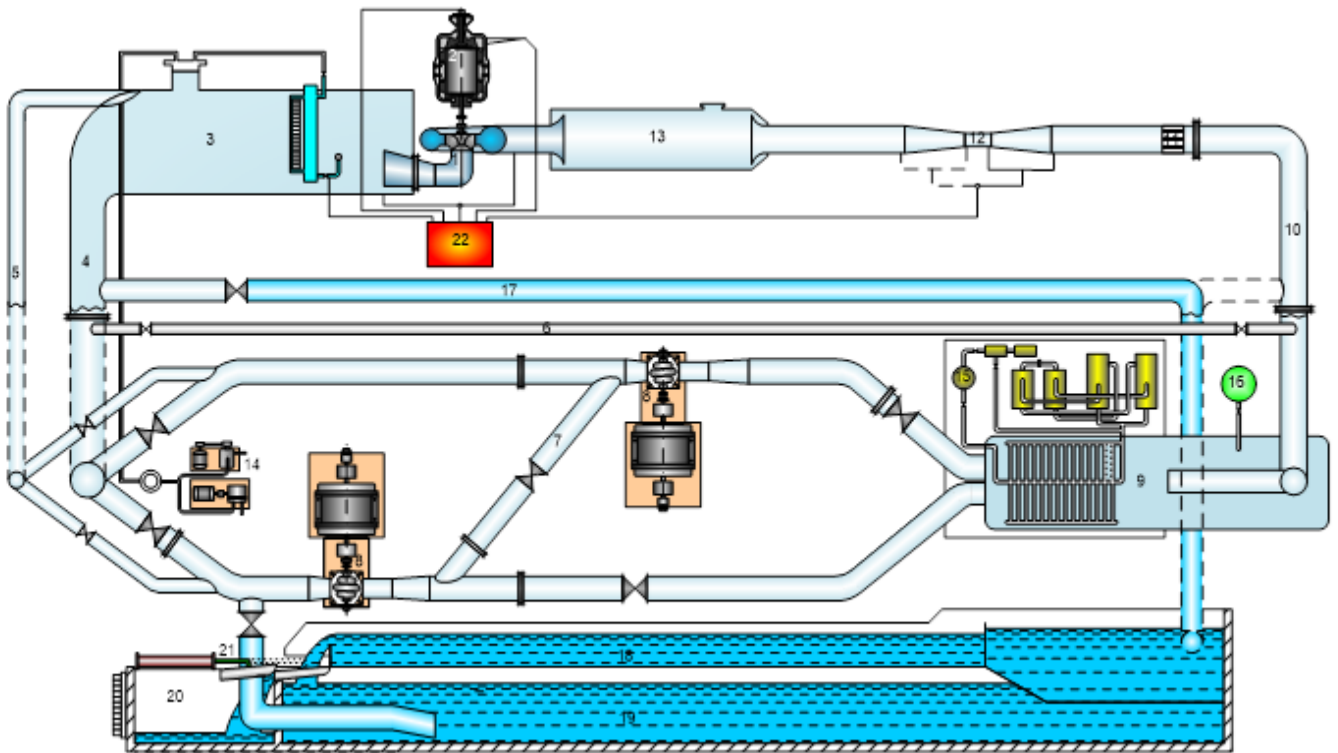


Рисунок 1 – Схема універсального енергокавітаційного стенду (ВАТ «Турбоатом»):

- | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|--|
| 1. Модельний блок | 8. Насосний агрегат | 16. Регулятор тиску |
| 2. Балансирна машина | 9. Ресорбер | 17. Трубопровід тарировки витратомірів |
| 3. Бак нижнього б'єфу | 10. Напірний трубопровід | 18. Лоток |
| 4. Зливний трубопровід | 11. Сотовий вирівнювач | 19. Збірний резервуар |
| 5. Аераційний трубопровід | 12. Витратомірний комплекс | 20. Мірна ємкість |
| 6. Байпасний трубопровід | 13. Бак розширювач | 21. Дефлектор |
| 7. Система засувок та трубопроводів | 14. Вакуумні насоси | 22. Розрахунково-обчислювальний комплекс |
| | 15. Охолоджуюча система | |

2 КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНА АПАРАТУРА І МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ

Стенд обладнаний вимірювально-обчислювальним комплексом (ВОК), блок-схема якого зображена на рисунку 2.

Апаратура, що входить до ВОК, дозволяє проводити вимірювання параметрів в автоматичному режимі з подальшою обробкою результатів вимірювань на ЕОМ комплексу.

У процесі проведення експерименту вимірюються такі параметри:

- а) частота обертів робочого колеса (р. к.), n , хв^{-1} ;
- б) статичний напір $H_{ст}$, м;
- в) витрати води, що проходять через модельну гідромашину, Q , $\text{м}^3/\text{с}$;
- г) напір, що відповідає абсолютному тиску на позначці нижнього кільця спрямовуючого апарата H_a , м;
- д) зусилля на важелі динамометра F , кгс;
- е) напір, що відповідає барометричному тиску, H_B , м;
- ж) температура води t , $^{\circ}\text{C}$.

Час вимірювання вказаних параметрів становить 10 с.

2.1 Вимірювання частоти обертів

Для визначення частоти обертання робочого колеса як показувач імпульсів застосовується тахогенератор ДТК-2Т, приєднаний до вала балансірної машини. Число імпульсів N вимірюється частотоміром впродовж чітко фіксованого проміжку часу T , який задається кварцевим генератором лічильника:

$$N = \nu \cdot T. \quad (1)$$

Час вимірювання становить 10 с.

Тахогенератор ДТК-2Т має 60 пар полюсів, тому за один оберт вала моделі частотомір приймає 60 імпульсів ($t = 60$). Частота імпульсів пов'язана з обертами вала співвідношенням

$$\nu = \frac{n \cdot z}{60} = \frac{n \cdot 60}{60} = n, (\text{Гц}), \quad (2)$$

$$N = T \cdot n. \quad (3)$$

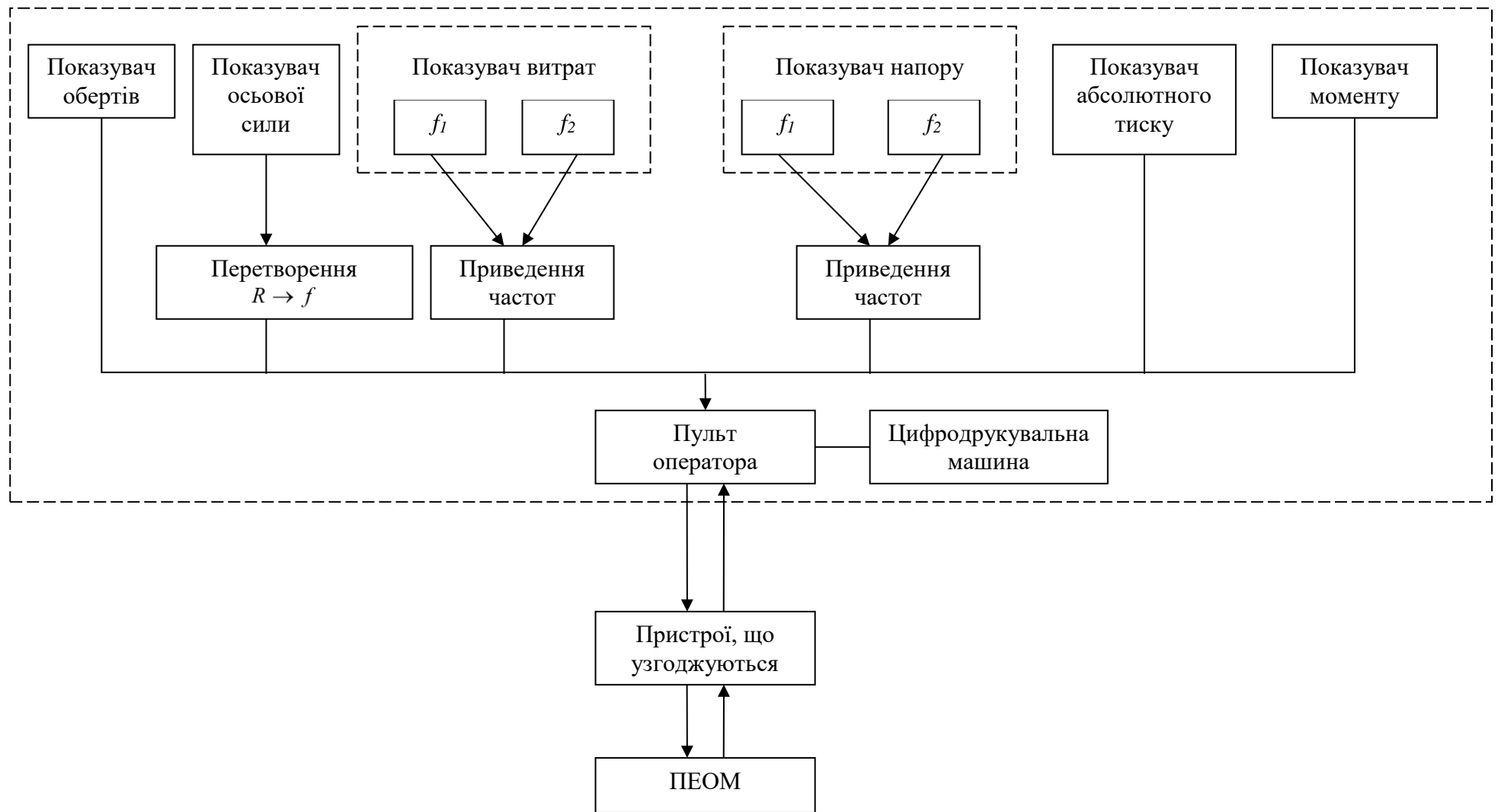


Рисунок 2 – Блок-схема вимірювально-обчислювального комплексу

Відносна похибка частоти обертання

$$f_n = \pm \left[(\pm f_r) + \left(\pm \frac{1}{N} \right) \right] \cdot 100\%, \quad (4)$$

де f_r – відносна похибка кварцевого генератора, $f_n = \pm I \cdot 10^{-6}$;

$\frac{1}{N}$ – похибка частотоміра для вимірювання кількості електричних імпульсів;

N – кількість імпульсів за час відрахування.

При середній частоті обертання $n = 800 \text{ хв}^{-1}$ відносна похибка вимірювання з $f_n = \pm 0,01\%$.

2.2 Визначення крутного моменту

Крутний момент на валу моделі утворюється (приймається) моторгенератором, який через важіль постійної довжини і гнучкої стрічки, з'єднаної з віброчастотним показувачем сили типу ПСВТ. Зусилля, що виникає в балансірному статорі, діє на показувач і змінює (пропорційно до величини прикладеної сили) частоту коливань його чутливого елемента. Частотні імпульси вимірюються електронним частотоміром, а період заміру передається на ЕОМ.

Значення сили, що дорівнює частоті, визначається за тарифувальною залежністю, що вводиться в пам'ять електронно-обчислювальної машини. Величина крутного моменту визначається як добуток сили на довжину плеча важеля. Величина механічних втрат у підшипникових вузлах визначається дослідним шляхом залежно від обертів і тиску під кришкою гідромашини.

Похибка вимірювання крутного моменту $f_{мкр}$ залежить від похибок вимірювання сили f_F , що становить 0,1 %, довжини важеля f_L і не перевищує 0,016 %. Тоді межева відносна похибка величини крутного моменту

$$f_{мкр} \pm \sqrt{f_F^2 + f_L^2} = \pm \sqrt{0,1^2 + 0,016^2} \cong \pm 0,14. \quad (5)$$

2.3 Визначення напору

Напір у турбінному і насосному режимах визначається як різниця повних питомих енергій потоку в напірному перерізі (спіральна камера) і у вхідному (вихідному) перерізі всмоктувальної труби:

$$H_n = \left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \right) = \left(\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right) = H_{cm} + H_g, \quad (6)$$

де P_1, P_2 – статичні тиски на вході та виході із модельної гідромашини, приведені до однієї позначки;

V_1, V_2 – швидкості на вході та виході із модельної гідромашини.

Уведення в ЕОМ вихідних даних і параметрів, що вимірюються, здійснюється в системі КГСМ, а виводяться величини в одиницях СІ.

Різниця статичних напорів вимірюється віброчастотним показувачем перепаду тиску типу ППДВ-10/20. Діафрагма давача, приймаючи навантаження, змінює частоту власних коливань чуйного елемента, що надходять на частотомір та ЕОМ. Відповідне значення статичної складової напору знаходять за тарировальною залежністю показувача, запрограмованою в пам'яті машини. Швидкісний напір H_g обчислюється відповідно до різниці швидкісних енергій в перерізах, визначених за середньою швидкістю потоку:

$$H_g = Q^2 \cdot K = \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right), \quad (7)$$

де A_1 – площа перерізу підвідного патрубка;

A_2 – площа на виході із відсмоктувальної труби.

Основна частина похибки під час вимірювання напору залежить від точності показувача. Досліди щодо тарировання показувача свідчать, що межова відносна похибка вимірювань становить $\pm 0,15$ %.

2.4 Вимірювання витрат

Витрати води через модель вимірюються за допомогою двостороннього витратоміра Вентурі і контролюються за показниками електромагнітного витратоміру. Різниця тисків на витратомірі Вентурі вимірюється показником перепаду тисків ППДВ-0,5. Витратоміри тарировані в діапазоні витрат від 40 л/с до 700 л/с. В результаті тарировання отримано коефіцієнт витрат для даного витратоміру Вентурі. Коефіцієнт витрат заноситься до пам'яті машини і використовується для вирахування величини витрат під час дослідів.

Межова відносна похибка функцій $Q = \alpha\sqrt{\Delta h}$ в турбінному і насосному режимах за результатами тарировання не перевищує $\pm 0,18$ %.

2.5 Похибка визначення ККД

Межова відносна похибка визначення ККД моделі з урахуванням похибки складових параметрів

$$f_{\eta} = \pm \sqrt{f_n^2 + f_F + f_H + f_Q^2} = \sqrt{0,01^2 + 0,1^2 + 0,15^2 + 0,18^2} \cong \pm 0,26. \quad (8)$$

Відповідно до основних параметрів основним параметрам, що вимірюються, стенд, обладнаний дублюючими засобами вимірювань.

3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ В ТУРБІННОМУ РЕЖИМІ І ОБРОБКА ЇХ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Послідовність виконання випробувань

Випробування моделі починають з мінімального або максимального відкриття спрямовуючого апарату d_0 . Встановивши задане відкриття спрямовуючого апарату, виводять модель турбіни на заданий програмою режим роботи. Досягнувши встановленого режиму роботи при постійному напорі, постійних швидкостях обертання і моменті на моделі, дають сигнал на виконання вимірювань. Випробування проводять спочатку на всіх заданих режимах шляхом зміни навантаження під час гальмування без зміни відкриття спрямовуючого апарату. Кількість режимних точок вимірювання при одному відкритті спрямовуючого апарату залежить від швидкохідності турбіни і охоплює діапазон щодо обертів від 30 % n'_{1OPT} до розгінних обертів, якщо не обумовлені особисті умови випробувань.

Для визначення робочої характеристики турбіни достатніми є 8–12 точок відкриття спрямовуючого апарату. Після цього проводять контрольні вимірювання на характерних режимах (наприклад, при максимальному коефіцієнті корисної дії (ККД)), а також повторення точок, що випадають, для того, щоб визначити, чим це викликано – випадковою помилкою чи іншим чинником. Закінчивши випробування при цьому відкритті спрямовуючого апарату, встановлюють друге задане відкриття і продовжують випробування аналогічно. Кількість фіксованих відкриттів спрямовуючого апарату, за яких виконуються вимірювання, залежить від діапазону (за потужністю), в якому необхідно визначити характеристику турбіни. Достатньо вимірювань при 8–10 відкриттях спрямовуючого апарату. Ці відкриття повинні рівномірно охопити зону від 25–40 % до 100 % потужності. Інколи в зоні максимальних значень ККД відкриття для вимірювань намічують частіше.

3.1.1 Алгоритм для розрахунків параметрів

Для розрахунків параметрів застосовуються такі залежності:

1) напір турбіни, Дж/кг

$$H_T = \frac{P_1 - P_2}{\rho} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = H'_{cm} + H'_g = H'_{cm} + \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right); \quad (9)$$

2) напір насоса, Дж/кг

$$H_H = \frac{P_1 - P_2}{\rho} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = H'_{cm} + H'_g = H'_{cm} + \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right); \quad (10)$$

3) витрата турбіни і насоса, м³/с

$$Q = d \cdot \sqrt{\Delta h}; \quad (11)$$

4) крутний момент турбіни і насоса, Н м

$$M_{кр} = F' L = 1,5 F', \quad (12)$$

де $F' = F \cdot g$;

5) частота обертів турбіни і насоса, хв⁻¹

$$n \sim v; \quad (13)$$

6) потужність турбіни, Вт

$$P_T = M_{кр} \cdot \omega; \quad (14)$$

7) потужність насоса, Вт

$$P_H = \rho \cdot Q \cdot H; \quad (15)$$

8) ККД турбіни, %

$$\eta_T = \frac{P_T}{\rho Q H} \cdot 100\%; \quad (16)$$

9) ККД насоса, %

$$\eta_H = \frac{P_H}{M \omega} \cdot 100\%. \quad (17)$$

Наведені величини визначають за такими формулами:

$$n'_1 = \frac{nD_1}{VH}, \text{ об/хв}, \quad (18)$$

$$Q'_1 = \frac{q}{D_1^2 VH}, \text{ л/с}. \quad (19)$$

Усі параметри заносять до протоколів випробувань, зразки яких наведені в таблицях 3 і 6.

3.1.2 Приклад розрахунку на ЕОМ

Таблиця 1 – Вихідні дані

№ з/п	Найменування параметрів	Позначення	Числове значення
1	Прискорення вільного падіння	g	9,810 65 м/с ²
2	Площа вхідного перерізу	A ₁	0,113 008 9 м ²
3	Площа на виході з відсмоктувальної труби	A ₂	0,340 296 м ²
4	Коефіцієнт швидкісного напору	K	3,550 574
5	Довжина важеля динамометра	L	1,5 м
6	Діаметр робочого колеса	D ₁	0,5 м
7	Тиск, що відповідає геометричній висоті показчика абсолютного тиску відносно нижнього кільця спрямовуючого апарату	H' _В	0,141 7 кгс/см ²
8	Температура води в стенді	t _{H2O}	18 °С
9	Барометричний тиск	H _В	1,02 кгс/см ²
10	Коефіцієнт витрат	α	0,304 839
11	Тиск пароутворення	H _d	0,021 кгс/см ²

Таблиця 2 – Вимірювані параметри (див. протокол)

№ з/п	Найменування параметрів	Позначення	Числове значення
1	Частота обертання моделі	n	745,4 хв ⁻¹
2	Статичний напір	H _{ст}	19,2 м
3	Зусилля на важелі динамометра	F	55,91 кгс
4	Напір, що відповідає абсолютному тиску	H _а	10,666 м
5	Напір, що відповідає перепаду тисків на двосторонньому витратомірі	Δh	1,587 м

Розрахунок основних параметрів

Об'ємні витрати, м³/с

$$Q_V = \alpha \cdot \sqrt{\Delta h} = 0,304839 \cdot \sqrt{1,587} = 0,384. \quad (20)$$

Передбачуваний напір гідротурбіни, Дж/кг

$$H_n = H'_{cm} + H'_g = H'_{cm} + Q_V^2 \cdot K = 19,2 \cdot 9,81 + 0,384^2 \cdot 3,35 \cdot 9,81 = 193,5. \quad (21)$$

Крутний момент, Нм

$$M_{кр} = F' \cdot L = 55,91 \cdot 1,5 \cdot 9,81 = 822. \quad (22)$$

Кутова швидкість, с⁻¹

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30} = 0,10472 \cdot n. \quad (23)$$

Коефіцієнт корисної дії, %

$$\eta = \frac{N_{вих} \cdot 100}{N_{вх}} = \frac{\omega \cdot M \cdot 100}{10^3 \cdot Q_V \cdot H_n} = \frac{0,10472 \cdot 745,4 \cdot 822,76 \cdot 100}{10^3 \cdot 0,384 \cdot 193,45} = 86,4. \quad (24)$$

Приведені оберти, хв⁻¹

$$n'_t = \frac{nD_1}{\sqrt{H}} = \frac{745,4 \cdot 0,5}{\sqrt{19,72}} = 83,92. \quad (25)$$

Приведені витрати, м³/с

$$Q'_t = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H_n}} = \frac{0,384}{0,25 \cdot \sqrt{19,72}} = 0,3458. \quad (26)$$

Кавітаційний коефіцієнт установки

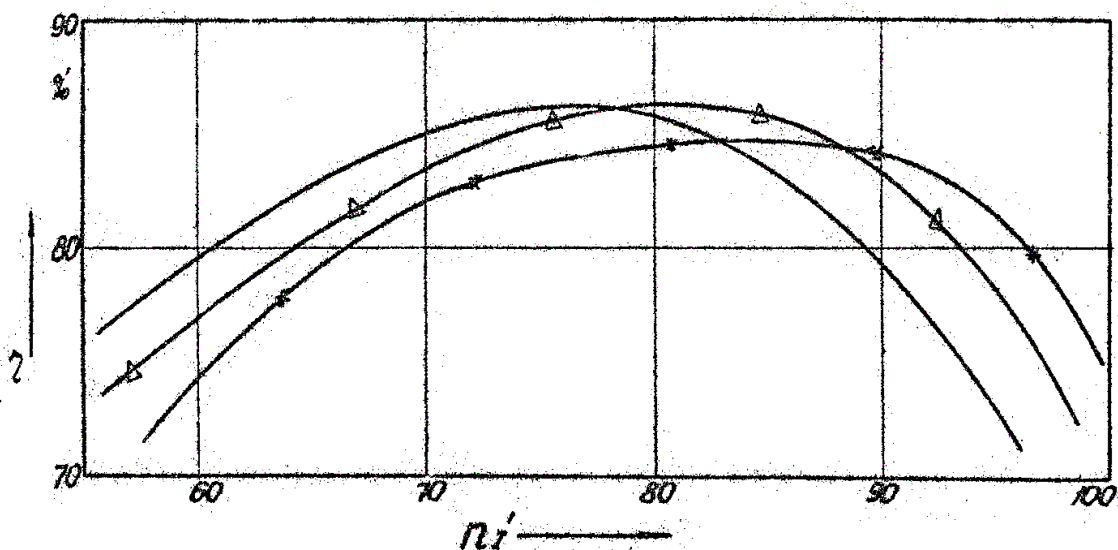
$$\sigma_y = \frac{(H_e - H_s) - H_y - H_s + H_{a'}}{H_n} = \frac{10,66}{19,72} = 0,5409. \quad (27)$$

Таблиця 3 – Протокол випробувань № 1

№ з/п	Q , $м^3/с$	Q'_l , $м^3/с$	H_n , $Дж/кг$	σ_y	n , $хв^{-1}$	n'_l , $хв^{-1}$	$M_{кр}$, $Нм$	η , %	Δh , м
1	0,384 0	0,345 8	193,45	0,540 9	745,4	83,93	822,76	86,4	1,587
2									
.									
.									
12									

3.1.3 Побудова характеристик

У процесі випробувань для кожного $a_0 = const$ будують залежності $\eta = f(n'_l)$ (рис. 3) і $Q'_l = f(n'_l)$. На основі побудованих графіків складають універсальну характеристику модельної турбіни. Для цього на кожному графіку $\eta = f(n'_l)$ проводять горизонтальні лінії в діапазоні від 80 % і вище, через 1 %, а при значеннях ККД, менших за 80 % – через 2 % або 5 %. Для обраного значення $\eta = const$ на кривій $\eta = f(n'_l)$ для кожного відкриття знаходять два відповідних значення n'_l . Отримані значення наносять на графік $Q'_l = f(n'_l)$ для кожного $a_0 = const$. Поєднуючи точки плавною кривою в координатах $n'_l-Q'_l$ знаходять сукупність режимів, за яких модель має дане значення $\eta = const$. Таким чином знаходять сукупність режимів, при яких модель турбіни має інші значення $\eta = const$. У результаті отримують універсальну характеристику модельної турбіни.

Рисунок 3 – Залежності $\eta = f(n'_l)$ при $\alpha_0 = const$: $\alpha_0 = 30$ мм; $\alpha_0 = 35$ мм; $\alpha_0 = 40$ мм

3.1.4 Побудова лінії обмеження потужності

На універсальну характеристику наносять лінії максимальної потужності, а також рекомендується наносити лінію 95 % від $N'_{I\max}$. Лінія максимальної потужності будується так:

1. Задається послідовність значень приведених обертів, найбільш повно охоплюючих оптимальну зону універсальної характеристики.

2. Для кожного перерізу $n'_I = const$ будується залежність $N'_I = f(Q'_I)$ (див. рис. 4). Для кожної кривої визначають максимальну приведену потужність моделі. Для прийнятих значень n'_I

$$N'_I = \frac{\gamma \cdot Q'_I \cdot \eta}{102}; \text{кВт.} \quad (28)$$

3. Значення витрат, що відповідають $N'_{I\max}$ та $0,95N'_{I\max}$, відкладають на лінії $n'_I = const$ універсальної характеристики. Отримані точки з'єднують плавною кривою.

4 ПРИКЛАД РОЗРАХУНКІВ НА ПЕОМ

Таблиця 4 – Вихідні дані

№ з/п	Найменування параметрів	Позначення	Числове значення
1	Прискорення вільного падіння	g	9,810 65 м/с ²
2	Площа вхідного перерізу	A ₁	0,113 008 9 м ²
3	Площа на виході з відсмоктувальної труби	A ₂	0,340 296 м ²
4	Коефіцієнт швидкісного напору	K	3,550 574
5	Довжина важеля динамометра	L	1,5 м
6	Діаметр робочого колеса	D ₁	0,5 м
7	Тиск, що відповідає геометричній висоті показчика абсолютного тиску відносно нижнього кільця спрямовуючого апарату	H' _B	0,141 7 кгс/см ²
8	Температура води в стенді	t _{H2O}	19 °C
9	Барометричний тиск	H _B	1,003 7 кгс/см ²
10	Коефіцієнт витрат	α	0,304 869
11	Тиск пароутворення	H _d	0,022 кгс/см ²

Таблиця 5 – Вимірювані параметри (див. протокол)

№ з/п	Найменування параметрів	Позначення	Числове значення
1	Частота обертання моделі	n	749 хв^{-1}
2	Статичний напір	$H_{\text{ст}}$	16,86 м
3	Зусилля на важелі динамометра	F	57,77 кгс
4	Напір, що відповідає абсолютному тиску	H_a	10,592 м
5	Напір, що відповідає перепаду тисків на двосторонньому витратомірі	Δh	1,352 08 м

Таблиця 6 – Протокол випробувань № 2

№ з/п	H_n , Дж/кг	Q , $\text{м}^3/\text{с}$	n , хв^{-1}	$M_{\text{кр}}$, H_m	$Q_{\text{пр}}$, $\text{м}^3/\text{с}$	$H_{\text{пр}}$, Дж/кг	η , %	$\sigma_{\text{уст}}$	Q'_I , $\text{М}^3/\text{с}$	n'_I , хв^{-1}
1	169,81	0,3545	749,0	850,13	0,473	302,74	90,16	0,612	0,341	90,01
2										
12										

Під час роботи оборотної гідромашини в насосному режимі можливі режими роботи, коли під час нормального її обертання потік рухається в інший бік, а також випадки обертання робочого колеса в інший бік. У зв'язку з цим необхідно мати повну характеристику оберненої гідромашини при додатному і від'ємному напрямках руху потоку, прямому (додатному) і оберненому напрямках обертання (рис. 4, 5). В цьому випадку будується повна чотирикватратна характеристика оберненої гідромашини в координатах $Q'_I - n'_I$, де наносяться лінії постійного напору і крутного моменту. Така характеристика визначає властивості оберненої гідромашини за всіх можливих режимах роботи.

5 ЗМІСТ ЗВІТУ ПРО ПРАКТИЧНУ РОБОТУ

1. Мета практичної роботи.
2. Основні дані про експериментальну установку.
3. Розрахункові формули, що використовуються під час виконання практичної роботи.
4. Оформлення протоколу випробувань.
5. Побудова залежності: для турбінного режиму $\eta = f(n'_I)$ при $a_0 = \text{const}$.

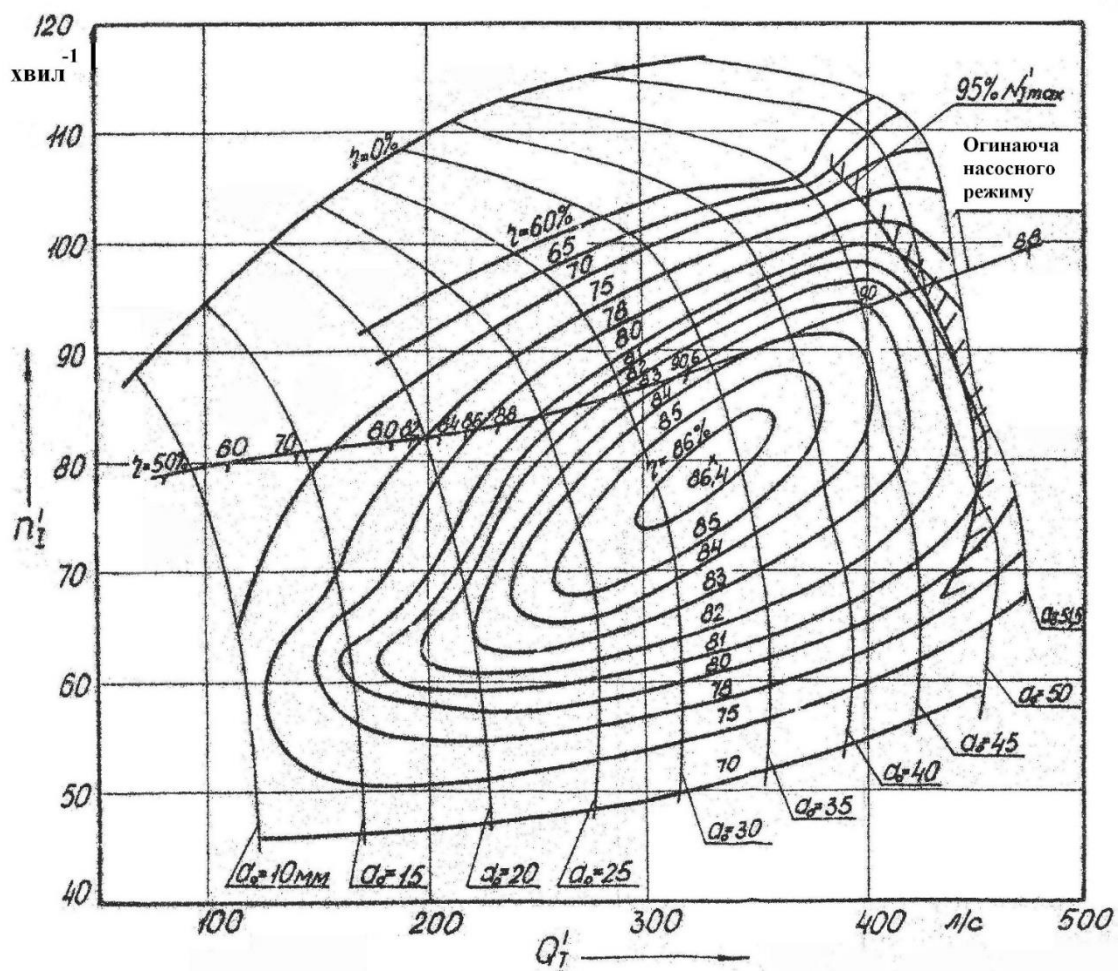


Рисунок 4 – Універсальна характеристика турбіни

Питання для самоконтролю

1. Навести призначення ГЕС.
2. Проаналізувати мету проведення енергетичних випробувань обернених гідромашин.
4. Проаналізувати алгоритм побудови залежності $\eta = f(n')$.
5. Зазначити подальше використання лінії обмеження потужності.

Завдання для самостійної роботи

1. Навести класифікацію і галузі застосування гідравлічних турбін.
2. Навести класифікацію і галузі застосування обернених гідравлічних машин.
3. Проаналізувати алгоритм вибору параметрів гідравлічної турбіни гідроелектростанції.
4. Проаналізувати алгоритм вибору параметрів оберненої гідравлічної машини гідроакumuлюючої електростанції.

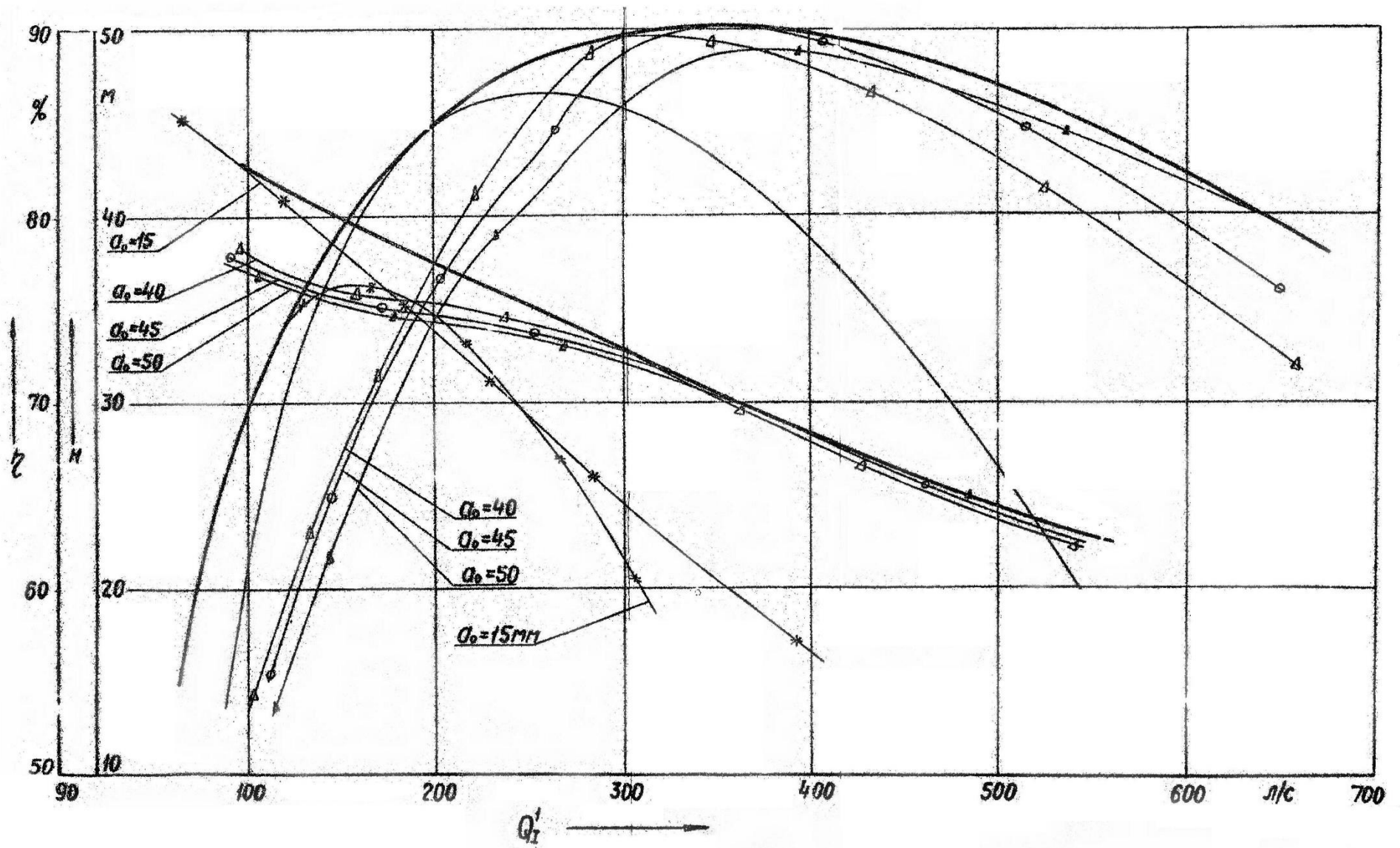


Рисунок 5 – Робоча характеристика турбіни

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Дистанційний курс «Сучасні методи проектування гідравлічних та насосних станцій». URL: <https://dl.kname.edu.ua/course/view.php?id=3422>.
2. Hydraulic structures: textbook / Novak P., Moffat A. I. B., Nalluri C., Narayanan R. A. I. B. 4-th ed. New York : Taylor & Francis, 2017. 700 p.
3. Engineering guidelines for the evaluation of hydropower : Chapter 1. Washington : FERC, 2016. 77 p. (Federal energy regulatory commission, Division of dam safety and inspections).
4. Bonilla B. A., Freire L. O., Quinatoa C. I. Flow Prediction Models for a Mini Hydroelectric Power Station // International Conference on Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability : materials of the conference. Singapore, 2023. P. 349–360.
5. Riabenko, O., Panasenko, A., Olefir, D., & Tymoshchuk, V. Improving the Efficiency of Using Water Resources for the Production of Electricity in Market // International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice–Rzeszów : materials of the conference. Cham, 2023. P. 337–350.
6. Huang, K., Mu, Z., Shi, X., Ai, X., Guo, J., & Ding, J. Comparative Study on Real-Time Economic Operation Algorithm of Three Gorges Hydropower Station // International Conference on Advances in Civil and Ecological Engineering Research : materials of the conference. Singapore, 2023. P. 266–277.
7. Liu, K., Lin, Y., Ji, B., Cheng, Y., Liu, D., Ding, J., & Chen, H. Revealing the pressure pulsations that can cause water column separation in pump-turbine. *Journal of Fluids and Structures*. Amsterdam, 2023. Vol. 123. P. 103989.
8. Wang, S., Gao, X., Ren, Z., & Xiao, Y. A method for calculating the moisture load in the tailrace surge tank of underground hydropower station based on field tests. *International Journal of Thermal Sciences*. Amsterdam, 2023. Vol. 193. P. 108538.
9. Hämmerling M., Walczak N., Kałuża T. Analysis of the Influence of Hydraulic and Hydrological Factors on the Operating Conditions of a Small Hydropower Station on the Example of the Stary Młyn Barrage on the Głomia River in Poland. *Energies*. Basel, 2023. Vol. 16, No 19. P. 6905.

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації
до проведення практичної роботи
«Натурні випробовування робочого колеса турбіни»
та організації самостійної роботи
з навчальної дисципліни

**«СУЧАСНІ МЕТОДИ ПРОЄКТУВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ
ТА НАСОСНИХ СТАНЦІЙ»**

*(для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти денної форми
навчання зі спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія
та водні технології)*

Укладач **МОЗГОВИЙ** Андрій Олексійович

Відповідальний за випуск *В. А. Александрович*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *А. О. Мозговий*

План 2025, поз. 16М

Підп. до друку 17.01.2025. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 1,3.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.